

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**COMPACTAÇÃO DO SOLO SOB TRÁFEGO AGRÍCOLA**

**GRACIELA APARECIDA PELEGRINI**

**Cascavel - PR**

**2008**

**GRACIELA APARECIDA PELEGRINI**

**COMPACTAÇÃO DO SOLO SOB TRÁFEGO AGRÍCOLA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola com área de concentração em **Engenharia Sistemas Agroindustriais**, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Miguel Angel Uribe Opazo

Co-orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Joaquim Odilon Pereira

**Cascavel - PR**

**2008**

**GRACIELA APARECIDA PELEGRINI**

**COMPACTAÇÃO DO SOLO SOB TRÁFEGO AGRÍCOLA**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de pós-graduação, em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, pela comissão formada pelos professores:

Orientador: Prof. Dr. Miguel Angel Uribe Opazo

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - Unioeste

Prof. Dr. Raimundo Pinheiro Neto

Centro de Ciências Agrárias - Uem

Prof. Dra. Lúcia Helena Pereira Nóbrega

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - Unioeste

Prof. Dr. Eduardo Godoy

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - Unioeste

Cascavel, 18 de junho de 2008.

	Pelegri, Graciela Aparecida
P381c	Compactação do solo sob tráfego agrícola, avaliada por penetrômetros de placa e de haste, antes e após a semeadura de culturas / Graciela Aparecida Pelegri. -- Cascavel, 2008. xxi, 80f. : il. ; 30 cm.
	Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, 2008. Orientador: Prof. Dr. Miguel Angel Uribe Opazo. Co-orientador: Prof. Dr. Joaquim Odilon Pereira.
	Bibliografia
	1. Solos - Compactação. 2. Solos - Manejo. 3. Solos - Conservação. 3. Mecanização agrícola. I. Título.
	CDD 21.ed. 631.3

**Ficha catalográfica elaborada por Darlene Teresinha Schuler CRB-14/1082**

*Dedico à  
minha mãe e meu pai,  
Lourdes e Orivaldo!*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, em quem tantas vezes busquei ajuda, e sempre fui atendida.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, pela oportunidade oferecida e aos funcionários que contribuíam direta ou indiretamente;

Ao professor Dr. Joaquim Odilon Pereira, por acreditar em mim para a realização deste trabalho;

Ao professor Dr. Suêdemio de Lima Silva, pelo imenso auxílio na realização deste trabalho, especialmente no desenvolvimento dos experimentos, meu reconhecimento e muito obrigada;

Ao professor Dr. Miguel Angel Uribe Opazo, por todo o auxílio, paciência e dedicação ofertada a mim para este trabalho, muito obrigada;

Ao colega Juliano Rodrigo Lamb, por todas as vezes que sem hora marcada esteve pronto para me ajudar.

À colega Veruschka Andreolla, por me auxiliar em tantas dificuldades e inexperiência de minha parte;

Aos meus professores da graduação Aprígio e Fernandes por me incentivarem a realizar este mestrado, meu muito obrigada;

Ao Rafael pela imensa ajuda em campo;

Ao CEFET – SC – Chapecó, pelo apoio e incentivo para a realização deste trabalho.

Agradeço a Cheila, a Helena e a todas as pessoas que de uma maneira ou de outra estiveram comigo, sempre prontos para me ajudar no que fosse preciso, sempre me incentivando a buscar cada vez mais.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiv
RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Preparação do Solo por Meio do Plantio Direto .....	3
2.2 Compactação do Solo.....	4
2.3 Resistência Mecânica do Solo à Penetração.....	6
2.4 Resistência do Solo à Pressão da Placa .....	8
2.4.1 Pressão de Pré-Consolidação .....	10
2.5 Densidade do Solo.....	12
2.6 Teor de Água no Solo .....	12
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Área Experimental .....	14
3.2 Delineamento do Experimento.....	15
3.3 Desenvolvimento e Coleta dos Dados .....	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	22
4.1 Antes das Passadas com o Rodado do Trator Agrícola - RSP, RSPP, DS e UMID .....	22
4.2 Depois das Passadas com o Rodado do Trator Agrícola - RSP, RSPP, DS e UMID .....	24
4.2.1 Resistência do Solo à Penetração (RSP) Depois das Passadas com o Trator Agrícola.....	24
4.2.2 Resistência do Solo à Pressão da Placa (RSPP) - Depois das Passadas com o Trator Agrícola.....	33
4.2.3 Densidade do Solo (DS) - Depois das Passadas com o Trator Agrícola.....	34

4.2.4	Teor de água no solo (UMID) - Depois das Passadas com o Trator Agrícola.....	36
4.3	Depois da Colheita - RSP, RSPP, DS e UMID .....	37
4.3.1	Resistência do Solo à Penetração (RSP) – Depois da Colheita ..	37
4.3.2	Resistência do Solo à Pressão da Placa (RSPP) – Depois da Colheita.....	47
4.3.3	Densidade do Solo (DS) Depois da Colheita – Penetrômetro Eletrônico .....	49
4.3.4	Densidade do Solo (DS) Depois da Colheita – Penetrômetro de Placa .....	50
4.3.5	Teor de Água no Solo (UMID) Depois da Colheita – Penetrômetro Eletrônico .....	53
4.3.6	Teor de Água no Solo (UMID) Depois da Colheita – Penetrômetro de Placa .....	54
5	CONCLUSÕES.....	57
	REFERÊNCIAS.....	59
	ANEXOS .....	66
	ANEXO A - RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO – RSP (MPa), RESISTÊNCIA DO SOLO À PRESSÃO DA PLACA – RSPP (kPa), DENSIDADE DO SOLO – DS ( $Mg.m^{-3}$ ) E TEOR DE ÁGUA NO SOLO – UMID (%) - ANTES DAS PASSADAS COM O RODADO DO TRATOR .....	67
	ANEXO B - CURVAS DE COMPRESSAO DO SOLO PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA DO SOLO À PRESSÃO DA PLACA – RSPP - PENETRÔMETRO DE PLACA .....	72



## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Teste de homogeneidade das variâncias dentro do Bloco 1, antes das passadas com o rodado do trator agrícola .....23
- Tabela 2** - Teste de homogeneidade das variâncias dentro do Bloco 2, antes das passadas com o rodado do trator agrícola .....23
- Tabela 3** - Teste de homogeneidade das variâncias dentro do Bloco 3, antes das passadas com o rodado do trator agrícola .....24
- Tabela 4** - Análise de variância para RSP (MPa) na camada de 0 a 0,05 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola.....25
- Tabela 5** - Comparação de médias da RSP na camada de 0 a 0,05 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada .....25
- Tabela 6** - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola..26
- Tabela 7** - Comparação de médias da RSP na camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada .....26
- Tabela 8** - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,10 a 0,15 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola..27
- Tabela 9** - Comparação de médias da RSP na camada de 0,10 a 0,15 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada .....28
- Tabela 10** - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,15 a 0,20 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola..28
- Tabela 11** - Comparação de médias da RSP na camada de 0,15 a 0,20 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada .....29
- Tabela 12** - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola..29

<b>Tabela 13</b> - Comparação de médias da RSP na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada .....	30
<b>Tabela 14</b> - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,25 a 0,30 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola..	30
<b>Tabela 15</b> - Comparação de médias da RSP na camada de 0,25 a 0,30 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada .....	31
<b>Tabela 16</b> - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,30 a 0,35 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola..	31
<b>Tabela 17</b> - Comparação de médias da RSP na camada de 0,30 a 0,35 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada .....	31
<b>Tabela 18</b> - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,35 a 0,40 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola..	32
<b>Tabela 19</b> - Comparação de médias da RSP na camada de 0,35 a 0,40 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada .....	32
<b>Tabela 20</b> - Análise de variância para a RSPP (kPa) – Ponto de pré-consolidação do solo, depois das passadas com o rodado do trator agrícola.....	33
<b>Tabela 21</b> - Comparação de médias da RSPP (kPa) – Ponto de pré-consolidação, depois das passadas com o trator agrícola ....	34
<b>Tabela 22</b> - Análise de variância para a densidade do solo ( $Mg.m^{-3}$ ), depois das passadas com o trator agrícola .....	34
<b>Tabela 23</b> - Comparação de médias para densidade do solo ( $Mg.m^{-3}$ ), depois das passadas com o trator agrícola .....	35
<b>Tabela 24</b> - Análise de variância para o teor de água no solo (%), depois das passadas com trator agrícola.....	36
<b>Tabela 25</b> - Comparação de médias para o teor de água no solo (%), depois das passadas com o trator agrícola .....	37

<b>Tabela 26</b> - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura, num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,0 a 0,05 m de profundidade .....	37
<b>Tabela 27</b> - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0 a 0,05 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada	38
<b>Tabela 28</b> - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,5 a 0,10 m de profundidade .....	38
<b>Tabela 29</b> - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada .....	39
<b>Tabela 30</b> - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,10 a 0,15m de profundidade .....	40
<b>Tabela 31</b> - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,10 a 0,15 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada .....	40
<b>Tabela 32</b> - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,15 a 0,20 m de profundidade .....	42
<b>Tabela 33</b> - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,15 a 0,20 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada .....	43
<b>Tabela 34</b> - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade .....	43
<b>Tabela 35</b> - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada .....	44
<b>Tabela 36</b> - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,25 a 0,30m de profundidade .....	44

<b>Tabela 37</b> - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,25 a 0,30 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada .....	45
<b>Tabela 38</b> - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,30 a 0,35 m de profundidade .....	45
<b>Tabela 39</b> - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,30 a 0,35 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada .....	46
<b>Tabela 40</b> - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,35 a 0,40 m de profundidade .....	46
<b>Tabela 41</b> - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,35 a 0,40 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada .....	47
<b>Tabela 42</b> - Análise de variância para a RSPP (kPa) – Ponto de pré-consolidação do solo, tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita .....	48
<b>Tabela 43</b> - Comparação de médias da RSPP (kPa) – Ponto de pré-consolidação, depois da colheita, segundo cultura e passada	49
<b>Tabela 44</b> - Análise de variância para a densidade do solo ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita – haste .....	50
<b>Tabela 45</b> - Comparação de médias para densidade do solo ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ), depois da colheita – haste, segundo cultura e passada .....	50
<b>Tabela 46</b> - Análise de variância para a densidade ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita – placa .....	51
<b>Tabela 47</b> - Comparação de médias para densidade do solo ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ), depois da colheita, segundo cultura e passada - placa .....	52
<b>Tabela 48</b> - Análise de variância para o teor de água (%), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita – haste .....	53

<b>Tabela 49</b> - Comparação de médias para teor de água do solo (%), depois da colheita – haste, segundo cultura e passada .....	54
<b>Tabela 50</b> - Análise de variância para o teor de água (%), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita – placa .....	54
<b>Tabela 51</b> - Comparação de médias para teor de água do solo (%), depois da colheita – placa, segundo cultura e passada .....	55

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> -	Penetrômetro de placa.....	9
<b>Figura 2</b> -	Croqui da área experimental.....	15
<b>Figura 3</b> -	Penetrômetro eletrônico de haste. ....	18
<b>Figura 4</b> -	Penetrômetro de placa acoplado a um trator agrícola. ....	19
<b>Figura 5</b> -	Média da resistência do solo à penetração (RSP) entre os blocos 1, 2 e 3, após uma, cinco e dez passadas do rodado do trator agrícola. ....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS

DS	- Densidade do solo
Kg	- Quilograma
KN	- Kilonewton
kPa	- Kilopascal
kW	- Kilowatts
Mg.m <sup>-3</sup>	- Miligramas por metros cúbicos
Mpa	- Megapascal
RSP	- Resistência mecânica do solo à penetração
RSPP	- Resistência do solo à pressão da placa
UMID	Teor de água no solo

## RESUMO

A compactação do solo tem sido apontada como um dos grandes problemas da agricultura moderna. No Brasil e no mundo existe grande preocupação com o aumento das áreas agrícolas mecanizadas que apresentam problemas de compactação. Este estudo foi realizado no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE. A área avaliada foi dividida em três faixas com três tratamentos cada, totalizando nove parcelas de 35 m<sup>2</sup>. Foram coletados os dados de resistência do solo à penetração (RSP), por meio de um penetrômetro eletrônico de haste, resistência do solo à placa ou índice de compressão do solo (RSPP), com o auxílio do penetrômetro de placa, densidade do solo (Ds) e teor de água no solo (UMID). Esses dados foram coletados em condições iniciais, caracterizando-se como os dados antes das passadas do rodado do trator agrícola. Na seqüência, com a finalidade de compactar o solo, foram realizadas as passadas com o rodado de trator agrícola, com o auxílio de um trator Ford, Série 7630, com tração dianteira auxiliar. Em uma das faixas foi realizada uma passada, em outra, cinco passadas e em outra com dez passadas, após, coletaram-se novamente os dados de RSP, RSPP, Ds e UMID, seguindo os mesmos parâmetros iniciais. Depois da coleta desses dados, foi realizada em faixas perpendiculares à faixa das passadas a semeadura das culturas de milho, soja e feijão, com o auxílio de uma semeadora-adubadora de precisão. Com término do ciclo e a colheita manual das culturas, coletaram-se novamente os dados de RSP, RSPP, DS e UMID. O trabalho teve como objetivos determinar a resistência mecânica do solo à penetração, o índice de compressão do solo e a densidade do solo, em função do aumento do número de passadas com um trator agrícola, antes da semeadura e após a colheita de soja, feijão e milho, e analisar o efeito dessas culturas na redução da compactação do solo. Os resultados obtidos permitiram concluir que as passadas do rodado do trator agrícola afetam diretamente no estado de compactação do solo, aumentando com isso a resistência mecânica do solo à penetração, resistência do solo à placa ou índice de compressão do solo e densidade do solo. O efeito das culturas na redução da resistência do solo à penetração não foi significativo, no entanto, na redução da pressão de pré-consolidação foi mais acentuado para a cultura do milho.

**Palavras-chave:** resistência mecânica do solo à penetração, índice de compressão, densidade do solo.



## ABSTRACT

### COMPACTING OF THE GROUND UNDER AGRICULTURAL TRAFFIC

The compactation of the soil has been pointed as one of the great problems of modern agriculture. In Brazil and the world great concern with the increase of the mechanized agricultural areas exists that present compactation problems. The study State University of the West of the Paraná was carried through in the Experimental Nucleus of Agricultural Engineering of the Uniãoeste -. The area was divided in three bands with three treatments each having totalized nine parcels of to 35 m<sup>2</sup> each, had been collected the data of resistance of the soil to the penetration (RSP) through penetrômetro electronic of connecting rod, resistance of the soil to the plate or index of compression of the soil (RSPP) I assist with it of penetrômetro of plate, density of the soil (Ds) and water text in the soil (UMID), these data had been collected in conditions you initiate characterizing itself as the data before the passed ones of twirled of the tractor the agriculturist. In the sequence, with the objective to compact the soil, the passed ones with the twirled one of agricultural tractor had been carried through, assist with it of a Ford tractor, Series 7630 with front traction to assist, in one of the bands had been carried through passing, in another one, five passed and in another one with ten passing, after, again collected the data of RSP, RSPP, Ds and UMID following the same initial parameters. After the collection of these data, was carried through in perpendicular bands the band of passed the sowing of the maize cultures, soy and beans, with the aid of a semeadora-adubadora of precision. With ending of the cycle and manual harvest of the cultures, the data of RSP, RSPP had been collected again, DS and UMID. The objective of this work was to determine the resistance mechanics of the soil to the penetration, index of compression of the soil and density of the soil in function of the passed increase of the number of with an agricultural tractor, before the sowing and after the harvest soy, beans and maize and to analyze the effect of these cultures in the reduction of the compactation of the soil. The gotten results had allowed to conclude that the passed ones of the twirled one of the agricultural tractor affect directly in the state of compactation of the same, increasing with this the resistance mechanics of the soil to the penetration, resistance of the soil to the plate or index of compression of the soil and density of the soil. The effect of the cultures in the reduction of the resistance of the soil to the penetration was not significant, however in the reduction of the daily pay-consolidation pressure more it was accented for the culture of the maize.

**Key-works:** resistance mechanics of the soil the penetration, index of compression, density of the soil.

# 1 INTRODUÇÃO

A tendência do desenvolvimento agrícola das últimas décadas trouxe máquinas e implementos de grandes dimensões e potência, o que fez aumentar os problemas em relação ao uso adequado de pneus e pressão de insuflagem. O rodado dos veículos que trafegam sobre uma área cultivada tornou-se um dos principais agentes de compactação dos solos agrícolas. O tipo de rodado, área de contato, dimensões, velocidade de deslocamento, número de vezes que trafega sobre o mesmo local e carga suportada pelo solo, são todos fatores que provocam maior ou menor compactação.

O uso intensivo de maquinário e implementos, principalmente em condições inadequadas de umidade, somados ao seu mau dimensionamento, juntamente com a ocorrência de fenômenos naturais como chuvas e ventos fortes, são responsáveis por cerca de 68 milhões de hectares de terras agrícolas do planeta em processo de degradação, ocasionada, principalmente, pela compactação.

Os efeitos da compactação do solo têm causado expressivas perdas econômicas. A aplicação de cargas dinâmicas por rodados e implementos agrícolas no solo produz tensões na interface solo/pneu e solo/implemento em superfície e profundidade. Os tratores agrícolas constituem-se, por sua mobilidade, em cargas de natureza temporária. Esta mobilidade se traduz pela transmissão ao solo de dois tipos de esforços: cargas de compressão vertical que são, em efeito, causadas pelo peso próprio das máquinas distribuído nos eixos, enquanto que os esforços de cisalhamento se originam dos esforços tangenciais desenvolvidos no deslocamento da máquina. O uso de implementos e máquinas agrícolas em condições de umidade pode agravar ainda mais a compactação do solo, por isso o teor de água no solo é um fator de grande influência no seu estado de compactação.

A excessiva compactação do solo é um fator relevante no processo produtivo agrícola, que pode apresentar prejuízos acentuados com a modernização dos implementos agrícolas, principalmente pela compactação

superficial causada pela pressão de insuflagem dos pneus e a subsuperficial ocasionada pela pressão, devido ao peso dos eixos.

A compactação do solo constitui um tema de crescente importância face ao aumento da mecanização nas atividades agrícolas. Sendo assim, é necessário que sejam desenvolvidas pesquisas sobre o efeito de maquinários agrícolas na compactação do solo e para quantificar o poder descompactante de determinadas culturas, comumente cultivadas no estado do Paraná. Há uma carência de estudos que possam determinar a compactação do solo em campo, que apresentem uma confiabilidade maior do que em laboratório, pela aproximação com a realidade.

A compactação induzida por uma placa durante um ensaio de campo não é um procedimento plenamente não-confinado, pois ela ocorre em condições parcialmente confinadas. O solo e suas paredes laterais na compactação feita no campo resistem à determinada pressão, subentende-se que a camada de solo sob a placa esteja confinada até o limite da resistência lateral dessa camada. Após esse limite, o solo cederá continuamente e não terá mais resistência lateral. Isso não ocorre em ensaio de laboratório, porque o solo ensaiado está confinado dentro de um recipiente metálico que cria uma determinada resistência lateral superior a resistência natural do solo no campo. Embora o uso do penetrômetro de placa apresente resultados que se aproximam da realidade do campo com maior confiabilidade, frente ao processo de compactação do solo, poucos trabalhos foram desenvolvidos.

A densidade do solo pode ser considerada com um indicador do estado de compactação do solo, pois quanto maior a densidade do solo, mais compactado ele está.

O objetivo deste trabalho é avaliar a compactação do solo sob tráfego do trator agrícola, com penetrômetro de placa e penetrômetro eletrônico de haste, e a densidade do solo, antes e após a semeadura das culturas de soja feijão e milho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Preparação do Solo por Meio do Plantio Direto

A prática da semeadura ou cultivo de plantas sem o preparo físico do solo, mantendo-se a palha da cultura anterior na superfície é denominada plantio direto (DERPSCH *et al.*, 1991). O plantio direto constitui o manejo de solo com maior potencial, pois atende ao objetivo da conservação do solo. Esse sistema está diretamente associado à manutenção da palhada, pela ausência do revolvimento do solo e a conseqüente deposição e manutenção de resíduos vegetais a cada safra (TORMENA & ROLOFF, 1996, GOEDERT, SCHERMACK & FREITAS, 2002). Desse modo, o solo consegue reter mais água favorecendo a germinação, desenvolvimento e maturação das plantas.

No Brasil, esse sistema desenvolveu-se a partir da década de 70, proporcionando uma inovação na conservação do solo, que tinha por base práticas mecânicas de controle da erosão, como cultivo em nível e terraceamento. Na década de 80, o uso dessa técnica intensificou-se no estado do Paraná, porém, foi na década de 90 que o sistema plantio direto aumentou significativamente (ELTZ, 1997, SILVA, REINERT & REICHERT, 2000).

Com aumento no consumo de alimentos e o decorrente aumento da produção, os solos sofreram esgotamento e empobrecimento por serem explorados de maneira inadequada, surgindo então o sistema plantio direto que promove a recuperação das áreas degradadas do solo e mantém a cultura economicamente integrada no sistema agrícola de produção (FURLANI, LOPES & SILVA, 2005). MASCHIO (2005) afirmou que 22 milhões de hectares, dos 42,5 milhões de hectares destinados à produção de grãos no Brasil, utilizam o sistema de plantio direto. Conforme dados da Federação Brasileira

do Plantio Direto o mesmo sistema, ocupava, na safra 2003/2004, no estado do Paraná uma área cultivada de 135,7 mil hectares.

## 2.2 Compactação do Solo

Para se alcançar uma agricultura sustentável é cada vez mais importante que sejam desenvolvidos estudos sobre a produtividade agrícola, incluindo a conservação dos solos, assim como o impacto causado pelo uso intensivo do maquinário agrícola no seu manejo.

As causas da compactação do solo estão relacionadas a diversos fatores, desde a ocorrência de fenômenos naturais, como chuvas e/ou ventos fortes até o mau dimensionamento de máquinas e implementos agrícolas e ao tráfego excessivo do maquinário durante as atividades de desenvolvimento das plantas. Essa ocupação desordenada do solo pode gerar uma rápida e contínua degradação (SOANE & VAN OUWERKERK, 1994, DAWIDOWSKI, MORRISON JUNIOR & SNIEG, 2001, PRADO, ROQUE & SOUZA, 2002).

Quando o manejo do solo é realizado em condições inadequadas, com operações agrícolas fora da faixa de friabilidade e, ainda, o uso excessivo de máquinas e/ou implementos mais pesados, podem ocasionar mudanças na estrutura do solo e causar problemas sérios de compactação, levando à perda da sustentabilidade e à redução do rendimento agrícola (BONINI, 2006).

Segundo HORN & LEBERT (1991), CARPENEDO (1994) e SILVA, REINERT & REICHERT (2000), a estimativa é de que as pressões médias aplicadas aos solos pelas máquinas agrícolas situam-se entre 50 e 300 kPa. Os reboques e caminhões podem exercer pressões entre 300 e 600 kPa segundo OLIVEIRA *et al.* (2002).

Dentre as limitações que ocasionam um crescimento deficiente do sistema radicular das plantas cultivadas, está a compactação do solo que causa restrição ao crescimento e desenvolvimento radicular, acarretando uma

série de problemas que afetam direta ou indiretamente a produção das plantas (ALVARENGA *et al.*, 1996, PEDROTTI, VAHL & PAULETTO, 1998).

Em relação à influência da compactação do solo no rendimento dos grãos são encontrados, na literatura, resultados conflitantes. SOANE (1985) resumiu essa situação afirmando que, para cada cultura, solo e estação climática há um nível de compactação ótimo, para uma maior produtividade. OHU e FOLORUNSO (1989) corroboram esta afirmação por meio de um experimento com níveis de compactação (obtido por passadas de trator) e rendimento de grãos de sorgo, em que, com poucas passadas de trator, portanto com compactação leve, obtiveram melhores “rendimentos” do que no solo sem compactação. Os mesmos autores, porém, encontraram rendimentos decrescentes com o aumento do número de passadas do trator. SCHAFER *et al.* (1990) ressaltaram que o grau de compactação ótimo é, muitas vezes, uma solução que deve ser bem avaliada para cada situação, uma vez que os requerimentos de solo para tração e mobilidade são muito diferentes daqueles para infiltração de água e propagação de raízes.

SECCO *et al.* (2004), estudando o rendimento da soja em Latossolo Vermelho distroférico, verificaram menores valores de densidade do solo, porosidade e resistência do solo à penetração na profundidade de 0,0 - 0,10 m, o rendimento de grãos dos cultivares de soja não sofreu decréscimo com o aumento da compactação e o tratamento de escarificação também não influenciou o rendimento de grãos.

BEUTLER & CENTURION (2004), avaliando o rendimento da soja em Latossolo Vermelho textura média na safra 2002/2003, encontraram que, quando ocorreu decréscimo de 18% na densidade radicular e 0,85 MPa na resistência do solo na camada de 0,05 - 0,15 m, ocorreu também a redução da produção de grãos de soja.

BONINI (2006) concluiu que os valores mais elevados de resistência à penetração do solo (2,50 a 3,00 MPa) ocorreram na camada de 0,07 a 0,12 m, porém esses valores não foram suficientes para alterar a população inicial da soja, mas a do milho foi reduzida.

A resistência do solo à penetração é diretamente alterada quando há um incremento na densidade do solo e uma redução do volume de

macroporos, influenciando a penetração do sistema radicular pelo perfil do solo. Além disso, essa propriedade está diretamente relacionada com a textura do solo e inversamente com a umidade do solo.

As camadas superficialmente compactadas podem ser fatores limitantes ao desenvolvimento radicular, pois comprometem a capacidade do solo de absorver água. Dessa forma, podem influenciar o desenvolvimento vegetativo das plantas, com conseqüente redução da área foliar, emergência de plantas, desenvolvimento e rendimento de grãos (BONINI, 2006).

A compactação do solo é determinada pela pressão de pré-compactação, por meio das curvas de compressão do solo (HOLTZ & KOVACS, 1981, KONDO & DIAS JUNIOR, 1999), obtidas em ensaios de compressão uniaxial que, para serem determinadas, necessitam equipamentos sofisticados, como: o penetrômetro, o perfilômetro, o oedômetro e o penetrógrafo. A agricultura intensiva e o intenso tráfego de máquinas visam alcançar benefícios econômicos em curto prazo, sem preocupação com a conservação do solo. O problema da compactação vem aparecendo em extensas áreas do país, com efeitos comprometedores à produtividade agrícola (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

O entendimento da compactação do solo é importante, pois ela pode causar uma redução da absorção de nutrientes pelo solo, e/ou redução de sua absorção pelas plantas, dificultando a infiltração e redistribuição de água e as trocas gasosas e, ainda, aumentar a resistência mecânica dos solos e restringir o crescimento radicular (LAFOND, ANGERS & LAVERDIERE, 1992), com conseqüente redução na produtividade das culturas e aumento da erosão hídrica (UNGER, 1996, VAN DEN AKKER, 1997).

### **2.3 Resistência Mecânica do Solo à Penetração**

A resistência do solo à inserção de um penetrômetro é considerada como um método secundário na avaliação da compactação. O uso do

penetrômetro é uma maneira rápida e fácil de medir a resistência à penetração a várias profundidades, e o aparelho é muito utilizado para relacionar fatores de resistência do solo à elongação radicular (BLACK, 1965, WHITELEY, UTOMO, & DEXTER, 1981).

O princípio do penetrômetro é baseado na resistência do solo à penetração de uma haste, após recebimento de um impacto provocado pelo deslocamento vertical de um bloco de ferro colocado na parte superior da haste, por uma distância conhecida, geralmente 40 cm. Quando o aparelho atinge zonas compactadas, maior é o número de impactos necessário para que a haste desça um comprimento conhecido. Isto acontece em resposta imediata à maior resistência do solo à penetração.

A resistência mecânica do solo à penetração ou resistência à penetração do solo – RSP é uma propriedade física relativamente fácil de ser obtida e, de certa forma, de ser correlacionada à densidade e à macroporosidade. Para um mesmo solo, quanto maior for a densidade, maior será a resistência à penetração e menor será a sua macroporosidade, que é o principal espaço para o crescimento das raízes. Deve ser considerado, no entanto, que a resistência do solo é mais afetada pela variação dos teores de água no solo, no momento das amostragens, do que pela densidade. Por essa razão, muitos trabalhos que objetivam caracterizar o efeito da compactação sobre o desenvolvimento radicular e produtividade das culturas, utilizam a densidade do solo como parâmetro de referência, tendo em vista que, quanto maior for a densidade do solo maior será seu estado de compactação (TORRES & SARAIVA, 1999).

Segundo SHAFIQ, HASSAN & ARMAD (1994), a compactação do solo altera a sua capacidade de retenção de água, diminuindo a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica, aumentando a resistência à penetração. TORMENA & ROLOFF (1996) verificaram que a resistência mecânica à penetração é uma das características do solo que melhor representa as condições de desenvolvimento das raízes das plantas.

Segundo KONCHHANN, DENARDIN & BERTON (2000), para determinar a camada compactada utiliza-se o penetrógrafo, que é um



instrumento destinado à quantificação da resistência mecânica do solo à penetração, ao longo do perfil do solo.

A compactação do solo pode ser caracterizada pela resistência do solo à penetração, que pode ser diretamente relacionada ao crescimento radicular das culturas (BEUTLER *et al.*, 2002). Essa compactação diminui o número de poros grandes e, dessa maneira, para que as raízes consigam penetrar, tendem a exercer uma força para deslocar as partículas do solo. O aumento do estado de compactação do solo resulta em aumento da resistência à penetração das raízes.

## **2.4 Resistência do Solo à Pressão da Placa**

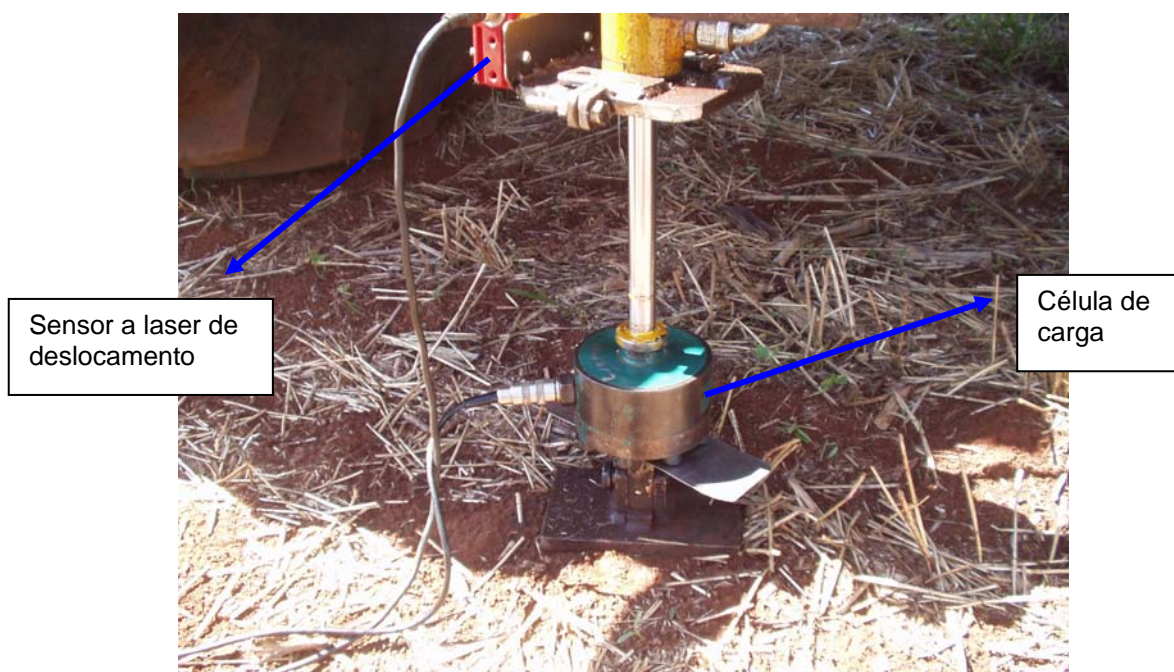
O penetrômetro de placa permite ao usuário determinar, em campo, a pré-compactação do solo, permitindo ao produtor selecionar com segurança as características de pneus agrícolas em diferentes condições de solo, cargas dinâmicas e pressão de insuflagem (BREDA, 2003).

Segundo ALEXANDROU & EARL (1995), um ensaio de compressão com placa consiste de uma placa em contato com o solo, sobre o qual uma força conhecida é aplicada e de um mecanismo para monitorar os resultados da deformação apresentada.

Para DAWIDOWSKI, MORRISON JUNIOR & SNIEG (2001), a resistência do solo à placa é medida em termos de pressão máxima que pode ser aplicada antes da ocorrência de um substancial aumento na compressão do solo. Essa resistência na camada do solo é chamada, de acordo com estes pesquisadores, de valor de pressão de pré-consolidação. Quando as forças externas excedem à resistência interna do solo, a sua textura é deformada para atingir novo equilíbrio. Quando o solo é trabalhado com cargas menores que a carga de pré-consolidação, a deformação é pequena, elástica e reversível, mas se a pressão excede à carga de pré-consolidação, ocorre uma deformação plástica e irreversível, logo, é necessário determinar a resistência interna do

solo para prever danos à sua estrutura que podem ser provocados pelo tráfego de máquinas (HORN & LEBERT, 1991).

O penetrômetro desenvolvido por BREDA (2003), visualizado na Figura 1, conta com um sensor de deslocamento responsável pela leitura da deformação do solo e, de uma célula de carga, capaz de informar a carga aplicada no solo. Ambos os sensores estão ligados a um sistema de aquisição de dados: *Datalogger*, programado para efetuar leituras a taxa de quatro leituras por segundo. Os dados obtidos são transferidos a um microcomputador por meio de uma interface serial e com o auxílio do *software* apropriado.



**Figura 1** - Penetrômetro de placa.

O *software* *spress* (LAMB *et al.*, 2006) permite ao usuário verificar a eficiência do penetrômetro de placa na determinação da compactação do solo pela interpretação dos dados coletados por ele, por meio da pressão de pré-consolidação. O *software* faz cada ponto corresponder a um ciclo, para isso ele utiliza a diferença entre a máxima e a mínima pressão, que fica acumulada para o próximo ciclo. As curvas de compressão virgem e secundária são constituídas a partir da análise usando o método de mínimos quadrados (LAMB *et al.*, 2006).

### 2.4.1 Pressão de Pré-Consolidação

A pressão de pré-consolidação é obtida da curva de compressão do solo, utilizando-se o método proposto por CASAGRANDE (1936), que é basicamente gráfico ou utilizando o método proposto por DIAS JUNIOR & PIERCE (1995) que faz uso de uma planilha eletrônica elaborada a partir de planilhas eletrônicas.

O termo compressibilidade indica a resistência do solo ao decréscimo de volume quando submetido a uma carga mecânica e é definido como a facilidade com que o solo diminui o volume quando uma determinada pressão é aplicada (HORN & LEBERT, 1991). Esta propriedade é uma das maneiras utilizadas para avaliar a compactação do solo.

Pesquisas sobre a compressibilidade têm surgido com o intuito de avaliar de forma detalhada o processo de compressão do solo (IMHOFF, 2002), desta forma, a compressibilidade é a expressão quantitativa da resposta do solo à compactação.

O índice de compressão refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume do solo quando alguma pressão externa é aplicada, e a pressão de pré-consolidação é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (HORN & LEBERT, 1991, DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996).

OLIVEIRA *et al.* (2002), estudando o comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho argiloso da região do cerrado, submetido a diferentes sistemas de uso ou manejo e diferentes tensões de água no solo, verificaram que na camada de 0,00 a 0,05 m de profundidade, os índices de compressão não diferiram, independentemente da tensão de água no solo (faixa de tensão de 6 e 1.500 kPa). Na reta de compressão do solo virgem, a variação da densidade do solo foi a mesma para qualquer tensão de água no solo. No entanto, os valores da densidade do solo final foram maiores à medida que aumentou o conteúdo de água no solo. Estes resultados revelam uma tendência à maior deformação do solo sob cerrado para conteúdo de água

mais elevado, o que está relacionado com sua menor densidade e com o maior espaço poroso disponível à deformação.

DIAS JUNIOR & MIRANDA (2000) observaram que, independentemente da classe de solo, à medida que a umidade gravimétrica aumenta a densidade do solo também aumenta até atingir um valor máximo e, a seguir, diminui, devido à baixa compressibilidade da água. No ponto de máximo, ou seja, no vértice da parábola, obtiveram, em sua pesquisa, o valor da densidade máxima do solo e da umidade ótima de compactação.

Segundo LARSON & GUPTA (1980), com a aplicação de pressões maiores do que a pressão de pré-consolidação observa-se que alterações significativas ocorreram na estrutura do solo, evidenciadas pelas mudanças significativas dos valores de densidade do solo. Este fato pode ser explicado pelo aumento do número de contatos entre cada agregado com o aumento da pressão aplicada, até que os agregados se rompem e o solo adquira uma estrutura maciça.

A modelagem tem apresentado grande potencialidade para o entendimento do processo de compressão dos solos. DIAS JUNIOR & PIERCE (1995) desenvolveram um modelo não linear que permite determinar a pressão máxima que o solo pode suportar sem sofrer compactação adicional, baseando-se nos teores de umidade de solos de regiões temperadas. No Brasil, KONDO (1998), utilizando o modelo desenvolvido por DIAS JUNIOR e PIERCE (1995), em Latossolos da região de Lavras - MG, demonstrou que a compressibilidade do solo é influenciada pelo sistema de manejo.

Em estudos da capacidade de suporte ou compressibilidade do solo, DIAS JUNIOR (1994) sugerem a utilização de modelos de compressibilidade com base na pressão de pré-consolidação, que predizem a máxima pressão que um solo pode suportar a diferentes umidades, sem causar compactação adicional, fornecendo, portanto, informações para a prevenção da compactação. Os estudos demonstram que, quando ensaios de compressão uniaxial são realizados em solos que não sofreram pressão prévia ou secagem e umedecimento, a relação entre a pressão aplicada e a densidade do solo é linear, e qualquer pressão aplicada provocará deformações ou não (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996).

Entretanto, quando os ensaios são realizados em solos que já tenham uma história de manejo, as deformações resultantes poderão ser recuperáveis ou não recuperáveis (HORN & LEBERT, 1991; DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996). É na região da curva de compressão secundária que o solo deve ser cultivado ou trafegado, para que não ocorra compactação adicional, pois é este o componente da curva de compressão que reflete a história do manejo do solo (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996).

## **2.5 Densidade do Solo**

A densidade do solo – DS corresponde à massa de solo por unidade de volume aparente, ou seja, o volume do solo ao natural, incluindo os espaços ocupados pelo ar e água (PREVEDELLO, 1996). É uma relação entre a massa de sólidos e o volume e pode ser usada como medida direta do estado de compactação de um solo (SECCO, 2003). Quanto maior for a densidade do solo, tanto mais compactado ele é, restringindo o crescimento e desenvolvimento das plantas (PRIMAVESI, 1990). De acordo com LOWERY & SCHULER (1994), ALAKUKU & ELOMEN (1995) e BALL *et al.* (1997), a densidade do solo é significativamente elevada após o tráfego de máquinas agrícolas.

## **2.6 Teor de Água no Solo**

Um fator influente na determinação da compactação do solo é a umidade ou teor de água no solo - UMID que ele apresenta. O teor de água do solo, no momento em que ocorre a pressão, é um fator determinante da intensidade de compactação. Para ASHBURNER & SIMS (1984), se um solo

estiver com baixo teor de água, apresentará elevada resistência proporcionando pouca deformação antes que ocorram modificações na sua estrutura. No estado friável, a deformação é proporcional à carga aplicada e revertida rapidamente quando o carregamento é removido, porém quando o solo apresenta elevado teor de água, estado plástico, ele se deforma lentamente em função da carga aplicada não havendo reversão quando esta é removida. Quando os solos estão mais secos a capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para agüentar as pressões aplicadas, tornado a compactação do solo não significativa. Entretanto, em condições de alta umidade, o solo se deforma mais facilmente, ocorrendo a formação de camadas compactadas (SWAN; MONCRIEF & VOOHEES, 1987).

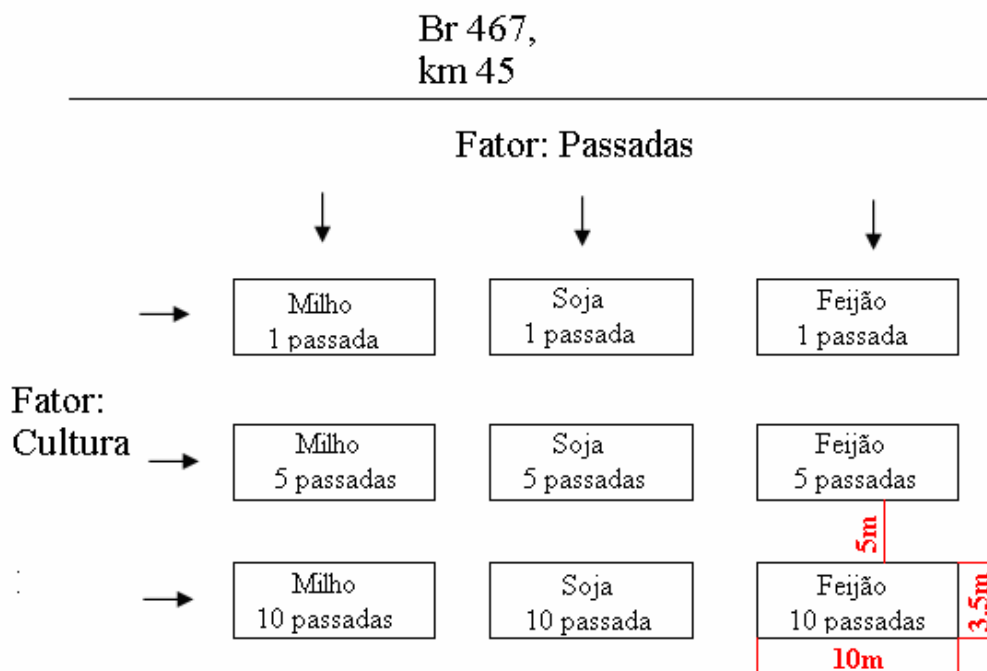
O conteúdo de água presente no solo pode ser determinado pela diferença de peso da amostra do solo úmido e do peso da amostra seca em estufa a 105°C por 24 horas, conforme proposto por EMBRAPA (1997).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Área Experimental**

O experimento foi realizado no segundo semestre de 2006 e primeiro semestre de 2007, no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola - NEEA, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, localizado na BR 467, km 45, Cascavel - PR, geograficamente situado nas coordenadas 24°48' de latitude sul e 53°26' de longitude oeste com altitude média de 760 metros. O solo local é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (EMBRAPA, 1999). A área de estudo estava sendo cultivada com o sistema de plantio direto, principalmente com as culturas de aveia ou trigo no inverno e milho ou soja no verão.

A área foi dividida ao acaso em nove parcelas, cada uma com 10 m de comprimento por 3,5 m de largura, totalizando 35 m<sup>2</sup> de área útil para cada parcela. O espaçamento entre elas foi de 5 m. Na Figura 2 é apresentado o croqui da área experimental, mostrando a distribuição das parcelas, de acordo com o número de passadas do rodado do trator, e as culturas analisadas, sendo que a distribuição dos níveis foi realizada de forma aleatória por fatores na horizontal e vertical.



**Figura 2 -** Croqui da área experimental.

O esquema utilizado é conveniente para facilitar as operações físicas no experimento de campo, em que é necessário testar ambos os fatores em área relativamente ampla. Não há uma prioridade de um fator sobre outro, na casualização.

### 3.2 Delineamento do Experimento

A análise estatística foi realizada em três fases:

- Primeira fase: antes das passadas e plantio utilizou-se a estatística descritiva e teste de homogeneidade das áreas;
- Segunda fase: durante o plantio realizou-se um delineamento em blocos inteiramente casualizado com repetições (DBC) para verificar os efeitos das passadas;
- Terceira Fase: após o delineamento em faixas, estudaram-se as passadas e as culturas.



Considerando dois fatores com três níveis por fator, num total de nove tratamentos, em que o primeiro fator a ser analisado foi em relação ao número de passadas com o rodado do trator, totalizando três níveis, uma, cinco e dez passadas, por caracterizarem níveis semelhantes ao da prática agrícola. O segundo fator analisado foi a cultura, com três espécies: milho, soja e feijão, todas de grande importância para a região. A combinação dos níveis dos fatores originou nove tratamentos.

Os nove tratamentos são:

- T1: uma passada do rodado do trator para a cultura de milho;
- T2: uma passada do rodado do trator para a cultura de soja;
- T3: uma passada do rodado do trator para a cultura de feijão;
- T4: cinco passadas do rodado do trator para a cultura de milho;
- T5: cinco passadas do rodado do trator para a cultura de soja;
- T6: cinco passadas do rodado do trator para a cultura de feijão;
- T7: dez passadas do rodado do trator para a cultura de milho;
- T8: dez passadas do rodado do trator para a cultura de soja;
- T9: dez passadas do rodado do trator para a cultura de feijão.

No estudo da compactação do solo medida pela resistência mecânica do solo à penetração, por meio do penetrômetro de haste foram realizadas cinco repetições por tratamento ( $r = 5$ ), totalizando 45 ensaios.

No estudo da compactação do solo determinada por meio do penetrômetro de placa foram realizadas quatro repetições por tratamento ( $r = 4$ ), totalizando 36 ensaios.

Para a determinação da densidade e teor de água do solo foram coletadas quatro amostras de cada tratamento ( $r = 4$ ), totalizando 36 ensaios.

O modelo estatístico para cada variável resposta em estudo é definido na equação 1.

$$Y_{ijk} = M + A_i + E_{1i} + B_j + E_{2j} + AB_{ij} + E_{3ijk} \quad (1)$$

Em que:

$Y_{ijk}$ : valor da variável resposta de interesse;

$A_i$ : efeito do nível  $i$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) do Fator A (numero de passadas com o rodado do trator);

$B_j$ : efeito do nível  $j$ , ( $j = 1, 2, 3$ ) do Fator B (espécies);

$AB_{ij}$ : interação dos níveis  $i, j$  do número de passadas e espécie;

$E_{1i}$ : erro de sorteio de níveis  $i$  do Fator A;

$E_{2j}$ : erro de sorteio de níveis  $j$  do Fator B.

$E_{3ijk}$ : erro aleatório do experimento,  $i, j, k$ , para  $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3, k = 1, 2, 3$ .

Supondo que os erros aleatórios  $E_1, E_2$  e  $E_3$  são independentes entre si, tendo distribuição normal de probabilidades com médias zeros e variâncias constantes  $\sigma_1^2, \sigma_2^2$  e  $\sigma_3^2$ , respectivamente.

A análise estatística foi baseada na Análise de Variância e posterior comparação de médias, utilizando-se o teste de Tukey, a 5% de significância. As análises foram realizadas com o auxílio do programa computacional SISVAR.

### 3.3 Desenvolvimento e Coleta dos Dados

O experimento foi instalado em 29 de novembro de 2006 e teve início com a demarcação ao acaso das parcelas experimentais. Nos dias 4, 5 e 6 de dezembro teve início a coleta dos dados, determinando-se a RSP (MPa) com o uso do penetrômetro eletrônico de haste desenvolvido por TIEPPO (2004). Os dados foram armazenados e registrados por um sistema de aquisição de dados tipo *Datalogger*. O índice de cone foi obtido, de acordo com a norma S313.3 (ASAE, 1999), utilizando-se cone de diâmetro de 12,83 mm e ângulo de 30°. Foram realizadas cinco repetições por tratamento, sendo as amostragens realizadas até 0,40 m de profundidade, e que foram analisadas posteriormente em oito camadas de: 0 - 0,05 m, 0,05 - 0,10 m, 0,10 - 0,15 m, 0,15 - 0,20 m, 0,20 - 0,25 m, 0,25 - 0,30 m, 0,30 - 0,35 m e 0,35 a 0,40 m de profundidade, conforme TIEPPO (2004), em testes realizados para validação do

equipamento. Na Figura 3 é apresentada a utilização do penetrômetro eletrônico de haste.



**Figura 3** - Penetrômetro eletrônico de haste.

A resistência mecânica do solo à pressão da placa – RSP (kPa) foi medida por meio do penetrômetro de placa desenvolvido por BREDA (2003) e a placa utilizada foi de 135 cm<sup>2</sup>, foram coletadas quatro amostras por tratamento (r = 4) totalizando assim 36 ensaios. Durante os ensaios de compactação, uma carga inicial foi exercida por, aproximadamente, trinta segundos sobre o solo. Após esse período tem-se o recolhimento do pistão e o solo permaneceu, por sessenta segundos, relaxando, em seguida, aumentou-se a carga aplicada, até a capacidade máxima de força do cilindro de 400 KN. As pressões exercidas variaram em média de 0 a 400 kPa, por representarem pressões exercidas por máquinas em operações agrícolas. De acordo com a pressão aplicada no solo, a placa penetrará à determinada profundidade e, quanto maior a compactação do solo, maior será a resistência que o solo apresentará à placa e menor será a profundidade de penetração.

Na Figura 4 é apresentado o penetrômetro de placa acoplado ao trator agrícola. Os dados do penetrômetro de placa, armazenados em campo pelo *Datalogger*, foram interpretados com o auxílio do *software spress* desenvolvido

por LAMB *et al.* (2006), que utiliza elementos finitos para filtragem dos dados (DAWIDOWSKI & KOOLEN, 1994), e foi possível atingir os pontos críticos segundo a metodologia gráfica de CASAGRANDE (1936).



**Figura 4** - Penetrômetro de placa acoplado a um trator agrícola.

A unidade de medida da resistência do solo à penetração é determinada em MPa e tem como objetivo avaliar a resistência que as raízes têm para penetrar no solo em uma profundidade de até 0,40 m (física do solo), e resistência do solo à placa em kPa, para avaliar a capacidade de suporte do solo (mecânica do solo). Sendo assim, as unidades de medidas da pressão de ambas serão em Pa, porém com grandezas diferentes: a resistência à penetração em MPa e a resistência à placa em kPa, pois como para cada equipamento há um instrumento de medição com uma área de contato diferente, ou seja, a haste tem um cone com diâmetro de 12,83 mm e a placa tem uma área de 135 cm<sup>2</sup>, sendo assim a pressão necessária para determinar a capacidade de suporte do solo por meio da placa será maior do que a pressão necessária para determinar a resistência do solo à penetração.

A densidade do solo – DS (Mg.m<sup>-3</sup>) foi avaliada pela coleta de amostras de solo indeformadas, pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). As amostras foram coletadas na camada de 0 a 0,10 m, com quatro repetições por

tratamento, totalizando 36 ensaios. Essas amostras possibilitaram ainda a determinação do teor de água no solo - UMID (%), de acordo com o proposto por EMBRAPA (1997).

No dia 8 de dezembro foram realizadas as passadas com o rodado do trator agrícola no solo. O trator utilizado para o processo de compactação do solo foi da marca<sup>1</sup> Ford, Série 7630 com tração dianteira auxiliar, potência 75,8 kW (103 cv) no motor a 2100 rpm e massa de 6196 kg com lastragem máxima. O rodado do trator passou em linhas lado a lado atingindo toda a área da parcela. Posterior a isso, nos dias 9, 10 e 11 de dezembro coletaram-se novamente os dados de resistência do solo à penetração, resistência do solo à placa, densidade e teor de água no solo.

As semeaduras ocorreram nos dias 11 e 12 de dezembro de 2006, por meio de uma semeadora-adubadora de precisão, marca Vence Tudo, modelo SMT 6414, com quatro linhas para deposição de fertilizantes, com sistema de abertura de sulco do tipo haste sulcador e discos duplos com mecanismo de distribuição de sementes. As quatro linhas da semeadora foram espaçadas de 0,70 m uma da outra, para a cultura de milho, 0,35 m para as semeaduras de feijão e soja. Utilizou-se o milho híbrido CSM/PR, a soja a cultivar COODETEC 202 e a variedade do feijão Carioca IAPAR-81.

O controle das plantas invasoras foi realizado quinzenalmente, usando apenas enxada e foice. No dia 7 de fevereiro de 2007 foi aplicado herbicida nas culturas de soja e feijão.

A colheita do feijão foi realizada no dia 7 de março de 2007, 58 dias após a semeadura, a colheita foi manual, arrancando as plantas e transportando-as até um terreiro para a secagem. Depois de três dias, foi realizada a trilhagem do feijão, separando-se as sementes das vagens.

A colheita do milho ocorreu no dia 9 de abril de 2007, e as espigas foram arrancadas manualmente. Em seguida, foi realizada a trilhagem separando-se as sementes das espigas. A soja também foi colhida manualmente em 9 de abril.

---

<sup>1</sup> As marcas e modelos de equipamentos e produtos citados neste trabalho não constituem recomendação comercial por parte da pesquisadora, somente a descrição necessária do material utilizado neste trabalho.

Após a colheita das culturas, os dados de resistência do solo à penetração, resistência do solo à placa, densidade e teor de água no solo, foram novamente coletados, o que ocorreu nos dias 10 e 11 de março de 2007 para a cultura de feijão, e nos dias 11, 12 e 13 de abril de 2007 para as culturas de soja e milho. Essa coleta de dados obedeceu aos mesmos parâmetros seguidos anteriormente.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Antes das Passadas com o Rodado do Trator Agrícola - RSP, RSPP, DS e UMID**

Antes das passadas com o rodado do trator agrícola a análise estatística foi feita em blocos inteiramente casualizados. As nove parcelas foram divididas em três blocos, sendo os blocos dispostos da seguinte maneira: Bloco 1 (B1) parcelas: A1, A6 e A7; Bloco 2 (B2) parcelas: A2, A5 e A8; e Bloco 3 (B3) parcelas: A3, A4 e A9. Posteriormente, as parcelas A1, A2 e A3 receberam uma passada com o rodado do trator agrícola; as parcelas A4, A5 e A6 receberam cinco passadas com o rodado do trator agrícola e as parcelas A7, A8 e A9 receberam dez passadas com o rodado do trator agrícola.

Nas tabelas 1, 2 e 3, nas quais são apresentados os resultados dos testes de homogeneidade das variáveis em estudo, com base nos dados apresentados no anexo A, com análise estatística descritiva completa, antes das passadas do rodado do trator agrícola nos três blocos (B1, B2 e B3), pode-se verificar que há homogeneidade entre as parcelas nas variáveis: resistência do solo à penetração - RSP em todas as camadas; resistência do solo à placa - RSPP, densidade - DS e teor de água - UMID.

**Tabela 1 -** Teste de homogeneidade das variâncias dentro do Bloco 1, antes das passadas com o rodado do trator agrícola

VARIÁVEIS	Parcela A1 variância	Parcela A6 variância	Parcela A7 variância	Variância máxima	Variância mínima	Estatística H <sub>c</sub>	Ponto crítico H	Decisão
RSP 0 - 0,05	0,137	0,086	0,239	0,239	0,086	2,792	41,1	Ns
RSP 0,05 - 0,10	0,098	0,059	0,345	0,345	0,059	5,797	41,1	Ns
RSP 0,10 - 0,15	0,094	0,225	0,407	0,407	0,094	4,333	41,1	Ns
RSP 0,15 - 0,20	0,171	0,026	0,247	0,247	0,026	9,328	41,1	Ns
RSP 0,20 - 0,25	0,053	0,031	0,287	0,287	0,031	9,211	41,1	Ns
RSP 0,25 - 0,30	0,061	0,143	0,543	0,543	0,061	8,911	41,1	Ns
RSP 0,30 - 0,35	0,015	0,067	0,305	0,305	0,015	20,294	41,1	Ns
RSP 0,35 - 0,40	0,035	0,017	0,138	0,138	0,017	7,892	41,1	Ns
RSPP	2764,667	2182,250	2114,917	2764,667	2114,917	1,307	93,9	Ns
DS	0,001	0,002	0,000	0,002	0,000	9,684	93,9	Ns
UMID	1,139	29,603	3,024	29,603	1,139	26,000	93,9	Ns

Nota: HC: Variância máxima/ variância mínima; H: Ponto crítico a 5% de significância. Ns: Não existem diferenças significativas entre as variâncias, a 5% de probabilidades.

**Tabela 2 -** Teste de homogeneidade das variâncias dentro do Bloco 2, antes das passadas com o rodado do trator agrícola

VARIÁVEIS	Parcela A2 variância	Parcela A5 variância	Parcela A8 variância	Variância máxima	Variância mínima	Estatística H <sub>c</sub>	Ponto crítico H	Decisão
RSP 0 - 0,05	0,067	0,011	0,284	0,284	0,011	26,244	41,1	Ns
RSP 0,05 - 0,10	0,101	0,079	0,163	0,163	0,079	2,072	41,1	Ns
RSP 0,10 - 0,15	0,199	0,126	0,113	0,199	0,113	1,762	41,1	Ns
RSP 0,15 - 0,20	0,348	0,357	0,092	0,357	0,092	3,874	41,1	Ns
RSP 0,20 - 0,25	0,482	0,333	0,037	0,482	0,037	12,987	41,1	Ns
RSP 0,25 - 0,30	0,276	0,275	0,036	0,276	0,036	7,674	41,1	Ns
RSP 0,30 - 0,35	0,141	0,241	0,166	0,241	0,141	1,707	41,1	Ns
RSP 0,35 - 0,40	0,145	0,013	0,028	0,145	0,013	11,397	41,1	Ns
RSPP	3700,333	195,667	2835,000	3700,333	195,667	18,911	93,9	Ns
DES	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	2,417	93,9	Ns
UMID	4,188	0,206	1,776	4,188	0,206	20,300	93,9	Ns

Nota: HC: Variância máxima/ variância mínima; H: Ponto crítico a 5% de significância. Ns: Não existem diferenças significativas entre as variâncias, a 5% de probabilidades.



**Tabela 3 -** Teste de homogeneidade das variâncias dentro do Bloco 3, antes das passadas com o rodado do trator agrícola

VARIÁVEIS	Parcela	Parcela	Parcela	Variância máxima	Variância mínima	Estatística H <sub>c</sub>	Ponto crítico	Decisão
	A3	A4	A9				H	
	variância	variância	variância					
RSP 0 - 0,05	0,099	0,071	0,342	0,342	0,071	4,818	41,1	Ns
RSP 0,05 - 0,10	0,017	0,301	0,095	0,301	0,017	18,135	41,1	Ns
RSP 0,10 - 0,15	0,180	0,143	0,146	0,180	0,143	1,262	41,1	Ns
RSP 0,15 - 0,20	0,081	0,128	0,181	0,181	0,081	2,236	41,1	Ns
RSP 0,20 - 0,25	0,058	0,027	0,122	0,122	0,027	4,469	41,1	Ns
RSP 0,25 - 0,30	0,034	0,018	0,086	0,086	0,018	4,863	41,1	Ns
RSP 0,30 - 0,35	0,042	0,125	0,155	0,155	0,042	3,706	41,1	Ns
RSP 0,35 - 0,40	0,201	0,303	0,380	0,380	0,201	1,895	41,1	Ns
RSPP	1976,917	2322,917	340,917	2322,917	340,917	6,814	93,9	Ns
DS	0,000	0,002	0,001	0,002	0,000	9,333	93,9	Ns
UMID	5,685	0,277	2,307	5,685	0,277	20,489	93,9	Ns

Nota: HC: Variância máxima/ variância mínima; H: Ponto crítico a 5% de significância. Ns: Não existem diferenças significativas entre as variâncias, a 5% de probabilidades.

## 4.2 Depois das Passadas com o Rodado do Trator Agrícola - RSP, RSPP, DS e UMID

### 4.2.1 Resistência do Solo à Penetração (RSP) Depois das Passadas com o Trator Agrícola

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise da variância para a variável da resistência do solo à penetração na camada de 0 a 0,05 m de profundidade para os tratamentos (passadas) analisados, depois das passadas com o trator agrícola. A ANOVA indica que o número de passadas apresentou efeito significativo, a 5% de probabilidade.

**Tabela 4 -** Análise de variância para RSP (MPa) na camada de 0 a 0,05 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F <sub>0</sub>	P[F>F <sub>c</sub> ]
Passada	02	1,807	0,903	6,866	0,0030*
Bloco	02	0,928	0,464	3,527	
Passada*Bloco	04	0,611	0,153	1,161	0,3440 ns
Erro	36	4,736	0,132		
Total corrigido	44	8,082			
CV (%) =	27,31				
Média geral:	1,328	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >F<sub>c</sub>]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Sendo a resistência do solo à penetração um indicativo do estado de compactação do solo, pode-se observar na Tabela 5 que apresenta as comparações médias, submetidas ao teste de Tukey, que as compactações de médias com uma passada (P1) e com cinco passadas (P5) são estatisticamente iguais, a 5% de probabilidades.

**Tabela 5 -** Comparação de médias da RSP na camada de 0 a 0,05 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada

BLOCO/PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
B1	1,1469	1,4320	2,0068	1,5286
B2	1,0849	1,1015	1,4139	1,2001
B3	1,1976	1,1697	1,3985	1,2553
Média	1,1432 a	1,2344 a	1,6064 b	

Nota: Para os valores obtidos, letras minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

Na Tabela 6 apresenta-se o resultado da análise da variância para a variável da resistência do solo à penetração na camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola. A ANOVA indica que o número de passadas apresentou efeito significativo, a 5% de probabilidade.

**Tabela 6** - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F <sub>0</sub>	P[F>F <sub>c</sub> ]
Passada	02	2,371	1,185	8,055	0,0013*
Bloco	02	0,560	0,280	1,902	
Passada*Bloco	04	1,345	0,336	2,285	0,0791ns
Erro	36	5,298	0,147		
Total corrigido	44	9,575			
CV (%) =	22,81				
Média geral:	1,6822	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >F<sub>c</sub>]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Na Tabela 7 são apresentadas as médias da resistência do solo à penetração na camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade, submetidas ao teste de Tukey. Verifica-se que a compactação do solo com cinco passadas (P5) é estatisticamente igual à compactação do solo com uma e com dez passadas do rodado do trator agrícola (P1 e P10), a 5% de significância.

No teste de comparação de médias de Tukey, apresentado na Tabela 7, observa-se que na camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade a RSP média aumentou conforme se aumentou o número de passadas do rodado do trator agrícola, corroborando MACHADO *et al.* (2005) que concluiu que o efeito do carregamento que o solo sofre pela passagem do pneu do trator é mais acentuado a partir das camadas de 0,05 a 0,10 m de profundidade, pois neste local começam a ocorrer as maiores alterações de resistência do solo, causadas pelo tráfego agrícola.

**Tabela 7** - Comparação de médias da RSP na camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada

BLOCO/PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
B1	1,2681	2,0342	2,2160	1,8395
B2	1,5523	1,3561	1,9357	1,6147
B3	1,4486	1,5373	1,7916	1,5925
Médias	1,4230 a	1,6425 ab	1,9811 b	

Nota: Para os valores obtidos, letras minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

A Tabela 8 apresenta o resultado da análise da variância para os parâmetros da resistência do solo à penetração na camada de 0,10 a 0,15 m de profundidade depois das passadas com o trator agrícola. A ANOVA indica que o número de passadas apresentou efeito significativo, a 5% de probabilidade.

**Tabela 8 -** Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,10 a 0,15 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P[F>Fc]
Passada	02	3,438	1,719	19,137	0,0000*
Bloco	02	0,435	0,218	2,424	
Passada*Bloco	04	0,448	0,112	1,247	0,3088ns
Erro	36	3,234	0,090		
Total corrigido	44	7,555			
CV (%) =	16,89				
Média geral:	1,775	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Conforme apresentado na Tabela 9, o fator número de passadas submetido ao teste de comparação de médias de Tukey, indicou que as passadas P5 e P10 apresentam RSP médias iguais, a 5% de probabilidade. Verifica-se, também, que foi na camada de 0,10 a 0,15 m de profundidade com cinco e dez passadas do rodado do trator agrícola (P5 e P10) que se encontrou a maior média da resistência mecânica do solo à penetração. Resultado semelhante foi encontrado por SILVA, REINERT & REICHERT (2000) que afirmam, em seu trabalho, que nas camadas de 0,075 a 0,175 m de profundidade, ocorreram os maiores valores de resistência à penetração. Verifica-se que, nesta camada, com dez passadas do rodado do trator o solo pode ser considerado compactado, pois, segundo REINERT, REICHERT & SILVA (2001), CENTURION, CARDOSO & NATALE (2001), ANDREOLLA (2005) para valores médios inferiores a 2 MPa o solo não é considerado compactado, pois não apresenta fatores limitantes ao crescimento radicular, no entanto quando o solo apresenta valores de resistência à penetração superior a

2 MPa ele está sujeito a limitações radicular das culturas, e, portanto é considerado compactado.

**Tabela 9** - Comparação de médias da RSP na camada de 0,10 a 0,15 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada

BLOCO/PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
B1	1,3503	2,0515	2,3194	1,9070
B2	1,4859	1,8227	1,9298	1,7461
B3	1,3800	1,6724	1,9614	1,6713
Médias	1,4054 a	1,8488 b	2,0702 b	

Nota: Para os valores obtidos, letras minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

Na Tabela 10 observa-se que na análise de variância da variável em estudo da RSP, na camada de 0,15 a 0,20 m de profundidade o fator número de passadas apresentou efeito significativo, a 5% de probabilidade.

**Tabela 10** - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,15 a 0,20 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P[F>Fc]
Passada	02	2,231	1,115	7,195	0,0024*
Bloco	02	0,292	0,146	0,942	
Passada*Bloco	04	0,611	0,153	0,985	0,4281ns
Erro	36	5,580	0,155		
Total corrigido	44	8,714			
CV (%) =	23,76				
Média geral:	1,657	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Na Tabela 11 apresenta-se o teste de comparação de médias de Tukey, para o número de passadas, o qual indica que com uma passada (P1) apresentou médias diferentes a com dez passadas (P10), a 5% de probabilidade.

**Tabela 11** - Comparação de médias da RSP na camada de 0,15 a 0,20 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada

BLOCO/PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
B1	1,2759	1,8555	2,0460	1,7258
B2	1,5849	1,6742	1,8469	1,7020
B3	1,3130	1,4042	1,9156	1,5443
Médias	1,3913 a	1,6446 ab	1,9362 b	

Nota: Para os valores obtidos, letras minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

A Tabela 12 apresenta o resultado da análise de variância para a variável resistência do solo à penetração na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola. A ANOVA indica que o número de passadas apresentou efeito significativo, a 5% de probabilidade, na RSP na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade.

**Tabela 12** - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P[F>Fc]
Passada	02	2,085	1,042	7,552	0,0018*
Bloco	02	0,551	0,276	1,996	
Passada*Bloco	04	0,649	0,162	1,176	0,3377ns
Erro	36	4,969	0,138		
Total corrigido	44	8,254			
CV (%) =	22,67				
Média geral:	1,639	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Pelo teste de Tukey de comparações de médias, apresentado na Tabela 13, observa-se que a resistência do solo à penetração na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade, depois de uma passada do trator agrícola (P1), é estatisticamente diferente a dez passadas (P10).

Segundo STOLF (1983), TORMENA & ROLOFF (1996), BEUTLER *et al.* (2002), MERCANTE (2003), a resistência mecânica do solo à penetração é uma medida direta do nível de compactação do solo. Verifica-se que o fator número de passadas influenciou diretamente o estado de compactação do

solo, na profundidade de 0,05 a 0,25 m, corroborando BARBOSA, TAVARES FILHO & FONSECA (2002) que afirma que a principal causa da compactação dos solos agrícolas é o tráfego de tratores e máquinas, em sua maioria montados sobre rodados pneumáticos.

**Tabela 13** - Comparação de médias da RSP na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada

BLOCO/PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
B1	1,4644	2,0476	1,8584	1,7902
B2	1,3618	1,4869	1,9413	1,5966
B3	1,2554	1,4769	1,8549	1,5291
	1,3605 a	1,6705 ab	1,8849 b	

Nota: Para os valores obtidos, letras minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

No estudo da RSP depois das passadas do trator agrícola nas camadas de 0,25 a 0,30 m, 0,30 a 0,35 m e 0,35 a 0,40 m de profundidade, segundo a ANOVA apresentada nas tabelas 14, 16 e 18, o número de passadas não apresenta efeito significativo, a 5% de probabilidade, isso ocorre, pois com o aumento da profundidade do solo a RSP diminuiu tendendo a manter-se uniforme (SILVA, 2000; MACHADO *et al.*, 2005; BONINI, 2006).

**Tabela 14** - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,25 a 0,30 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P[F>Fc]
Passada	02	0,597	0,299	1,488	0,2393ns
Bloco	02	0,050	0,025	0,124	
Passada*Bloco	04	0,687	0,172	0,855	0,4999ns
Erro	36	7,227	0,201		
Total corrigido	44	8.562			
CV (%) =	30,01				
Média geral:	1,493	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

**Tabela 15** - Comparação de médias da RSP na camada de 0,25 a 0,30 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada

BLOCO/PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
B1	1,5027	1,6720	1,4397	1,5382
B2	1,3072	1,4761	1,6661	1,4831
B3	1,2304	1,3657	1,7792	1,4584
Médias	1,3468 a	1,5046 a	1,6283 a	

Nota: Para os valores obtidos, letras minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, a 5% de significância.

**Tabela 16** - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,30 a 0,35 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P[F>Fc]
Passada	02	0,305	0,153	1,732	0,1913ns
Bloco	02	0,188	0,094	1,067	
Passada*Bloco	04	0,364	0,091	1,032	0,4039ns
Erro	36	3,174	0,088		
Total corrigido	44	4,031			
CV (%) =	23,03				
Média geral:	1,289	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F > Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

**Tabela 17** - Comparação de médias da RSP na camada de 0,30 a 0,35 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada

BLOCO/PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
B1	1,2077	1,5986	1,2821	1,3628
B2	1,1095	1,2643	1,2422	1,2053
B3	1,2086	1,2404	1,4476	1,2989
Médias	1,1753 a	1,3678 a	1,3240 a	

Nota: Para os valores obtidos, letras minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, a 5% de significância.



**Tabela 18** - Análise de variância para a RSP (MPa) na camada de 0,35 a 0,40 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P[F>Fc]
Passada	02	0,196	0,098	1,155	0,3264ns
Bloco	02	0,044	0,022	0,261	
Passada*Bloco	04	0,021	0,005	0,063	0,9924ns
Erro	36	3,051	0,085		
Total corrigido	44	3,312			
CV (%) =	22,50				
Média geral:	1,294	Número de observações: 45			

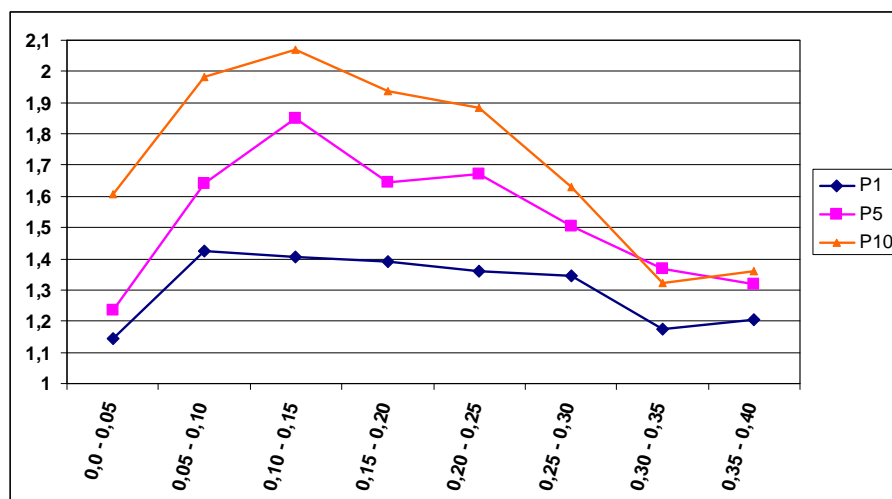
Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F > Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

**Tabela 19** - Comparação de médias da RSP na camada de 0,35 a 0,40 m de profundidade, depois das passadas com o trator agrícola, segundo bloco e passada

BLOCO/PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
B1	1,2315	1,3564	1,4043	1,3307
B2	1,2186	1,2862	1,3836	1,2961
B3	1,1595	1,3146	1,2881	1,2541
Médias	1,2032 a	1,3191 a	1,3587 a	

Nota: Para os valores obtidos, letras minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, a 5% de significância.

Na Figura 5 apresenta-se o gráfico da resistência média do solo à penetração após uma, cinco e dez passadas com o rodado do trator agrícola. Observa-se que, com uma passada (P1) a RSP foi homogênea na profundidade de 0,05 a 0,30 m, apresentando valores inferiores a P5 e P10, com cinco e dez passadas (P5 e P10) a RSP foi maior nas camadas de 0,05 a 0,25 m de profundidade, tendendo a diminuir depois destas camadas.



**Figura 5** - Média da resistência do solo à penetração (RSP) entre os blocos 1, 2 e 3, após uma, cinco e dez passadas do rodado do trator agrícola.

#### 4.2.2 Resistência do Solo à Pressão da Placa (RSPP) - Depois das Passadas com o Trator Agrícola

Observam-se, na Tabela 20, os resultados da análise da variância para as variáveis da resistência do solo à pressão da placa (RSPP), obtidos por meio de curvas de pré-consolidação, apresentadas no anexo B, para os tratamentos (passadas) analisados, depois das passadas com o trator agrícola. A ANOVA indica que o número de passadas apresentou efeito significativo, a 5% de probabilidade, na resistência do solo à pressão da placa.

**Tabela 20** - Análise de variância para a RSPP (kPa) – Ponto de pré-consolidação do solo, depois das passadas com o rodado do trator agrícola

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P[F>Fc]
Passada	02	44721,555	22360,777	4,296	0,024*
Bloco	02	1562,055	781,027	0,150	
Passada*Bloco	04	1365,111	341,277	0,066	0,991ns
Erro	27	140521,500	5204,500		
Total corrigido	35	188170,222			
CV (%) =	31,40				
Média geral:	229,777	Número de observações: 36			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F > Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Os testes de comparação de médias de Tukey, apresentado na Tabela 21, indicam que a média da resistência do solo à pressão da placa com uma passada (P1) é estatisticamente diferente da média da resistência do solo à pressão da placa com dez passadas (P10), a 5 % de probabilidade.

**Tabela 21** - Comparação de médias da RSPP (kPa) – Ponto de pré-consolidação, depois das passadas com o trator agrícola

BLOCO/PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
B1	190,25	237,75	287,50	238,50
B2	185,25	214,25	268,25	222,58
B3	184,00	238,00	262,75	228,25
Médias	186,50 a	230,00 ab	272,83 b	

Nota: Para os valores obtidos, letras minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

#### 4.2.3 Densidade do Solo (DS) - Depois das Passadas com o Trator Agrícola

A Tabela 22 apresenta os resultados da análise da variância para a variável densidade do solo, para os tratamentos (passadas) analisados depois das passadas com o trator agrícola. A ANOVA indica, no estudo da densidade do solo, que existe interação significativa entre o número de passadas e os blocos, a 5% de significância.

**Tabela 22** - Análise de variância para a densidade do solo ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ), depois das passadas com o trator agrícola

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F <sub>0</sub>	P[F>F <sub>c</sub> ]
Passada	02	0,068	0,034	35,054	0,0000
Bloco	02	0,009	0,004	4,713	
Passada*Bloco	04	0,011	0,002	2,949	0,0383*
Erro	27	0,026	0,000		
Total	35	0,116			
CV (%) =	2,80				
Média geral:	1,118	Número de observações: 36			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F > F<sub>c</sub>]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Os testes de comparação de médias de Tukey, apresentado na Tabela 23, indicam na linha, para o Bloco 1 (B1) que a densidade do solo média com uma (P1) e com cinco passadas do rodado do trator agrícola (P5) são estatisticamente iguais a 5 % de probabilidade. Para o Bloco 2 (B2) e Bloco 3 (B3) a densidade do solo entre cinco passadas (P1) e dez passadas (P10) são estatisticamente iguais, a 5% de probabilidade.

**Tabela 23** - Comparação de médias para densidade do solo ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ), depois das passadas com o trator agrícola

BLOCO\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
B1	1,0575 a	1,0825 a	1,1550 b	1,0983
B2	1,0700 a	1,1800 b	1,1625 b	1,1375
B3	1,0475 a	1,1450 b	1,1650 b	1,1192
Médias	1,0583	1,1358	1,1608	

Nota: Para os valores obtidos, letras minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

Com relação à densidade do solo, depois das passadas com rodado do trator agrícola, observa-se que o fator analisado: número de passadas, teve influência significativa na densidade do solo em cada bloco. Analisando os valores médios de densidade não se encontra em nenhuma das parcelas para os diferentes números de passadas, densidade média do solo superior a  $1,45 \text{ Mg.m}^{-3}$ , o que, segundo CINTRA, MIELNICZUK & SCOPEL (1983) e SECCO *et al.* (2004), seria limitante ao desenvolvimento radicular. GUIMARÃES, STONE & MOREIRA (2002) encontraram para a cultura do feijão valores de densidade de  $1,2 \text{ Mg.m}^{-3}$ , que começam a afetar o desenvolvimento radicular e a parte aérea do feijão.

Observa-se que, conforme foi aumentando o número de passadas, aumentou também o valor médio da densidade do solo, demonstrando que o efeito das passadas do rodado do trator agrícola provocou um aumento da densidade do solo, semelhante ao apresentado pela resistência do solo à penetração, corroborando SPERA *et al.* (2004) que afirmam que à medida que o solo vai sendo submetido ao uso agrícola, as propriedades físicas sofrem alterações. As propriedades mais usadas para avaliar a compactação são: a densidade do solo e a resistência mecânica do solo à penetração. Verifica-se,

então, que a densidade do solo sofreu variações induzidas pelo tráfego agrícola e que não sofreu mudanças significativas por ocasião da colheita. Resultado semelhante ao encontrado por PEREIRA (1996).

#### 4.2.4 Teor de água no solo (UMID) - Depois das Passadas com o Trator Agrícola

Na Tabela 24 apresentam-se os resultados da análise da variância para a variável do teor de água no solo, depois das passadas com o trator agrícola. A ANOVA indica no estudo do teor de água no solo que existe interação significativa entre o número de passadas e os blocos, a 5% de significância.

**Tabela 24** - Análise de variância para o teor de água no solo (%), depois das passadas com trator agrícola

FONTES DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F <sub>0</sub>	P[F>F <sub>c</sub> ]
Passada	02	77,111	38,555	4,116	0,0275
Bloco	02	91,514	45,756	4,884	
Passada*Bloco	04	213,907	53,477	5,708	0,0018*
Erro	27	252,935	9,368		
Total corrigido	35	635,467			
CV (%) =	8,74				
Média geral:	35,033	Número de observações: 36			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; F<sub>0</sub>: Estatística F do teste; P [F >F<sub>c</sub>]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Os testes de comparação de médias de Tukey, apresentados na Tabela 25, indicam nas linhas para o Bloco 1 (B1) e Bloco 2 (B2) que o teor de água no solo entre P1, P5 e P10, em média, são estatisticamente iguais, a 5 % de probabilidade. Para o Bloco 3 (B3) observa-se que o teor de água no solo médio com uma passada (P1) é estatisticamente igual ao teor de água médio no solo com cinco (P5) e com dez (P10) passadas, a 5% de probabilidade.

**Tabela 25** - Comparação de médias para o teor de água no solo (%), depois das passadas com o trator agrícola

BLOCO/PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
B1	35,3975 a	31,0650 a	32,9800 a	33,1475
B2	37,3600 a	32,9575 a	34,4000 a	34,9058
B3	37,0750 ab	42,1925 b	31,8725 a	37,0467
Médias	36,6108	35,4050	33,0842	

Nota: Para os valores obtidos, letras minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

### 4.3 Depois da Colheita - RSP, RSPP, DS e UMID

#### 4.3.1 Resistência do Solo à Penetração (RSP) – Depois da Colheita

Na Tabela 26 apresenta-se a análise de variância da RSP, em que os fatores em estudo não apresentaram efeito significativo, a 5% de probabilidade.

**Tabela 26** - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura, num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,0 a 0,05 m de profundidade

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F >Fc]
Passada	02	0,087346	0,43673	0,214	0,8107ns
Erro 1	12	2,454334	0,204528		
Cultura	02	0,844841	0,422421	1,560	0,2679ns
Erro 2	08	2,166171	0,270771		
Passada*Cultura	04	0,507677	0,126919	0,924	0,4741ns
Erro 3	16	2,196857	0,137304		
Total	44	8,257227			
CV Passada	(%) =	32,92			
CV Cultura	(%) =	37,88			
CV Interação	(%) =	26,98			
Média geral:	1,3734	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Na Tabela 27 apresentam-se as comparações das médias da RSP, depois da colheita na camada de 0,0 a 0,05 m de profundidade submetida ao teste F da ANOVA, e verifica-se que não existem diferenças significativas.

**Tabela 27** - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0 a 0,05 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	1,5338	1,4324	1,6968	1,5543 A
C2	1,4948	1,1599	1,3772	1,3440 A
C3	1,1334	1,3502	1,1844	1,2227 A
Médias	1,3873 a	1,3142 a	1,4195 a	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste F a 5% de significância.

Na Tabela 28 apresenta-se a análise de variância da RSP para a camada de 0,5 a 0,10 m de profundidade, depois da colheita. Verifica-se que existe interação significativa entre o tipo de cultura e o tipo de passada, a 5% de probabilidade, assim, devido à dependência entre os níveis dos fatores em estudo procedeu-se ao desdobramento desses fatores.

**Tabela 28** - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,5 a 0,10 m de profundidade

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F >Fc]
Passada	02	0,622997	0,311499	1,760	0,2136ns
Erro 1	12	2,123707	0,176976		
Cultura	02	1,462401	0,731200	5,264	0,0348*
Erro 2	08	1,111283	0,138910		
Passada*Cultura	04	1,441862	0,360466	3,183	0,0420*
Erro 3	16	1,812135	0,113258		
Total	44	8,574385			
CV Passada	(%) =	23,15			
CV Cultura	(%) =	20,51			
CV Interação	(%) =	18,52			
Média geral:	1,81702	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

A Tabela 29 apresenta as comparações das médias da RSP depois da colheita na camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade, submetidas ao teste de Tukey. Analisando a compactação do solo por meio da resistência à penetração, fixando a cultura C1, observa-se que as passadas P1, P5 e P10 apresentam compactações médias estatisticamente iguais. Fixando a cultura C2 têm-se médias estatísticas iguais, a 5% de significância, entre P1 e P5 e, também, entre as passadas P1 e P10. Na cultura C3 têm-se compactações médias iguais entre as passadas P1, P5 e P10.

Analisando-se a resistência do solo à penetração para uma passada do trator agrícola (P1), observa-se que a compactação do solo é igual para as culturas C1, C2 e C3. Com 5 passadas do rodado do trator (P5) tem-se médias iguais entre as culturas C2 e C3. Com dez passadas do rodado do trator (P10) têm-se médias de resistência do solo à penetração estatisticamente iguais para as culturas C1, C2 e C3.

**Tabela 29** - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	1,8980 aA	2,2558 aB	2,0584 aA	2,0707
C2	1,6557 abA	1,2658 aA	2,084 bA	1,6685
C3	1,6733 aA	1,6550 aA	1,8070 aA	1,7118
Médias	1,7424	1,7255	1,9831	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

Para a RSP na camada de 0,10 a 0,15 m de profundidade, depois da colheita, verifica-se pela ANOVA que existe efeito significativo no fator passada, conforme dados da Tabela 30, que apresenta a análise de variância.



**Tabela 30** - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,10 a 0,15m de profundidade

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F >Fc]
Passada	02	1,216122	0,608061	7,819	0,0067*
Erro 1	12	0,933228	0,077769		
Cultura	02	0,728466	0,364233	2,846	0,1166ns
Erro 2	08	1,023948	0,127994		
Passada*Cultura	04	0,267084	0,066771	0,331	0,8528ns
Erro 3	16	3,224390	0,201524		
Total	44	7,393238			
CV Passada	(%) =	14,99			
CV Cultura	(%) =	19,23			
CV Interação	(%) =	24,12			
Média geral:	1,86088	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Conforme se verifica na Tabela 31, o fator passada foi submetido ao teste de comparação de médias Tukey, que indicou que as passadas P1 e P5 apresentam RSP médias iguais e que as passadas P1 e P10, também, apresentam RSP médias iguais, no entanto, as passadas P5 e P10 são, em média, estatisticamente diferentes, a 5% de significância.

**Tabela 31** - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,10 a 0,15 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	1,98320	1,912	2,2272	2,0408 A
C2	1,85898	1,584	1,8644	1,7691 A
C3	1,72672	1,4896	2,1018	1,7727 A
Médias	1,85630 ab	1,66186 a	2,064467 b	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

A camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade sofreu influência da cultura e interação, ou seja, cultura e passada juntas, no entanto as camadas mais afetadas, consideradas pela literatura como realmente compactadas e que podem apresentar limitações ao crescimento radicular, pois demonstraram resistência à penetração média superior a 2 MPa, foram as de 0,05 a 0,15 m de

profundidade. Esse resultado corrobora SILVA, REINERT & REICHERT (2000) que afirmam que para um sistema de plantio direto os maiores valores de resistência à penetração e, portanto, de maior estado de compactação ocorrem na camada de 0,07 a 0,17 m de profundidade e, para essas profundidades, verifica-se que o valor médio de resistência do solo à penetração que determina o solo como compactado ocorreu para a cultura do milho, portanto, como antes do plantio as camadas consideradas compactadas eram de 0,10 a 0,15 m de profundidade, pode-se determinar que a semeadora-adubadora, usada na semeadura da cultura do milho, auxiliou na compactação do solo nas camadas iniciais de 0,05 a 0,10 m de profundidade. Vários trabalhos indicam aumento no estado de compactação dos solos submetidos ao sistema plantio direto (HAKANSSON, VOORHEES & RILEY, 1988, SILVA & MIELNICZUK, 1997).

Segundo TORMENA, SILVA & LIBARDI (1998), no plantio direto a movimentação do solo é restrita à linha de semeadura, mas a ocorrência sistemática do tráfego causa compactação na camada superficial do solo.

Verifica-se ainda que a camada de 0,10 a 0,15 m de profundidade, considerada como compactada com dez passadas do rodado do trator agrícola, apresentou RSP superior a 2 MPa, demonstrando que as culturas não tiveram influência na descompactação do solo, mantendo o estado de compactação anterior às culturas.

Na Tabela 32 observa-se que na análise de variância dos fatores em estudo da RSP, na camada de 0,15 a 0,20 m de profundidade o fator passada apresentou efeito significativo, a 5% de probabilidade.

**Tabela 32** - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,15 a 0,20 m de profundidade

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F >Fc]
Passada	02	1,114150	0,557075	6,285	0,0136*
Erro 1	12	1,063709	0,088642		
Cultura	02	0,421594	0,210797	1,912	0,2096ns
Erro 2	08	0,882207	0,110276		
Passada*Cultura	04	0,841027	0,210257	1,185	0,3546ns
Erro 3	16	2,837797	0,177362		
Total	44	7,160483			
CV Passada	(%) =	16,90			
CV Cultura	(%) =	18,85			
CV Interação	(%) =	23,91			
Média geral:	1,76148	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

O fator passada, submetido ao teste de comparação de médias Tukey, apresentado na Tabela 33, demonstrou que as passadas P1 e P5 apresentam compactações médias estatisticamente iguais, assim como as passadas P5 e P10, no entanto as passadas P1 e P10 apresentaram médias estatisticamente diferentes, a 5% de significância. De acordo com ALVES & SUZUKI (2004), como no sistema plantio direto não ocorre revolvimento do solo, ocorre a formação de camadas compactadas na profundidade de 0,07 a 0,15 m. Desse modo, ocorrem pontos de maior RSP. No sistema convencional, a maior resistência ocorre na camada de 0,10 a 0,40 m de profundidade. BEUTLER *et al.* (2001) relataram que o tráfego acentuado de máquinas e implementos pesados sobre o solo pode provocar compactação superficial do solo na profundidade de 0,15 a 0,20 m.

**Tabela 33** - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,15 a 0,20 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	1,55582	1,87180	2,0644	1,8307 A
C2	1,56780	1,68740	1,6186	1,6246 A
C3	1,66500	1,58604	2,2364	1,8292 A
Médias	1,5962 a	1,7150 ab	1,9731 b	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

Na Tabela 34 tem-se uma análise de variância da RSP na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade, depois da colheita, em que se observa que o fator passada possui efeito significativo, a 5% de probabilidade.

**Tabela 34** - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F >Fc]
Passada	02	2,429015	1,214508	10,762	0,0021*
Erro 1	12	1,354177	0,112848		
Cultura	02	0,344061	0,172031	0,608	0,5676ns
Erro 2	08	2,262454	0,282807		
Passada*Cultura	04	0,950016	0,237504	1,328	0,3021ns
Erro 3	16	2,860963	0,178810		
Total	44	10,200686			
CV Passada	(%) =	20,52			
CV Cultura	(%) =	32,48			
CV Interação	(%) =	25,83			
Média geral:	1,63712	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Quando o fator passada foi submetido ao teste de comparação de médias de Tukey, (Tabela 35), demonstrou que, estatisticamente, as passadas P1 e P5 apresentam compactações médias iguais e ambas apresentam médias estatisticamente diferentes da passada P10.

**Tabela 35** - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,20 a 0,25 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	1,80088	1,5906	1,8563	1,7493 A
C2	1,5024	1,4670	1,9002	1,6232 A
C3	1,2702	1,2118	2,1257	1,5359 A
Médias	1,5245 a	1,4231 a	1,9607 b	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

Na camada de 0,25 a 0,30 m de profundidade, depois da colheita, observa-se na ANOVA, apresentada na Tabela 36, que o fator passada apresentou efeito significativo, na RSP.

**Tabela 36** - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,25 a 0,30m de profundidade

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F >Fc]
Passada	02	1,165583	0,582791	14,652	0,0006*
Erro 1	12	0,477300	0,039775		
Cultura	02	0,462869	0,231434	1,956	0,2035ns
Erro 2	08	0,946652	0,118331		
Passada*Cultura	04	0,653571	0,163393	2,011	0,1413ns
Erro 3	16	1,299817	0,081239		
Total	44	5,005791			
CV Passada	(%) =	14,12			
CV Cultura	(%) =	24,36			
CV Interação	(%) =	20,18			
Média geral:	1,41240	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Quando o fator passada é submetido ao teste de comparação de médias de Tukey, observa-se que as passadas P1 e P5 apresentam compactações médias estatisticamente iguais, no entanto, essas médias são diferentes da passada P10, conforme se verifica na Tabela 37.

**Tabela 37** - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,25 a 0,30 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	1,3822	1,4032	1,4636	1,4163 A
C2	1,3570	1,5424	1,7044	1,5346 A
C3	1,0198	1,1086	1,7304	1,2863 A
Médias	1,2530 a	1,3514 a	1,6328 b	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

No estudo da RSP, depois da colheita, nas camadas de 0,30 a 0,35 e 0,35 a 0,40 m de profundidade, segundo a ANOVA apresentada nas Tabelas 38 a 41, nenhum dos fatores que determinam a RSP apresentaram efeito significativo, a 5% de probabilidade.

**Tabela 38** - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,30 a 0,35 m de profundidade

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F >Fc]
Passada	02	0,322188	0,161094	1,227	0,3251ns
Erro 1	13	1,707153	0,131319		
Cultura	02	0,434609	0,217304	1,496	0,2806ns
Erro 2	08	1,162246	0,145281		
Passada*Cultura	04	1,610580	0,402645	3,024	0,0516ns
Erro 3	15	1,997384	0,133159		
Total	44	7,234159			
CV Passada	(%) =	24,59			
CV Cultura	(%) =	25,87			
CV Interação	(%) =	24,77			
Média geral:	1,47340	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

**Tabela 39** - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,30 a 0,35 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	Médias
C1	1,35336	1,4084	1,4974	1,4197 A
C2	1,706	1,7206	1,4072	1,6113 A
C3	1,04582	1,29966	1,8222	1,3892 A
Médias	1,3684 a	1,4762 a	1,5756 a	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste F, a 5% de significância.

Depois da colheita das culturas, pode-se afirmar que o principal fator que influenciou na resistência mecânica à penetração foi o fator número de passadas do trator agrícola nas camadas de 0,10 a 0,15 m, 0,15 a 0,20 m, 0,20 a 0,25 m e 0,25 a 0,30 m de profundidade. A resistência mecânica do solo à penetração mostrou-se mais intensa na profundidade de 0,10 a 0,30 m, corroborando MACHADO *et al.* (2005) que, em estudo avaliando a influência do pneu do trator na resistência do solo à penetração, concluíram que a região do solo que sofre maior adensamento, quando submetida ao rodado de um trator agrícola, encontra-se na faixa de 0,10 m a 0,30 m de profundidade.

**Tabela 40** - Análise de variância para a RSP (MPa), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita, na camada de 0,35 a 0,40 m de profundidade

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F > Fc]
Passada	02	0,108904	0,054452	1,095	0,3657ns
Erro 1	12	0,596583	0,049715		
Cultura	02	0,181702	0,090851	0,948	0,4270ns
Erro 2	08	0,766357	0,095795		
Passada*Cultura	04	0,901435	0,225359	2,508	0,0831ns
Erro 3	16	1,437551	0,089847		
Total	44	3,992533			
CV Passada	(%) =	16,16			
CV Cultura	(%) =	22,44			
CV Interação	(%) =	21,73			
Média geral:	1,37945	Número de observações: 45			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F > Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

**Tabela 41** - Comparação de médias da RSP (MPa) na camada de 0,35 a 0,40 m de profundidade, depois da colheita, segundo cultura e passada

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	1,17936	1,4994	1,5942	1,4243 A
C2	1,58574	1,4882	1,1994	1,4244 A
C3	1,17076	1,2958	1,4022	1,2896 A
Médias	1,3120 a	1,4278 a	1,3986 a	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste F, a 5% de significância.

Os apresentados acima evidenciam que as pressões no solo são cumulativas ao longo do tempo (tensão de pré-adensamento), tanto por ação natural quanto por ação do homem, isto é, pela passagem sobre o solo de máquinas ou implementos agrícolas que acarretam alterações na estrutura do solo. Verifica-se, também, que as culturas estudadas possuem comportamento diferente frente à resistência mecânica à penetração, por apresentarem sistema radicular diferenciado.

#### 4.3.2 Resistência do Solo à Pressão da Placa (RSPP) – Depois da Colheita

Na Tabela 42 é apresentada a análise de variância para a resistência do solo à pressão aplicada pela placa - RSPP (kPa) – ponto de pré-consolidação do solo, depois da colheita, e observa-se que o fator passada apresentou efeito significativo, a 5 % de probabilidade, já os fatores cultura e interação não apresentaram este efeito.



**Tabela 42** - Análise de variância para a RSP (kPa) – Ponto de pré-consolidação do solo, tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fc	P[F>Fc]
Passada	02	33993.166667	16996.583333	21.728	0.0004*
Erro 1	09	7040.250000	782.250000		
Cultura	02	10138.500000	5069.250000	2.229	0.1889ns
Erro 2	06	13645.944444	2274.324074		
Passada*Cultura	04	6609.333333	1652.333333	1.149	0.3804ns
Erro 3	12	17259.555556	1438.296296		
Total	35	88686.750000			
CV Passada	(%) =	15.55			
CV Cultura	(%) =	26.51			
CV Interação	(%) =	21.08			
		179.916			
Média geral:	6667	Número de observações: 36			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Na Tabela 43 apresenta-se a comparação de médias feita pelo teste de Tukey, que a resistência do solo à pressão da placa apresentada por P1 (uma passada do trator agrícola) é estatisticamente igual à RSP apresentada por P5 (cinco passadas do trator agrícola), a 5% de significância, no entanto, ambas diferem de P10 (dez passadas). Confirmando que a compactação do solo pode ocorrer pela reação às pressões e cargas impostas pelas máquinas agrícolas.

De acordo com SILVA (2000), a compactação do solo é resultante do somatório de vários fatores relativos às máquinas agrícolas, como: tipo, largura e pressão de inflação dos pneus, massa e carga por eixo. Corroborando ainda DURUOHA (2000), que afirma que a movimentação constante de máquinas e caminhões sobre as áreas cultivadas são os fatores mais importantes na compactação do solo. A pressão exercida sobre a superfície do terreno pelo peso da máquina dá origem a uma força externa que causa uma reorganização das partículas do solo, que passam a ocupar menor volume, caracterizando o fenômeno da compactação. O grau ou intensidade da compactação depende de uma série de fatores, principalmente o tipo de solo, teor de água, peso do veículo e número de vezes que este se desloca sobre o terreno.

**Tabela 43** - Comparação de médias da RSPP (kPa) – Ponto de pré-consolidação, depois da colheita, segundo cultura e passada

CULTURA/PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	157	180	225	187,33 A
C2	125	126	220	157,00 A
C3	162	206	219	195,67 A
Médias	148,00 a	170,67 a	221,33 b	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

De acordo com o exposto, pode-se afirmar que o número de passadas com o rodado do trator agrícola influencia na resistência que o solo apresenta à pressão aplicada pela placa e, conseqüentemente, no seu ponto de pré-consolidação, sendo este uma medida direta do estado de compactação do solo.

#### **4.3.3 Densidade do Solo (DS) Depois da Colheita – Penetrômetro Eletrônico**

A Tabela 44 apresenta a análise de variância da densidade do solo após a colheita das culturas, no dia em que foram coletados os dados da RSP. Por meio da ANOVA indicou que o fator cultura teve efeito significativo a 5% de probabilidade.

**Tabela 44** - Análise de variância para a densidade do solo ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita – haste

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F >Fc]
Passada	02	0,179106	0,089553	3,513	0,0746ns
Erro 1	09	0,229458	0,025495		
Cultura	02	0,467489	0,233744	6,680	0,0298*
Erro 2	06	0,209956	0,034993		
Passada*Cultura	04	0,078594	0,019649	0,621	0,6565ns
Erro 3	12	0,379961	0,031663		
Total	35	1,544564			
CV Passada	(%) =	12,96			
CV Cultura	(%) =	15,18			
CV Interação	(%) =	14,44			
Média geral:	1,231944	Número de observações: 36			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Quando submetidos ao teste de comparação de médias de Tukey (Tabela 45) observa-se que estatisticamente as densidades médias do solo em C1 (milho) e C2 (soja) são iguais, mas diferentes de C3 (feijão), a 5% de probabilidade.

**Tabela 45** - Comparação de médias para densidade do solo ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ), depois da colheita – haste, segundo cultura e passada

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	1,3375	1,2550	1,3350	1,3091 B
C2	1,2475	1,2625	1,4375	1,3158 B
C3	0,9550	1,0350	1,2225	1,0708 A
Médias	1,1800 a	1,18416a	1,3316 a	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

#### 4.3.4 Densidade do Solo (DS) Depois da Colheita – Penetrômetro de Placa

A Tabela 46 apresenta a análise de variância para a densidade do solo, depois da colheita, no mesmo dia em que foram coletados os dados de

resistência do solo à placa. A ANOVA indica que existe interação significativa entre o número de passadas e os tipos de culturas, a 5% de probabilidade.

**Tabela 46** - Análise de variância para a densidade ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita – placa

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F >Fc]
Passada	03	0,086709	0,028903	7,128	0,0094*
Erro 1	09	0,036496	0,004055		
Cultura	02	1,278539	0,639269	33,766	0,0005*
Erro 2	06	0,113594	0,018932		
Passada*Cultura	04	0,068732	0,017183	13,140	0,0004*
Erro 3	11	0,014384	0,001308		
Total	35	1,598456			
CV Passada	(%) =	5,82			
CV Cultura	(%) =	12,58			
CV Interação	(%) =	3,31			
Média geral:	1,09388	Número de observações: 36			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Na Tabela 47 verifica-se que, pelo teste de comparação de médias de Tukey, a cultura C1 (milho), apresentou densidade média entre as passadas P1, P5 e P10 estatisticamente iguais. Para a cultura C2 (soja) tem-se uma densidade média igual entre as passadas P1 e P10, no entanto ambas diferenciam-se em médias da passada P5.

Para a cultura C3 (feijão) observa-se que a densidade do solo apresenta médias estatisticamente iguais para as passadas P1 e P5 e difere da passada P10. Nas passadas P1 e P5 a densidade do solo, em média, é igual nas culturas C1 e C2 e na passada P10 a densidade do solo é, em média, diferente nas culturas C1, C2 e C3.

**Tabela 47** - Comparação de médias para densidade do solo ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ), depois da colheita, segundo cultura e passada - placa

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	1,2325 aB	1,2100 aB	1,2175 aB	1,2200
C2	1,2475 cB	1,1125 bB	1,3425 cC	1,2340
C3	0,7900 aA	0,7850 aA	0,9075 bA	0,8280
Médias	1,0900	1,0360	1,1560	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

Em relação à densidade do solo, antes da compactação, depois da compactação e depois da colheita (haste e placa), verifica-se que os fatores analisados - número de passadas e tipos de cultura - tiveram influência significativa na densidade do solo, porém, pela análise dos valores médios de densidade, não se encontra em nenhuma das parcelas, tanto para os diferentes números de passadas quanto para as diferentes culturas, densidade média superior a  $1,45 \text{ Mg.m}^{-3}$ , o que, segundo CINTRA, MIELNICZUK & SCOPEL (1983) e SECCO *et al.* (2004), seria limitante ao desenvolvimento radicular. GUIMARÃES, STONE & MOREIRA (2002) encontraram para a cultura do feijão valores de densidade de  $1,2 \text{ Mg.m}^{-3}$  que afetam o desenvolvimento radicular e a parte aérea do feijão.

No entanto, depois das passadas do rodado do trator agrícola, observa-se que, conforme foi aumentando o número de passadas aumentou, também, o valor médio da densidade do solo. Esse aumento manteve-se depois da colheita, demonstrando que o efeito das passadas do rodado do trator agrícola provocou um aumento da densidade do solo, semelhante ao apresentado pela resistência do solo à penetração, corroborando SPERA *et al.* (2004) que afirmam que à medida que o solo vai sendo submetido ao uso agrícola as propriedades físicas sofrem alterações. As propriedades mais usadas para avaliar a compactação são a densidade do solo e a resistência mecânica do solo à penetração. Verifica-se, então, que a densidade do solo sofreu variações induzidas pelo tráfego agrícola e que não sofreu mudanças significativas por ocasião da colheita. Resultado semelhante ao encontrado por PEREIRA (1996).

#### 4.3.5 Teor de Água no Solo (UMID) Depois da Colheita – Penetrômetro Eletrônico

Na Tabela 48 apresenta-se a análise de variância do teor de água, depois da colheita, no dia em que foram coletados os dados da RSP. É possível observar pela ANOVA que a interação apresenta efeito significativo, a 5% de probabilidade, entre o número de passadas e o tipo de cultura.

**Tabela 48** - Análise de variância para o teor de água (%), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita – haste

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F >Fc]
Passada	02	11,987356	5,993678	4,289	0,0492*
Erro 1	09	12,578067	1,397563		
Cultura	02	4715,206672	2357,603336	1740,339	0,0000*
Erro 2	06	8,128083	1,354681		
Passada*Cultura	04	33,084278	8,271069	3,738	0,0337*
Erro 3	12	26,549700	2,212475		
Total	35	4807,534156			
CV Passada	(%) =	4,79			
CV Cultura	(%) =	4,72			
CV Interação	(%) =	6,03			
Média geral:	24,679	Número de observações: 36			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F >Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Na Tabela 49 apresenta-se a comparação de médias pelo teste de Tukey e verifica-se que, para a cultura do milho (C1), tem-se o mesmo teor de água no solo médio com as passadas P1, P5 e P10. Para a cultura C2 (soja) tem-se, estatisticamente, o mesmo teor de água no solo médio entre as passadas P1 e P5, no entanto esse teor de água no solo médio diferencia-se da passada P10. Para a cultura do feijão (C3), o teor de água no solo médio é estatisticamente igual entre as passadas P1, P5 e P10.

Fixando as passadas P1 observa-se que o teor de água no solo médio é diferente para as três culturas (C1, C2 e C3). O mesmo ocorre com 5 passadas (P5), que também apresenta teor de água no solo médio diferente entre as três culturas. Para a cultura P10 tem-se um teor de água no solo

médio estatisticamente igual entre as culturas C1 e C2, no entanto ambos diferenciam-se da cultura C3.

**Tabela 49** - Comparação de médias para teor de água do solo (%), depois da colheita – haste, segundo cultura e passada

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	29,54 aB	30,25 aB	30,66 aB	30,15
C2	37,02 bC	35,72 bC	32,65 aB	35,13
C3	9,34 aA	8,48 aA	8,41 aA	8,74
Médias	25,30	24,82	23,91	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

#### 4.3.6 Teor de Água no Solo (UMID) Depois da Colheita – Penetrômetro de Placa

A análise de variância, apresentada na Tabela 50, indica o teor de água depois da colheita no dia em que foram coletados os dados da resistência do solo à placa. A ANOVA demonstra que há efeito significativo, a 5% de probabilidade, na interação número de passadas e tipo de cultura.

**Tabela 50** - Análise de variância para o teor de água (%), tendo como fatores: passada e cultura num delineamento em faixas, depois da colheita – placa

FONTE DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	Fo	P [F > Fc]
Passada	02	47,975150	23,987575	5,926	0,0228*
Erro 1	09	36,432883	4,048098		
Cultura	02	164,466050	82,233025	22,852	0,0016*
Erro 2	06	21,591061	3,598510		
Passada*cultura	04	63,257600	15,814400	4,060	0,0262*
Erro 3	12	46,746356	3,895530		
Total	35	380,469100			
CV Passada	(%) =	6,67			
CV Cultura	(%) =	6,29			
CV Interação	(%) =	6,54			
Média geral:	30,158	Número de observações: 36			

Nota: Ns: Não significativo, a 5% de probabilidade; \*: Efeito significativo, a 5% de probabilidade; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma ao quadrado; QM: Quadrado médio; Fo: Estatística F do teste; P [F > Fc]: Nível descritivo; CV: coeficiente de variação.

Quando submetidos ao teste de comparação de médias Tukey, apresentado na Tabela 51, os valores das médias da UMID demonstraram que, para a cultura do milho (C1), tem-se as mesmas médias para os teores de água no solo entre as passadas P1, P5 e P10. Na análise da cultura da soja (C2), observa-se que o teor de água no solo médio na passada P1 é estatisticamente igual ao teor de água no solo médio nas passadas P5 e P10, entretanto, nas passadas P5 e P10 os teores de água do solo médio são diferentes entre si. Na cultura do feijão (C3), observa-se que o teor de água no solo médio na passada P10 é estatisticamente igual aos obtidos nas passadas P1 e P5, porém entre as passadas P1 e P5 os teores de água do solo médio diferem, estatisticamente, entre si.

Pela análise das passadas, verifica-se que na passada P1 tem-se um teor de água no solo médio igual entre as culturas de soja (C2) e feijão (C3), porém ambas são diferentes do teor de água no solo médio encontrado na cultura do milho (C1). Para a passada P5 observa-se que o teor de água no solo médio encontrado na cultura C1 é estatisticamente igual ao encontrado na cultura C3. Para a passada P10 observa-se que as culturas C2 e C3 apresentam médias de teores de água no solo estatisticamente iguais.

**Tabela 51** - Comparação de médias para teor de água do solo (%), depois da colheita – placa, segundo cultura e passada

CULTURA\PASSADA	P1	P5	P10	MÉDIAS
C1	29,01 aA	28,31 aA	25,87 aA	27,73
C2	33,19 abB	34,91 bB	30,70 aB	32,93
C3	32,48bAB	27,31 aA	29,63 abB	29,81
Médias	31,56	30,18	28,73	

Nota: Para os valores obtidos, letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de significância.

Verifica-se que, depois da colheita - haste, para a cultura C3 (feijão) tem-se o menor teor de água no solo médio, ou seja, o solo no seu estado mais seco. Analisando-se o teor de água, paralelamente à densidade do solo, para determinar o nível de compactação do solo, observa-se que foi justamente depois da colheita - haste, para a cultura C3 (feijão), que o solo apresentou menor densidade. Conforme SECCO (2003), a densidade do solo é uma



medida direta do estado de compactação do solo e, segundo PRIMAVESI (1990), quanto mais compactado é o solo maior será sua densidade. Os dados obtidos neste estudo corroboram os trabalhos de SWAN, MONCRIEF & VOOHEES (1987) e ASHBURNER & SIMS (1984), que afirmam que quanto menor o teor de água presente no solo menor será sua deformação.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa permitem concluir que:

O estado de compactação do solo, determinado por meio da resistência mecânica do solo à penetração e da densidade do solo, aumentou com o aumento do número de passadas do rodado do trator agrícola;

A maior resistência do solo à penetração ocorreu nas camadas de 0,05 a 0,20 m de profundidade, depois das passadas com o rodado do trator agrícola. Nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,15 a 0,25 m de profundidade, a resistência à penetração do solo provocada por uma passada com o rodado do trator agrícola é estatisticamente igual à provocada por cinco passadas e a resistência à penetração provocada por cinco passadas é estatisticamente igual à provocada com dez passadas do rodado do trator agrícola;

Após a colheita das culturas, o fator passada continuou influenciando na resistência do solo à penetração nas camadas de 0,05 a 0,30 m de profundidade. O fator cultura influenciou na resistência do solo à penetração somente na camada de 0,05 a 0,10 m de profundidade;

O solo foi considerado como compactado após dez passadas com o rodado do trator agrícola na camada de 0,10 a 0,20 m de profundidade, mantendo-se compactado depois da colheita das cultivares.

O fator passada influenciou no estado de compactação do solo, depois das passadas com o rodado do trator agrícola, quando determinado por meio da resistência que o solo apresentou à placa, medida pelo ponto de pré-consolidação do solo.

Na resistência do solo à placa, o ponto de pré-consolidação aumentou de acordo com o aumento do número de passadas do rodado do trator agrícola. Esse ponto é mais acentuado para dez passadas do rodado do trator agrícola, no entanto, o tempo entre a semeadura e a colheita das culturas

reduziu o ponto de pré-consolidação e, conseqüentemente, o nível de compactação do solo.

Depois das passadas com o rodado do trator agrícola, a densidade do solo é estatisticamente igual para as culturas da soja e do feijão. A densidade do solo com cinco e dez passadas do rodado do trator agrícola também é igual.

Teores de água no solo acima de 35% deixam o solo mais suscetível à compactação.

## REFERÊNCIAS

ALAKUKU, L.; ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 36, p. 141-152, 1995.

ALEXANDROU, A.; EARL, R. In situ determination of the pré-compaction stress os a soil. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London v. 61, n.1, p. 67-72, 1995.

ALVARENGA, C. R.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 319-326, 1996.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 1, p. 27-34, 2004.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Procedured for using and repoting data obtainer with the soil cone penetrometer. In: **ASAE Standards**, 1999. Standards engineering practices data. 46. ed. St. Joseph, 1999. p.991-3 (ASAE EP542).

ANDREOLLA, V. R. M. Demanda de potência de uma semeadora com dois tipos de sulcadores em áreas compactadas pelo pisoteio de animais no sistema integração lavoura-pecuária. 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2005.

ASHBURNER, J. E.; SIMS, B. G. Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. San José: IICA, 1984. 437 p.

BALL, B. C.; CAMPBELL, D. J.; DOUGLAS, J. T.; HENSHALL, J. K.; O'SULLIVAN, M. F. Soil structural quality, compaction and land management. Europa. **Soil Science**, Baltimore, v. 48, n. 4, p. 593-601, 1997.

BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I. C. B. Avaliações das propriedades físicas em Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto por dois anos consecutivos. **Sanare**, Curitiba, v.17, .p.94-101, 2002.

BLACK, C. A. (ed). Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison: **American Society of Agronomy**, 1965. 770 p.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 581-588, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em latossolos. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 191-199, mai. 2002.

BEULTER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.

BONINI, A. K. **Compactação de um latossolo vermelho distroférico sob sistema plantio direto e rendimento de grãos de trigo, soja e milho**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

BREDA, A. C. **Desenvolvimento de um penetrômetro de placa de aço e avaliação em campo da compactação do solo**. 2003. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2003.

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

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

CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING CONFERENCE, 1, Cambridge, 1936. **Proceedings...** Cambridge: ICSMFE, 1936, v. 3. p. 60-64.

CENTURION, J. F.; CARDOSO, J. P.; NATALE, W. Efeito de formas de manejo em algumas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho em diferentes agroecossistemas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 254-258, 2001.

CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J. SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n.3, p. 323-327, 1983.

DAWIDOWSKI, J. B.; MORRISON JUNIOR, J. E.; SNIEG, M. Measurement of soil strength with plate sinkage and uniaxial confined methods. **Transactions of the American Society of Agriculture Engineers**, St. Joseph, v. 44, n. 5, p. 1059-1064, 2001.

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

DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KOPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil**: Sistema de cobertura do solo, plantio direto e preparo convencional do solo. IAPAR: Paraná, Brasil, 1991. 270 p.

DIAS JUNIOR, M. S.; MIRANDA, E. E. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de lavras (MG). **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 24, n. 2, p. 337-346, 2000.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating pre-consolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v.8, n.2, p.139-151, 1995.

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

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under longterm tillage and heel traffic**. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114 p. (Tese de Doutorado).

DURUOHA, C. **Desenvolvimento do sistema radicular da Cana-De-Açúcar (*Saccharium Spp*) em função da compactação, do teor de água e do tipo de solo**. 2000. Mestrado (Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2000.

ELTZ, F. L. F. Ensino de plantio direto. In: PEIXOTO, R. T. O.; AICRENS, D. C.; SAMAICA, M. J. **Plantio direto**: o caminho para uma agricultura sustentável. Ponta Grossa: IAPAR- PRP/PG, 1997. p. 39-42.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 1997. 99 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FURLANI, C. E. A.; LOPES, A.; SILVA, R. P. Avaliação de semeadora-adubadora de precisão trabalhando em três sistemas de preparo do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 458-464, 2005.

GOEDERT, W. J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 223-227, fev. 2002.

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

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

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

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

IMHOFF, S. C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 104 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2002.

KONCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; BERTON, A. L. **Compactação e descompactação de solos**. Passo Fundo, Embrapa Trigo, 2000. 20 p.

KONDO, M. K. **Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos**. 1998. 95 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 1998.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 211-218, 1999.

LAFOND, J.; ANGERS, D. A.; LAVERDIERE, M. R. Compression characteristics of a clay soil as influenced by crops and sampling dates. **Soil Tillage Research**, Michigan, v. 22, p. 233-241, 1992.

LAMB, J. R.; PEREIRA, J. O.; BRACARENSE, J. C.; SILVA, S. L.; MICHELS, R. N. Sistema de informação para filtragem de dados utilizados com penetrômetro de placa na determinação da compactação do solo. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35. João Pessoa, Paraíba, 2006. **Anais...** João Pessoa, Paraíba: SBEA, 2006.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.6, p.1127-1132, 1980.

LOWERY, B.; SCHULER, T. T. Duration and effects of compaction on soil and plant growth in Wisconsin. **Soil Tillage Research**, Auburn, v. 29, p. 205-210, 1994.

MACHADO, A. L. T.; REIS, A. V.; FERREIRA, M. F. P.; MACHADO, R. L. T.; MACHADO, A. L. C.; BAUER, G. B.; **Revista Brasileira Agrocência**, Pelotas, v. 11, n. 4, p. 481-486, 2005.

MASCHIO, J. **Plantio direto consolida revolução no campo**. Ilha Solteira - SP: Faculdade de Ilha Solteira - UNESP. Departamento de fitossanidade e engenharia rural de solos. Disponível em: [www.agr.feis.unesp.br/](http://www.agr.feis.unesp.br/). Acesso em: 6 abr. 2005.

MERCANTE, E. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1149-1159, 2003.

OHU, J. O.; FOLORUNSO, O. A. The effect of machinery traffic on the physical properties of a sandy loam soil and the yield of sorghum in North-Eastern Nigeria. **Soil Tillage Reserch**. Michigan, v. 29, p. 399-405, 1989.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrofico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Planaltina-DF, v.38, n.2, p. 291-299. 2002.

PEDROTTI, A.; VAHL, L. C.; PAULETTO, E. A. Níveis de compactação do planossolo e o desenvolvimento radicular de algumas culturas. REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 22, 1998, Fortaleza - CE. **Resumo expandido**. Fortaleza – CE: SBCS, 1998. p. 89-90.

PEREIRA, J. O. **Efeito do tamanho de agregados, do teor de água e da intensidade de carga aplicada na compactação e resistência à tração de uma terra roxa estruturada**. 1996, 114 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu 1996.

PRADO, R. M.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z. M. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho estrófico em cultivo intensivo e passivo. **Pesquisa. Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 37, n. 12, p. 1795-1801, dez. 2002.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: UFPR, 1996. 44 p.



PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: agricultura em regiões tropicais**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 1990. 549 p.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. **Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado**. Santa Maria: Palloti, 2001, p. 114-133. v. 1.

SCHAFFER, R. L.; JOHNSON C. E.; KOOLEN, A. J.; GUPTA, S. C.; HORN, R. Future research needs in soil compaction. **Presented at the International Summer Meeting of the American Society of Agricultural Engineers**, Columbus, Ohio, USA. 1990. p. 24-27.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. 2003. 108 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2003.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 797-804, 2004.

SHAFIQ, M.; HASSAN, A.; ARMAD, S. Soil physical properties as influenced by induced compaction under laboratory and field conditions. **Soil and Tillage Research**. Michigan, v. 29, p. 13-22, 1994.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 113-117, 1997.

SILVA, R. B. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. 2000. 142 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2000.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Susceptibilidade a compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, p. 239-249, 2000.

SOANE, B. D. Traction and transport systems as related to cropping systems. **On Soil Dynamics**, Album, v. 5, p. 863-935. 1985.

SOANE, B.D. & VAN OUWERKERK, C. Soil compaction problems in World agriculture. In: edit. SOANE, B.D. & VAN OUWERKERK, C Soil Compaction in Crop production. **Developments in Agricultura Engineering** 11, Elsevier, 1994, 662 p.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 533-542, 2004.

STOLF, R. **Recomendação para uso do penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar – Stolf**. São Paulo: MIC/IAA/PNMCA – Planalsucar, 1983. 8 p. (Série Penetrômetro de Impacto – Boletim, 1)

SWAN, J. B.; MONCRIEF, J. F.; VOOHEES, W. B. **Soil compaction causes, effects, and control**. St. Paul: University of Minnesota, 1987. Agriculture Bulletin, 3115.

TIEPPO, R. C. **Desenvolvimento de um penetrômetro manual eletrônico**. 2004. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agroindustriais) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2004.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 333-339, 1996.

TORMENA, C. A., SILVA, A. P. LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 573-577, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58 p.

UNGER, P. W. Soil bulk density, penetration resistance, and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions. **Soil Tillage Research**, Michigan, v. 37, p. 67-75, 1996.

VAN DEN AKKER, J. J. H. Construction of a wheel-load bearing capacity map of the Netherlands. In: BIBLIOTECA FRAGMENTA AGRONOMICA – ISTRO CONFERENCE, 14., Pulawy, 1997. **Proceedings...** Pulawy. Polish Society of Agrotechnical Sciences, 1997. p. 15-18.

WHITELEY, G. M.; UTOMO, W.H.; DEXTER, A. R. A comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots. *Plant Soil*, **The Hague**, v. 61, p. 351-364, 1981.

## **ANEXOS**

**ANEXO A - RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO – RSP (MPa), RESISTÊNCIA DO SOLO À PRESSÃO DA PLACA – RSPP (kPa), DENSIDADE DO SOLO – DS (Mg.m<sup>-3</sup>) E TEOR DE ÁGUA NO SOLO – UMID (%) - ANTES DAS PASSADAS COM O RODADO DO TRATOR**

Resistência do solo à penetração – RSP (MPa), Resistência do solo à pressão da placa – RSPP (kPa), Densidade do solo – DS (Mg.m<sup>-3</sup>) e Teor de água no solo – UMID (%) - Tratamento 1 – Antes das passadas com o rodado do trator

Variáveis	n	Média	Desv. Pad.	Variância	Coef. Var
RSP 0 - 0,05	5	1,469	0,370	0,137	25,226
RSP 0,05 - 0,10	5	1,127	0,313	0,098	27,822
RSP 0,10 - 0,15	5	1,350	0,306	0,094	22,709
RSP 0,15 - 0,20	5	1,249	0,413	0,171	33,072
RSP 0,20 - 0,25	5	1,308	0,230	0,053	17,582
RSP 0,25 - 0,30	5	1,097	0,247	0,061	22,502
RSP 0,30 - 0,35	5	0,977	0,123	0,015	12,548
RSP 0,35 - 0,40	5	1,142	0,186	0,035	16,328
RSPP	4	152,000	52,580	2764,667	34,592
DENSIDADE	4	1,045	0,034	0,001	3,269
UMIDADE	4	27,550	1,067	1,139	3,873

Resistência do solo à penetração – RSP (MPa), Resistência do solo à pressão da placa – RSPP (kPa), Densidade do solo – DS (Mg.m<sup>-3</sup>) e Teor de água no solo – UMID (%) - Tratamento 2 – Antes das passadas com o rodado do trator

Variáveis	n	Média	Desv. Pad.	Variância	Coef. Var
RSP 0 - 0,05	5	1,302	0,259	0,067	19,893
RSP 0,05 - 0,10	5	0,921	0,318	0,101	34,479
RSP 0,10 - 0,15	5	1,287	0,447	0,199	34,708
RSP 0,15 - 0,20	5	1,212	0,590	0,348	48,682
RSP 0,20 - 0,25	5	1,436	0,695	0,482	48,371
RSP 0,25 - 0,30	5	1,239	0,525	0,276	42,391
RSP 0,30 - 0,35	5	1,240	0,376	0,141	30,313
RSP 0,35 - 0,40	5	1,154	0,381	0,145	33,035
RSPP	4	164,500	60,830	3700,333	36,979
DENSIDADE	4	1,005	0,039	0,001	3,854
UMIDADE	4	27,710	2,046	4,188	7,385

Resistência do solo à penetração – RSP (MPa), Resistência do solo à pressão da placa – RSP (kPa), Densidade do solo – DS ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ) e Teor de água no solo – UMID (%) - Tratamento 3 – Antes das passadas com o rodado do trator

Variáveis	n	Média	Desv. Pad.	Variância	Coef. Var
RSP 0 - 0,05	5	0,799	0,315	0,099	39,398
RSP 0,05 - 0,10	5	1,069	0,129	0,017	12,062
RSP 0,10 - 0,15	5	1,388	0,424	0,180	30,593
RSP 0,15 - 0,20	5	1,374	0,284	0,081	20,691
RSP 0,20 - 0,25	5	1,188	0,241	0,058	20,262
RSP 0,25 - 0,30	5	1,098	0,185	0,034	16,833
RSP 0,30 - 0,35	5	0,984	0,205	0,042	20,813
RSP 0,35 - 0,40	5	0,963	0,448	0,201	46,531
RSP	4	160,250	44,463	1976,917	27,746
DENSIDADE	4	1,080	0,014	0,000	1,309
UMIDADE	4	25,433	2,384	5,685	9,376

Resistência do solo à penetração – RSP (MPa), Resistência do solo à pressão da placa – RSP (kPa), Densidade do solo – DS ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ) e Teor de água no solo – UMID (%) - Tratamento 4 – Antes das passadas com o rodado do trator

Variáveis	n	Média	Desv. Pad.	Variância	Coef. Var
RSP 0 - 0,05	5	1,213	0,267	0,071	21,981
RSP 0,05 - 0,10	5	1,133	0,549	0,301	48,462
RSP 0,10 - 0,15	5	1,028	0,378	0,143	36,751
RSP 0,15 - 0,20	5	1,023	0,357	0,128	34,933
RSP 0,20 - 0,25	5	1,080	0,165	0,027	15,273
RSP 0,25 - 0,30	5	1,184	0,133	0,018	11,257
RSP 0,30 - 0,35	5	0,950	0,353	0,125	37,166
RSP 0,35 - 0,40	5	1,072	0,551	0,303	51,374
RSP	4	167,250	48,197	2322,917	28,817
DENSIDADE	4	1,030	0,043	0,002	4,195
UMIDADE	4	23,978	0,527	0,277	2,197

Resistência do solo à penetração – RSP (MPa), Resistência do solo à pressão da placa – RSPP (kPa), Densidade do solo – DS ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ) e Teor de água no solo – UMID (%) - Tratamento 5 – Antes das passadas com o rodado do trator

Variáveis	n	Média	Desv. Pad.	Variância	Coef. Var
RSP 0 - 0,05	5	1,247	0,104	0,011	8,340
RSP 0,05 - 0,10	5	1,514	0,281	0,079	18,534
RSP 0,10 - 0,15	5	1,457	0,356	0,126	24,407
RSP 0,15 - 0,20	5	1,494	0,597	0,357	39,959
RSP 0,20 - 0,25	5	1,417	0,577	0,333	40,708
RSP 0,25 - 0,30	5	1,342	0,524	0,275	39,093
RSP 0,30 - 0,35	5	0,875	0,491	0,241	56,088
RSP 0,35 - 0,40	5	0,930	0,113	0,013	12,133
RSPP	4	169,500	13,988	195,667	8,253
DENSIDADE	4	0,948	0,041	0,002	4,341
UMIDADE	4	28,035	0,454	0,206	1,620

Resistência do solo à penetração – RSP (MPa), Resistência do solo à pressão da placa – RSPP (kPa), Densidade do solo – DS ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ) e Teor de água no solo – UMID (%) - Tratamento 6 – Antes das passadas com o rodado do trator

Variáveis	n	Média	Desv. Pad.	Variância	Coef. Var
RSP 0 - 0,05	5	1,478	0,293	0,086	19,812
RSP 0,05 - 0,10	5	1,456	0,244	0,059	16,745
RSP 0,10 - 0,15	5	1,715	0,474	0,225	27,656
RSP 0,15 - 0,20	5	1,383	0,163	0,026	11,754
RSP 0,20 - 0,25	5	1,482	0,176	0,031	11,903
RSP 0,25 - 0,30	5	1,117	0,378	0,143	33,795
RSP 0,30 - 0,35	5	1,403	0,259	0,067	18,485
RSP 0,35 - 0,40	5	1,617	0,132	0,017	8,175
RSPP	4	144,250	46,715	2182,250	32,384
DENSIDADE	4	1,050	0,039	0,002	3,729
UMIDADE	4	30,678	5,441	29,603	17,736

Resistência do solo à penetração – RSP (MPa), Resistência do solo à pressão da placa – RSPP (kPa), Densidade do solo – DS ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ) e Teor de água no solo – UMID (%) - Tratamento 7 – Antes das passadas com o rodado do trator

Variáveis	n	Média	Desv. Pad.	Variância	Coef. Var
RSP 0 - 0,05	5	1,739	0,489	0,239	28,135
RSP 0,05 - 0,10	5	1,575	0,587	0,345	37,290
RSP 0,10 - 0,15	5	1,628	0,638	0,407	39,177
RSP 0,15 - 0,20	5	1,777	0,497	0,247	27,942
RSP 0,20 - 0,25	5	1,611	0,535	0,287	33,224
RSP 0,25 - 0,30	5	1,745	0,737	0,543	42,233
RSP 0,30 - 0,35	5	1,255	0,552	0,305	44,002
RSP 0,35 - 0,40	5	1,223	0,371	0,138	30,351
RSPP	4	165,250	45,988	2114,917	27,829
DENSIDADE	4	1,123	0,013	0,000	1,121
UMIDADE	4	28,730	1,739	3,024	6,053

Resistência do solo à penetração – RSP (MPa), Resistência do solo à pressão da placa – RSPP (kPa), Densidade do solo – DS ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ) e Teor de água no solo – UMID (%) - Tratamento 8 – Antes das passadas com o rodado do trator

Variáveis	n	Média	Desv. Pad.	Variância	Coef. Var
RSP 0 - 0,05	5	1,208	0,533	0,284	44,116
RSP 0,05 - 0,10	5	1,530	0,404	0,163	26,411
RSP 0,10 - 0,15	5	1,673	0,336	0,113	20,103
RSP 0,15 - 0,20	5	1,542	0,303	0,092	19,677
RSP 0,20 - 0,25	5	1,490	0,193	0,037	12,938
RSP 0,25 - 0,30	5	1,564	0,190	0,036	12,128
RSP 0,30 - 0,35	5	1,309	0,408	0,166	31,147
RSP 0,35 - 0,40	5	1,542	0,168	0,028	10,861
RSPP	4	179,500	53,245	2835,000	29,663
DENSIDADE	4	1,025	0,026	0,001	2,581
UMIDADE	4	27,185	1,333	1,776	4,903

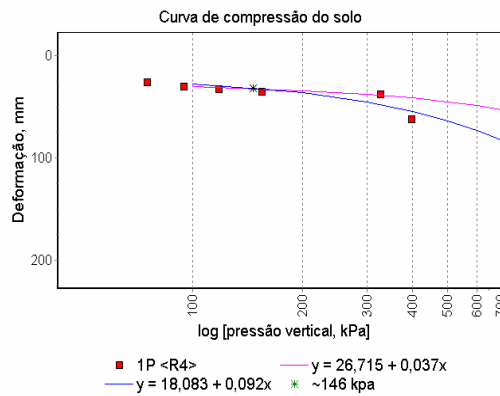
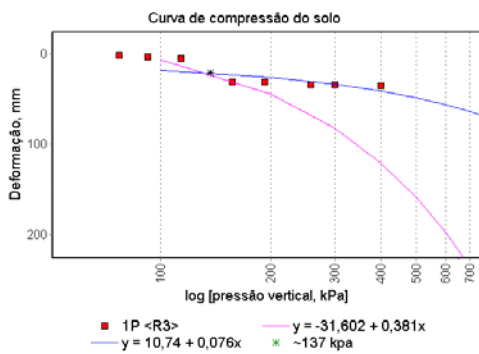
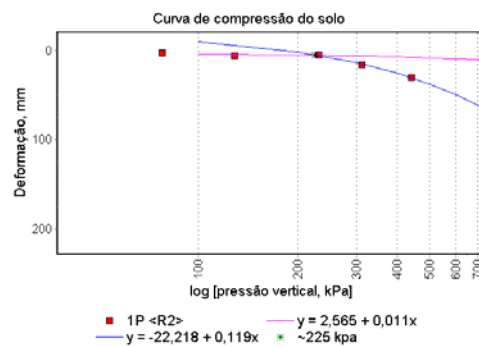
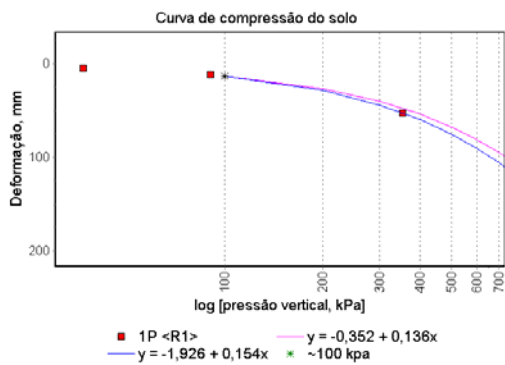
Resistência do solo à penetração – RSP (MPa), Resistência do solo à pressão da placa – RSPP (kPa), Densidade do solo – DS ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ) e Teor de água no solo – UMID (%) - Tratamento 9 – Antes das passadas com o rodado do trator

Variáveis	n	Média	Desv. Pad.	Variância	Coef. Var
RSP 0 - 0,05	5	1,068	0,585	0,342	54,778
RSP 0,05 - 0,10	5	1,693	0,308	0,095	18,177
RSP 0,10 - 0,15	5	1,652	0,383	0,146	23,169
RSP 0,15 - 0,20	5	1,298	0,425	0,181	32,752
RSP 0,20 - 0,25	5	1,975	0,349	0,122	17,656
RSP 0,25 - 0,30	5	1,524	0,294	0,086	19,286
RSP 0,30 - 0,35	5	1,876	0,394	0,155	21,016
RSP 0,35 - 0,40	5	1,520	0,617	0,380	40,561
RSPP	4	175,250	18,464	340,917	10,536
DENSIDADE	4	1,093	0,031	0,001	2,834
UMIDADE	4	27,550	1,519	2,307	5,513

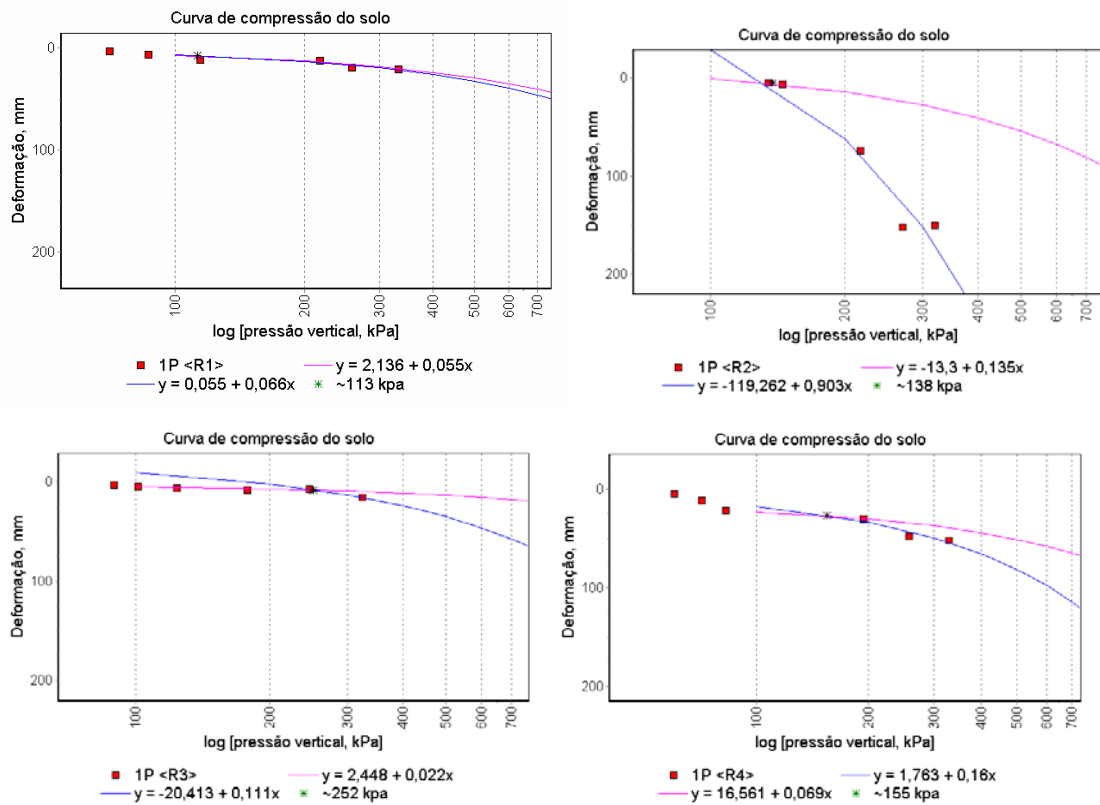


## ANEXO B - CURVAS DE COMPRESSÃO DO SOLO PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA DO SOLO À PRESSÃO DA PLACA – RSP - PENETRÔMETRO DE PLACA

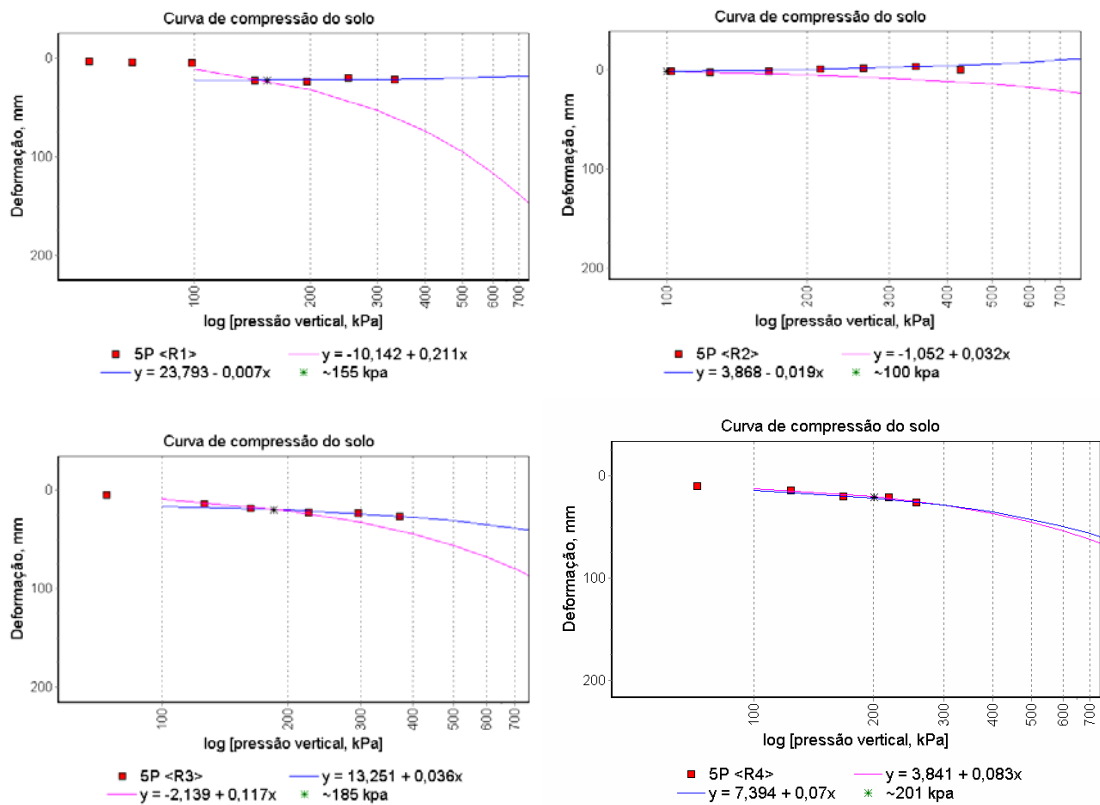
Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T1 – Antes passadas.



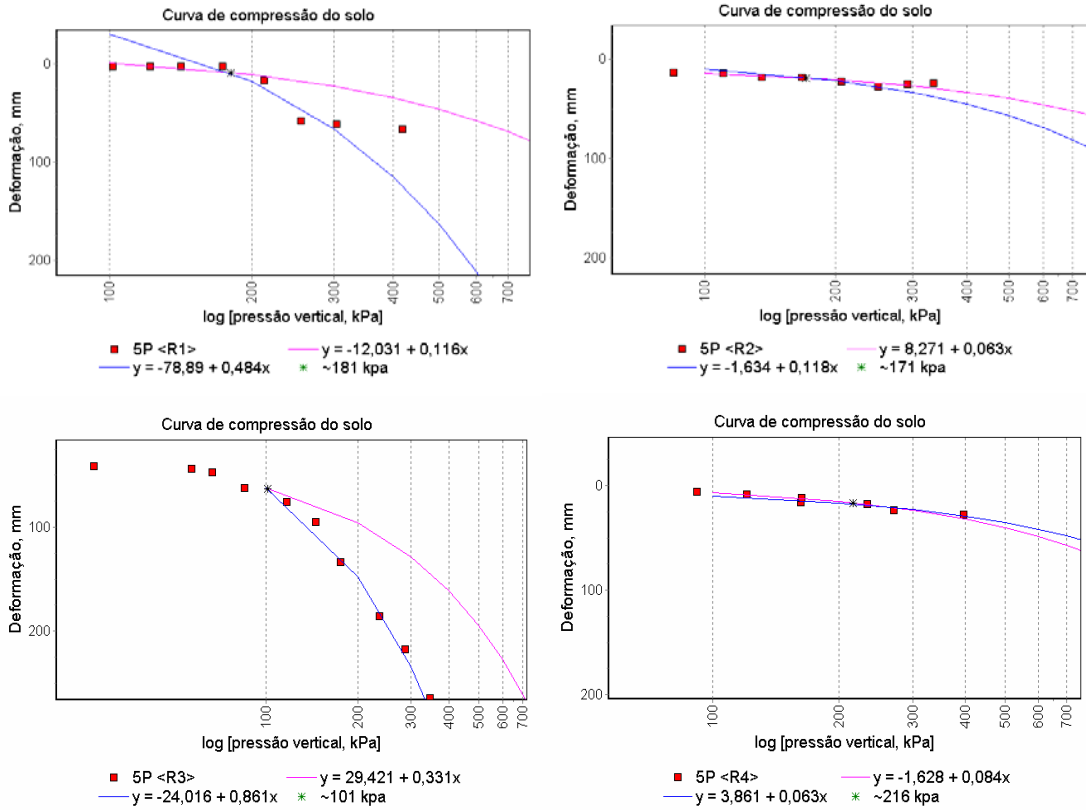
Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T2 – Antes passadas.



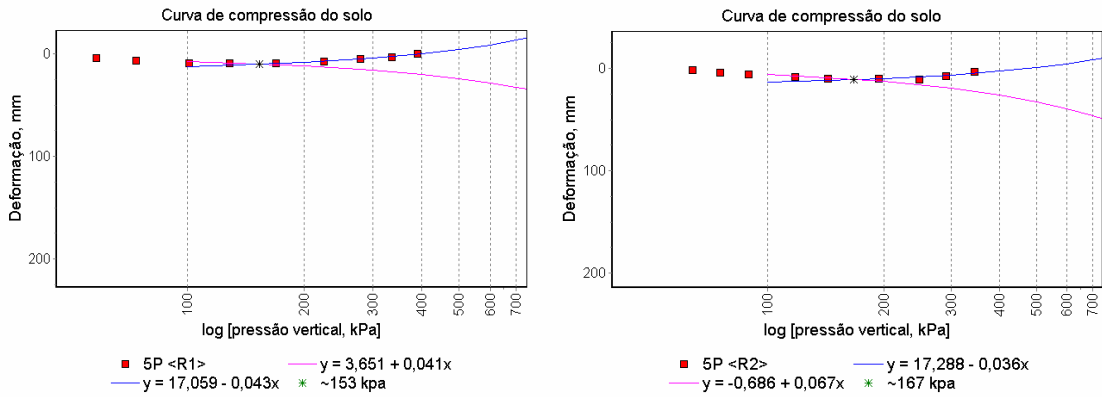
Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T3 – Antes passadas.

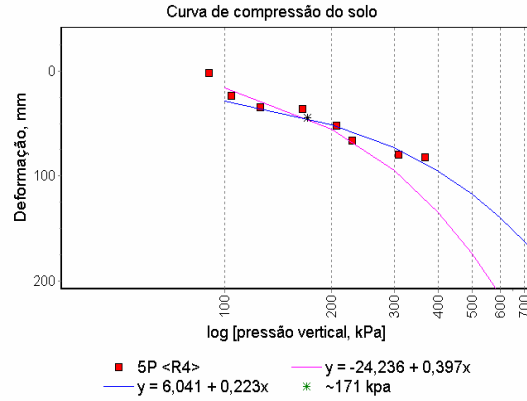
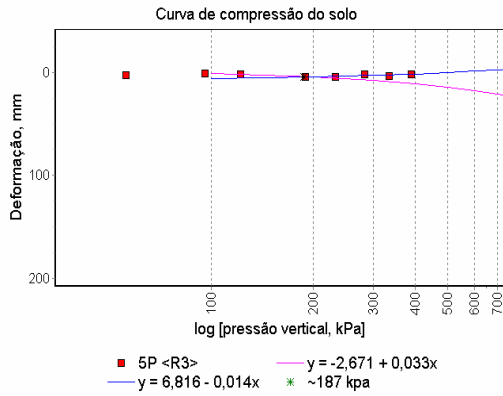


Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T4 – Antes passadas.

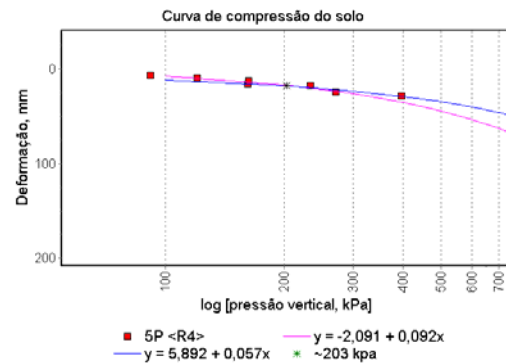
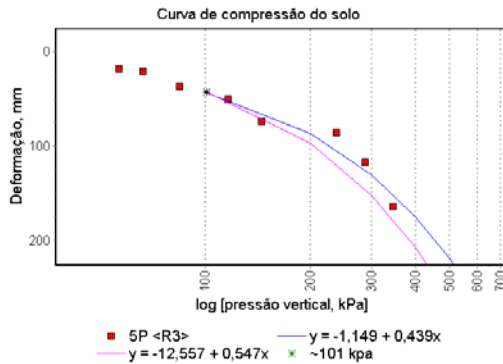
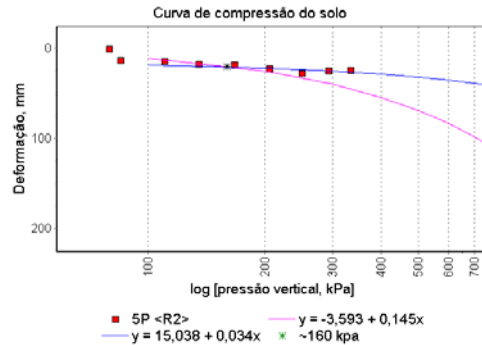
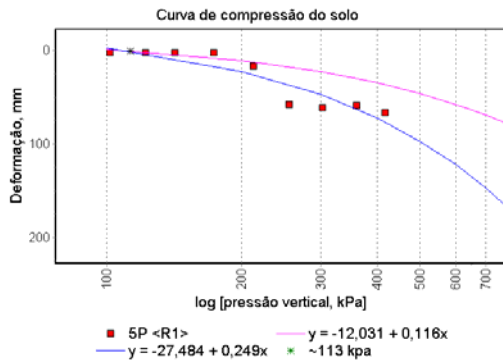


Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T5 - Antes passadas.

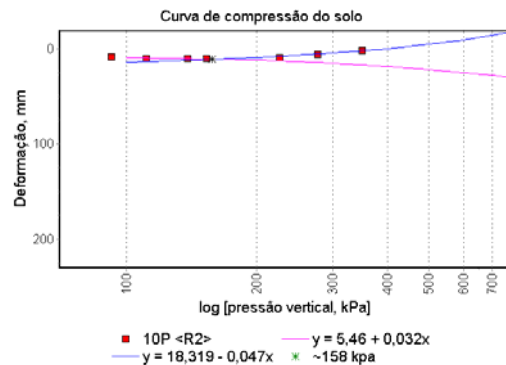
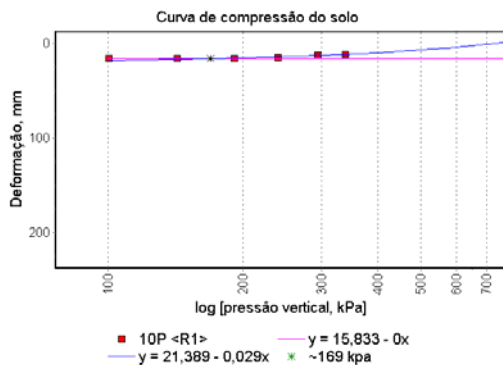


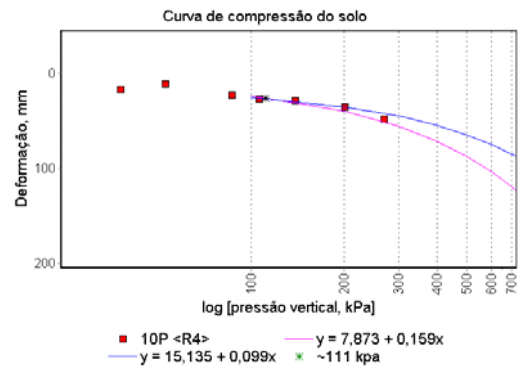
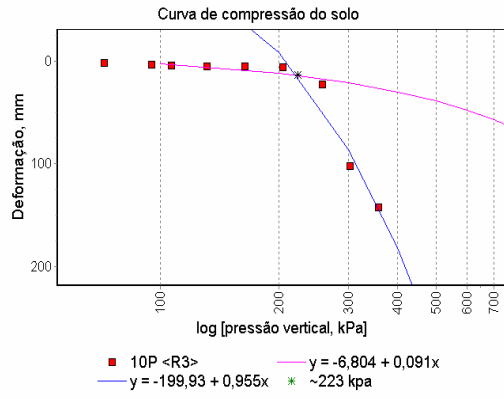


Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T6 – Antes passadas.

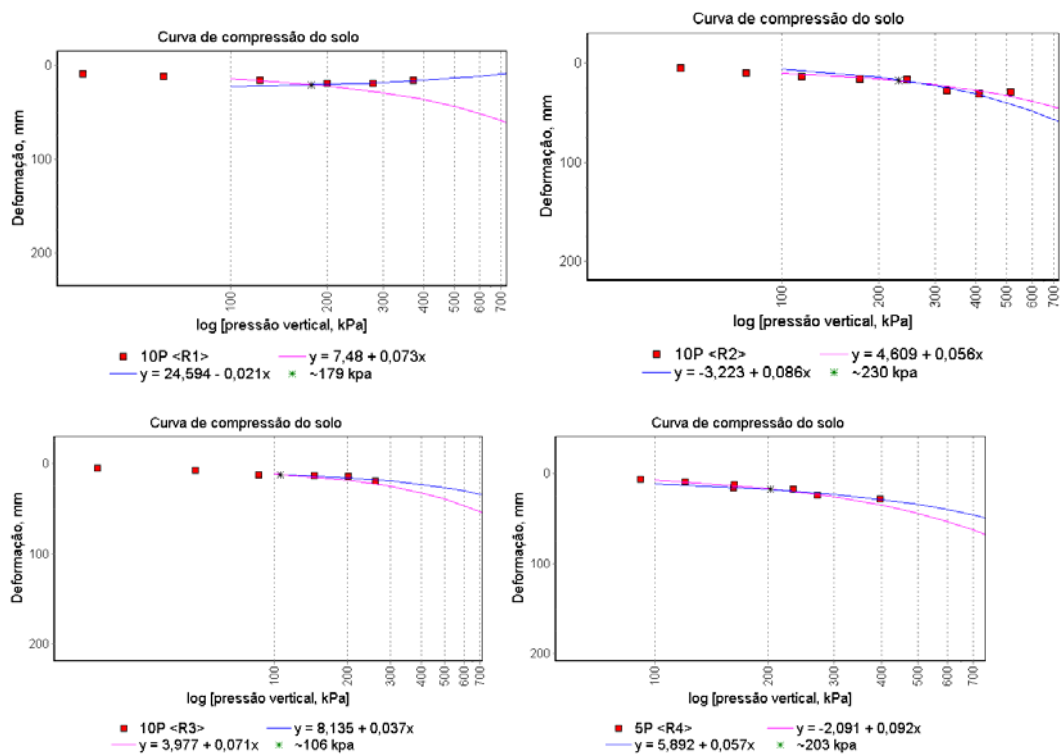


Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T7 – Antes passadas.

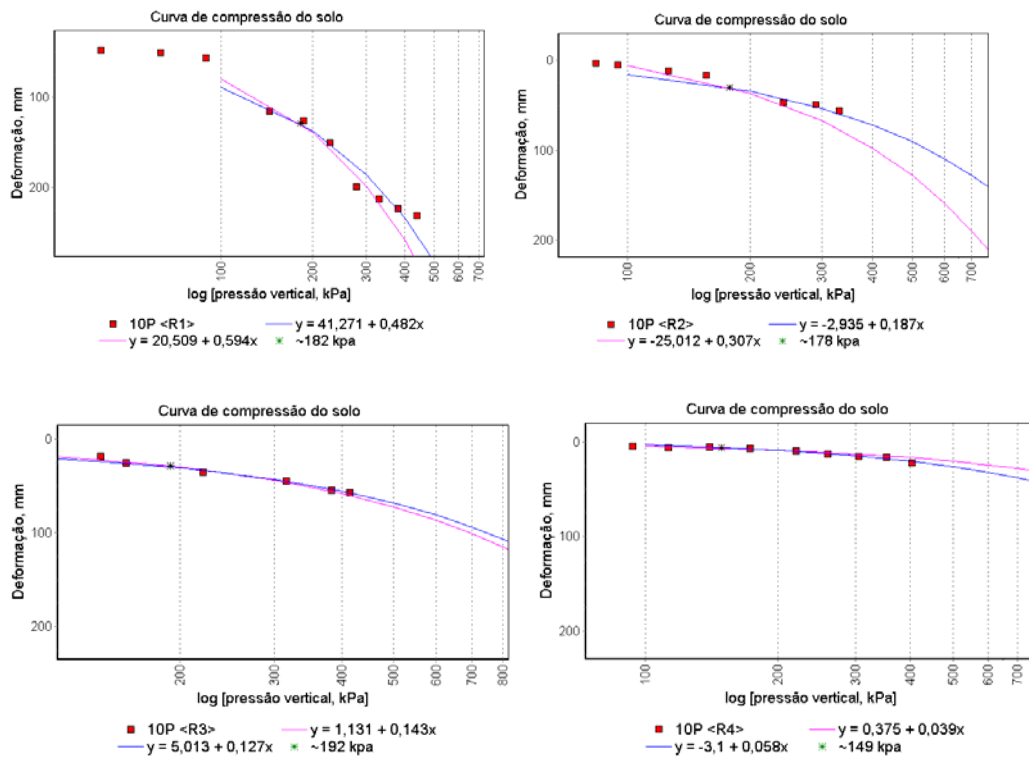




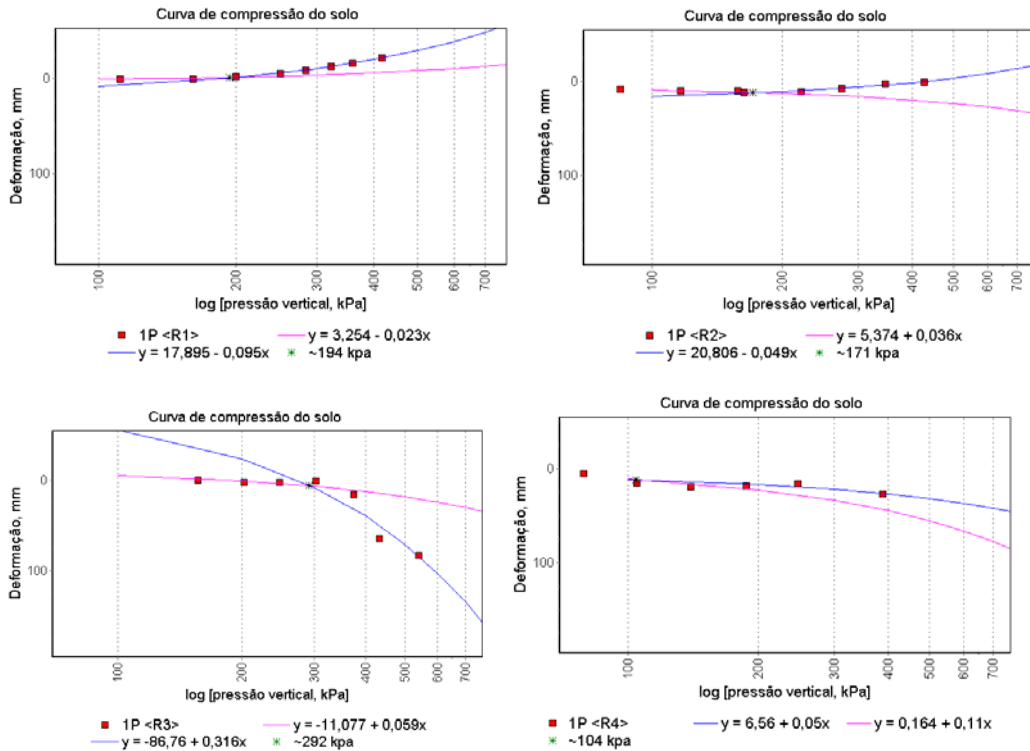
Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T8 – Antes passadas.



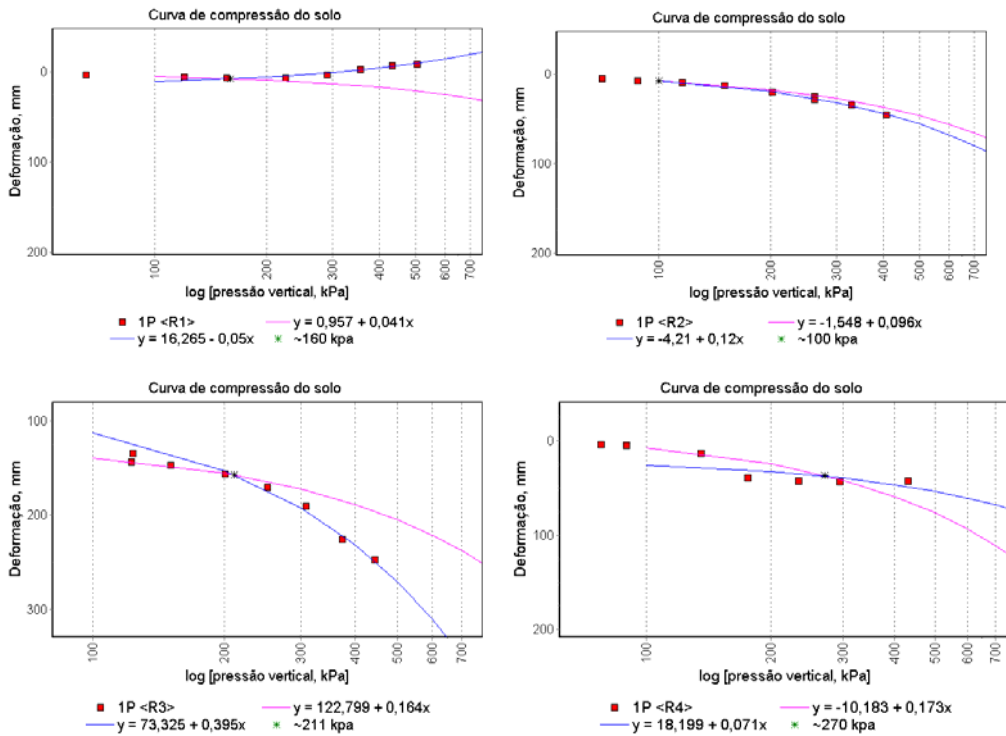
Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T9 – Antes passadas.



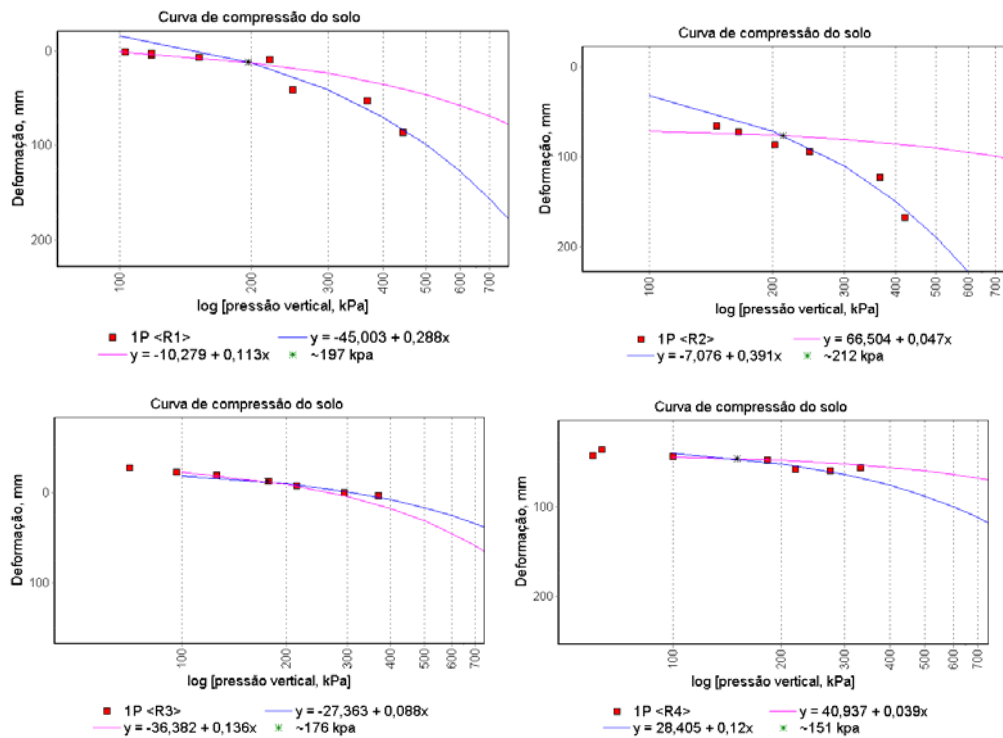
Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T1 – Depois das passadas.



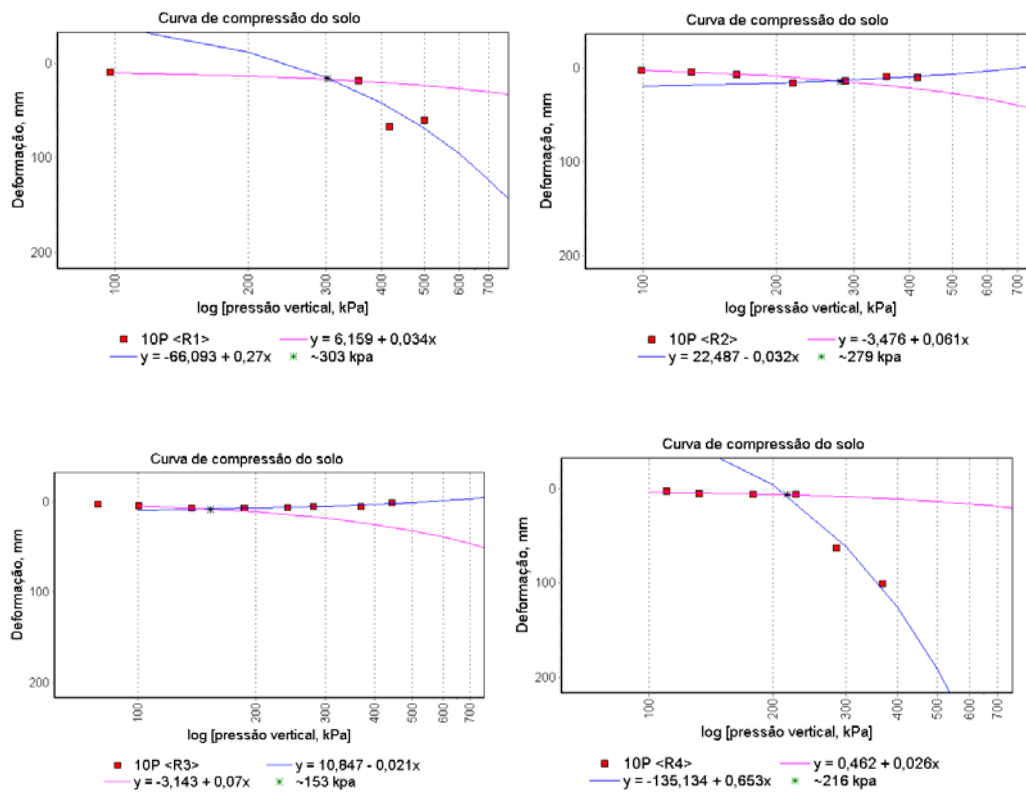
Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T2– Depois das passadas.



Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T3 – Depois das passadas.

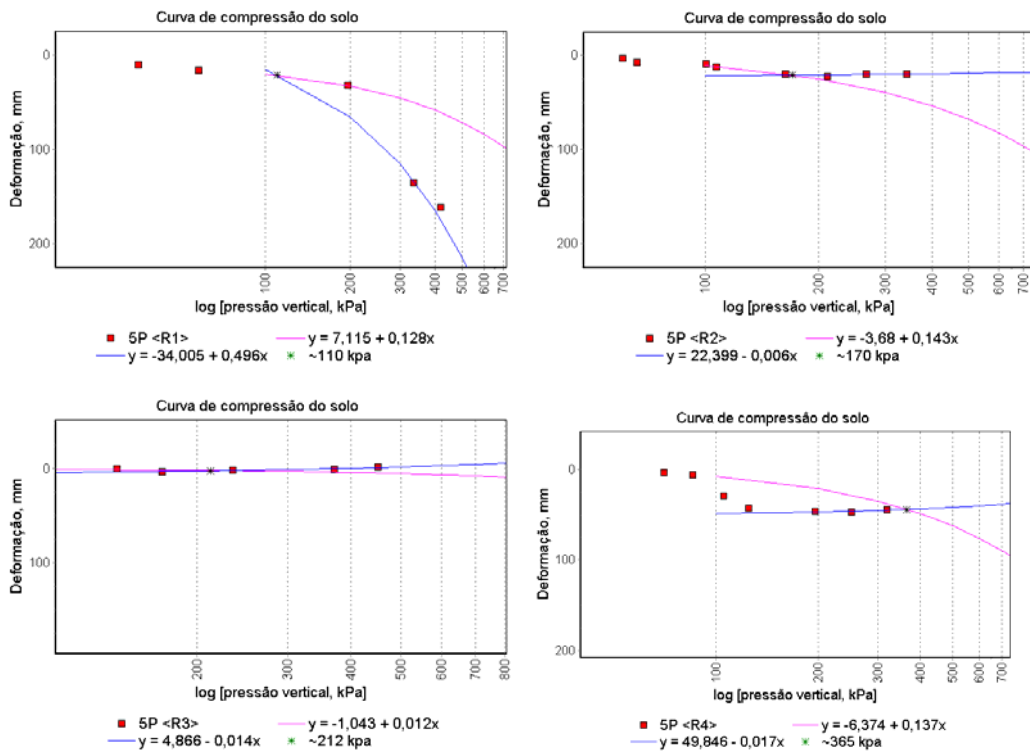


Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T4 – Depois das passadas.

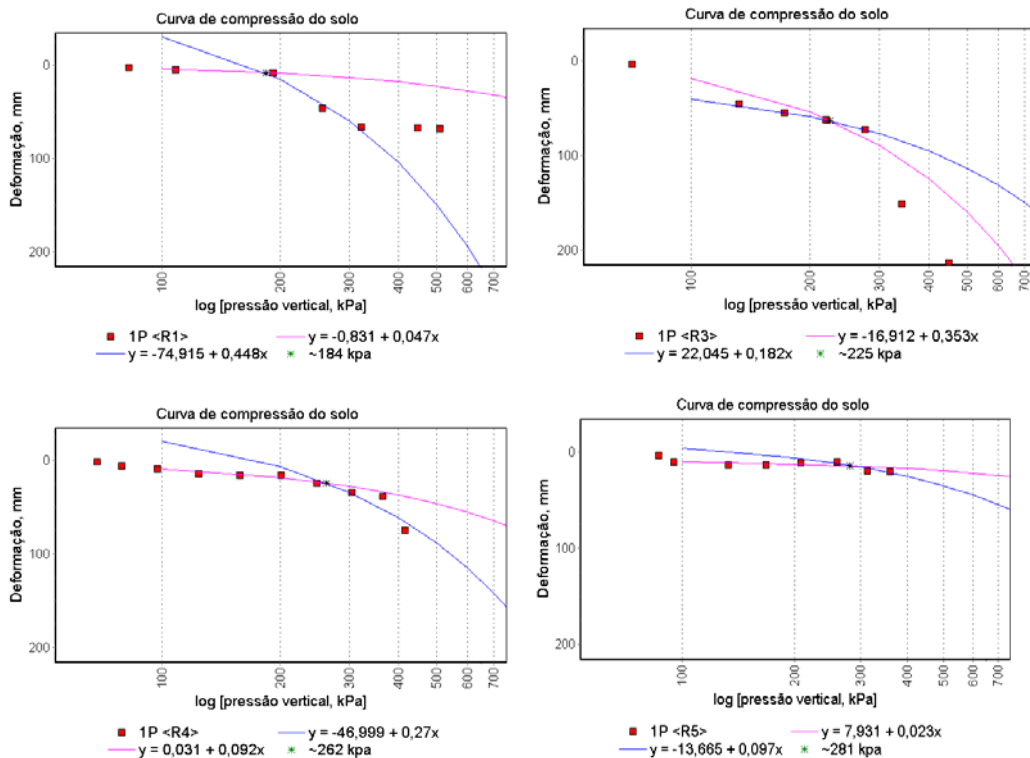




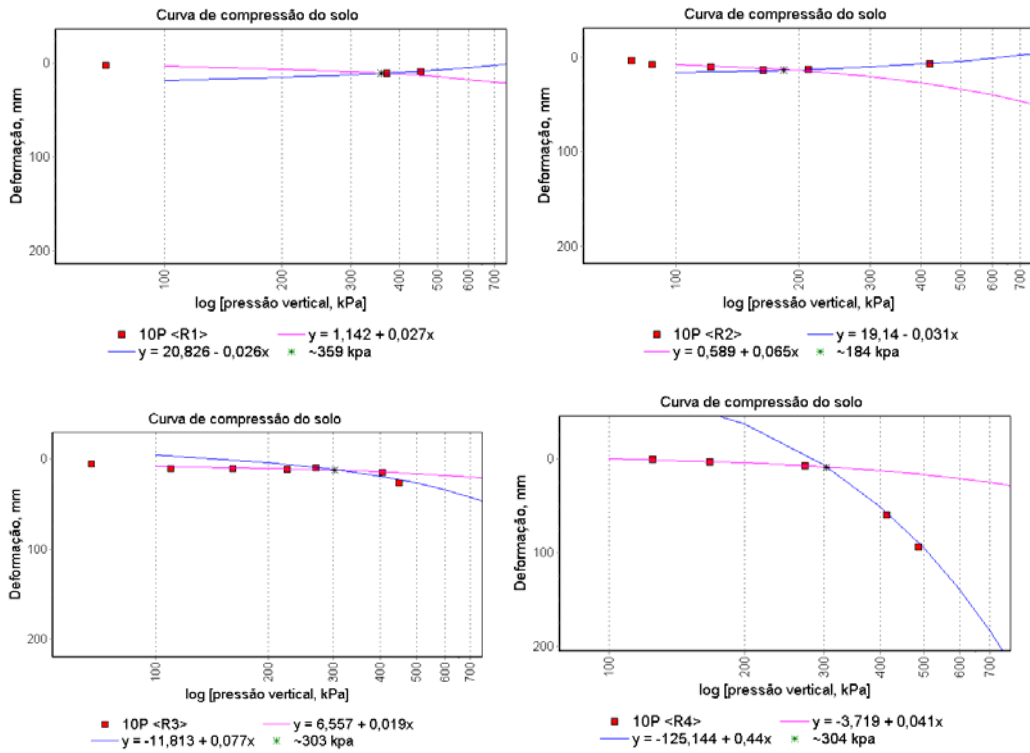
Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T5– Depois das passadas.



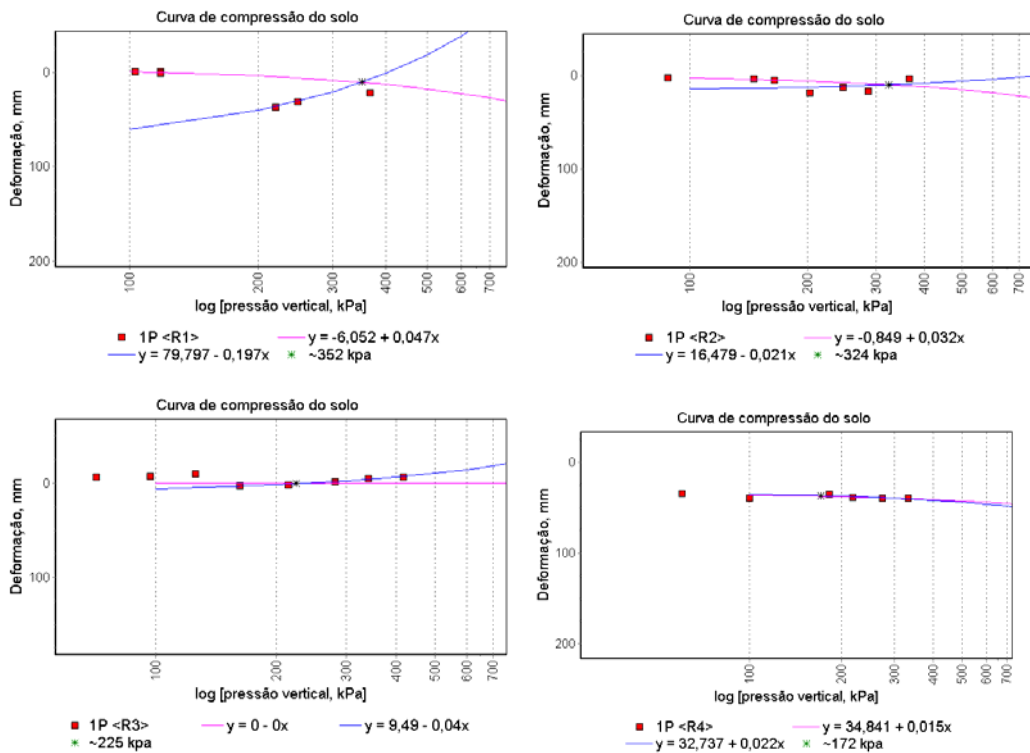
Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T6 – Depois das passadas.



Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T7 – Depois das passadas.



Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T8 – Depois das passadas.



Gráficos das curvas de compressão do solo nas quatro repetições para T9 – Depois das passadas.

