

## **4. Estudo II. EFEITO DE PALHA DE MILHO NA SUPERFÍCIE DO SOLO NO TRÁFEGO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS E COMPACTAÇÃO MÁXIMA E RELATIVA DO SOLO COM ENSAIO DE PROCTOR**

### **4.1. Introdução**

#### **4.1.1. Ensaio de Proctor**

A sustentabilidade do solo a uma compactação está na definição de quando o solo está com um teor de água adequado para a realização de operações com máquinas agrícolas, e estimar o quanto de deformação ocorrerá nele quando são aplicadas cargas superiores à capacidade de suporte do solo (Dias Junior & Pierce, 1996).

Na agricultura, infelizmente têm-se atividades como a aplicação de agroquímicos no combate de pragas e doenças ou a colheita, não permitido que o agricultor faça as aplicações ou realize a colheita somente quando o solo está em condições adequadas de umidade. O desenvolvimento de máquinas com um menor potencial para a compactação do solo é uma alternativa para reduzir os danos da compactação (Braida, 2004)

Em estudos de compactação do solo realizados com diferentes teores de matéria orgânica, avaliados pelo ensaio de Proctor, observou-se que quanto maior o teor de matéria orgânica menor a compactação. Observa-se que, para um mesmo solo, com um mesmo nível de energia, quanto maior o teor de matéria orgânica, menor é o valor de densidade, e maior o teor de água necessário para a compactação máxima (Ball et al., 2000; Aragon et al., 2000).

Em estudo com diferentes solos de mesma textura e teores de matéria orgânica Silva et al. (1986) encontraram uma menor densidade quanto maior o teor de matéria orgânica. Em estudos com a adição de material semi decomposto, Stone & Ekwue (1993) e Zhang et al. (1997) também encontraram uma menor densidade com o aumento de material.

Os autores dizem que isso ocorre por diversas razões, sendo que a matéria orgânica tem um efeito amortecedor, o que resulta em dissipação de parte da

energia aplicada sobre o solo. A matéria orgânica tem alta capacidade de retenção de água e, quando retida às suas partículas, impede que a mesma atue como lubrificante entre as partículas minerais do solo, e a baixa densidade da matéria orgânica, sendo que quanto maior o teor de matéria orgânica reduz a densidade da mistura solo matéria orgânica.

Em solo com diferentes teores de matéria orgânica, para um mesmo nível de tráfego de máquina, a produção foi maior nos solos com maiores teores de matéria orgânica em estudo de Arvidsson (1998).

Para se avaliar a susceptibilidade do solo à compactação pode-se utilizar o ensaio de Proctor Normal. O teste foi desenvolvido pela engenharia civil para poder determinar a umidade ótima para obter-se a máxima compactação do solo na construção de estradas (Vargas, 1977).

No ensaio de Proctor a compactação depende da umidade do solo, no momento da execução para uma mesma energia aplicada. Plotando vários valores em diferentes umidades, chega-se ao ponto máximo de compactação, ou densidade máxima. A partir de uma certa umidade, em que a compactação é máxima, a adição de água resulta em que a mesma venha a ocupar os espaços existentes entre as partículas do solo, o que produz o surgimento de pressões neutras, tornando o solo menos susceptível à compactação (Ohu et al., 1989). O ponto é chamado de ponto de umidade ótima para a compactação dos solos para a construção de estradas, barragens, aterros, etc, pois indica a compactação máxima possível para um determinado tipo de solo.

Em se considerando o estudo de proctor para fins agrícolas, considera-se a densidade máxima, ou ponto ótimo para compactação do solo, como densidade crítica, ou seja, a umidade em que não devemos de maneira alguma trafegar com máquinas agrícolas e realizar pastoreio na lavoura.

Um estudo de proctor modificado foi realizado por Zorita et al. (2001), utilizando-se de 130 g de solo em um molde de 54 mm de diâmetro (molde pequeno), com um soquete de 2,5 kgf, a uma altura de queda de 30,5 cm, e quatro níveis diferentes de energia, 1,11 kgf cm cm<sup>-3</sup>, 2,22 kgf cm cm<sup>-3</sup>, 4,44 kgf cm cm<sup>-3</sup> e 5,56 kgf cm cm<sup>-3</sup>. O estudo mostrou uma correlação próxima a 1 em relação ao Proctor Normal, para os níveis de energia aplicados no molde de menor dimensão.

Segundo Stancati et al. (1981), outros níveis de energia podem ser utilizados neste tipo de ensaio, os quais podem ser determinados através da equação descrita abaixo:

$$E_c = \frac{(P.L.N.n)}{V}$$

Onde:

$E_c$  = energia de compactação (kgf cm cm<sup>-3</sup>),

$P$  = peso do soquete (kgf),

$L$  = altura de queda do soquete (cm),

$N$  = número de golpes por camada,

$n$  = número de camadas,

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

Pelo fato do ensaio de proctor ser relativamente simples, acredita-se ser ele limitado para o estudo da compactação de solos agrícolas, visto que há necessidade de destruir a amostra para a realização do ensaio, o que não representa a realidade (Dias Junior, 2000). Contudo, ensaios de proctor com o uso de palha na superfície tem mostrado uma redução significativa da densidade máxima obtida (Braida, 2004).

Este estudo teve como objetivo avaliar a capacidade da palha de milho em dissipar energia resultante do trânsito de máquinas sobre o solo no campo.

#### **4.1.2. Interface solo máquina**

Os veículos que trafegam sobre uma área cultivada são um dos principais agentes de compactação dos solos agrícolas. O tipo de pneu, suas dimensões, velocidade de deslocamento, número de vezes que trafega sobre o mesmo local e carga suportada, são fatores que provocam maior ou menor compactação do solo (Maziero et al., 1997). Embora as máquinas tenham aumentado consideravelmente de peso, a área de contato pneu-solo não aumentou, o que provoca um aumento da pressão de contato, transmitindo maiores tensões para o solo.

A busca de um desempenho otimizado em operação agrícola justifica-se pela variedade de utilização das máquinas agrícolas, devendo-se considerar, portanto, os tipos de pneus e pressões de inflação adequadas, pois pressões inadequadas representam elementos negativos para a maioria das operações a serem executadas no campo, aumentando com isso a compactação do solo.

Larguras de pneus diferentes com carregamentos semelhantes proporcionam transmissão de energias diferenciados ao solo em profundidade. Um pneu mais largo transmite uma pressão distribuída na superfície, à medida que pneus estreitos transmitem a pressão em profundidades maiores.

Na agricultura são utilizados pneus diagonais e radiais, com um aumento na utilização de pneus de baixa pressão e alta flutuação. Sua diferença manifesta-se na forma de confecção da banda de rodagem.

A área de aplicação da carga é diferente de acordo com o tipo de pneu. No pneu diagonal a área de contato com o terreno se aproxima de uma elipse (Figura 17 a), enquanto que no pneu radial, aproxima-se de um formato retangular (Figura 17 b). Os pneus largos, do tipo diagonal possuem a área de contato de acordo com a Figura 17 c.

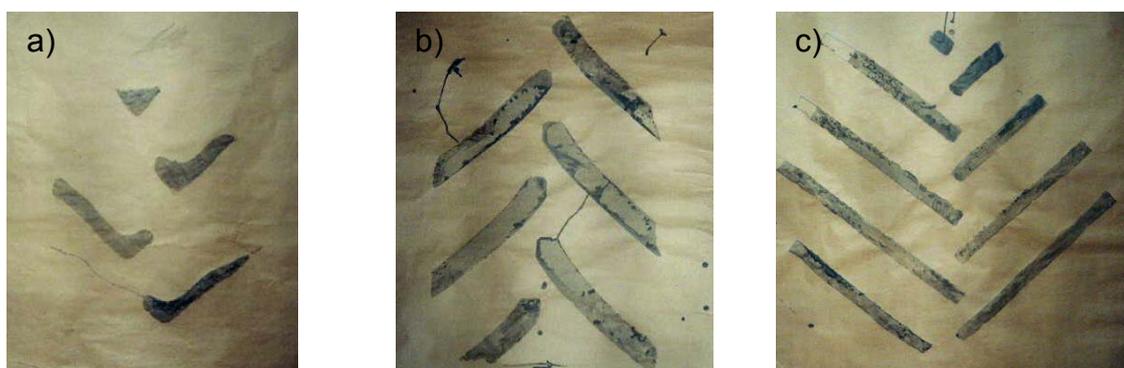


Figura 17 – Áreas de contato do pneu: (a) diagonal (elipse); (b) radial (retangular) e (c) diagonal largo. (Neujahr, 1998).

O carregamento por eixo e a área de contato dos pneus por sobre a superfície do solo permitem que, dependendo de características como umidade, conformação e dureza do pneu, largura, ocorra uma maior ou menor recalque do solo sobre o qual ocorre o tráfego.

Em um estudo realizado em laboratório, Konstantinovic et al. (2003) utilizando um pneu 1050/50 R 32 e aplicando diferentes cargas, com diferentes pressões de insuflagem e com um carregamento de 120 kN, gerou uma pressão na superfície do solo de 270 kPa, com uma área de contato de 2250 cm<sup>2</sup> Figura 18.

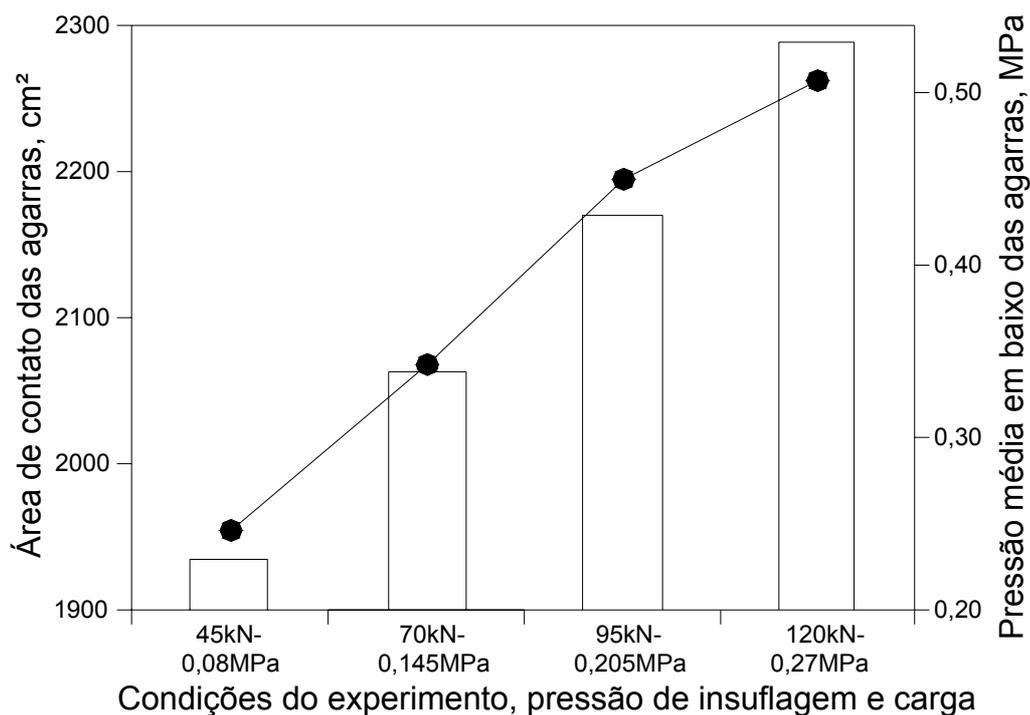


Figura 18 – Relação entre carregamento por pneu e pressão de insuflação. (Konstantinovic, 2003).

#### 4.1.3. Determinação da área de contato e pressão aplicada

A determinação da área de contato é feita utilizando-se de caixas de solo, onde os pneus são colocados em uma prensa hidráulica, e submetidos a um determinado carregamento e pressão de insuflação. A área de contato é impressa sobre o solo. A determinação da área de contato é feita diretamente sobre a superfície, ou poderá ainda ser digitalizada para obtenção de dados mais precisos. A descrição da metodologia para descrição da determinação da pressão de contato, pode ser visualizado na Figura 19.

No Brasil, os ensaios com pneus agrícolas são realizados no Nempa (Núcleo de Ensaios de Máquinas e Pneus) da Universidade do Estado de São Paulo na cidade de Botucatu, seguindo a mesma metodologia de outros países.

Com base de ensaios no Nempa, Mazetto & Lanças (2003), afirmaram que pressões menores de inflação dos pneus proporcionaram maiores áreas de contato, ocasionando menores recalques do solo, fazendo com que a resistência ao rolamento e a compactação do solo sejam minimizados.

Em estudo realizado por Santos (2004), utilizando um pneu de baixa pressão e alta flutuação em caixa de argila, com seis diferentes cargas aplicadas e

cinco níveis de inflação, concluiu que o método é sensível para a determinação da área de contato, sendo, portanto, um método passível de utilização.

Ensaio diretamente no campo podem ser feitos seguindo-se diferentes metodologias, como medições das áreas de contato diretamente no terreno a ser trabalhado.

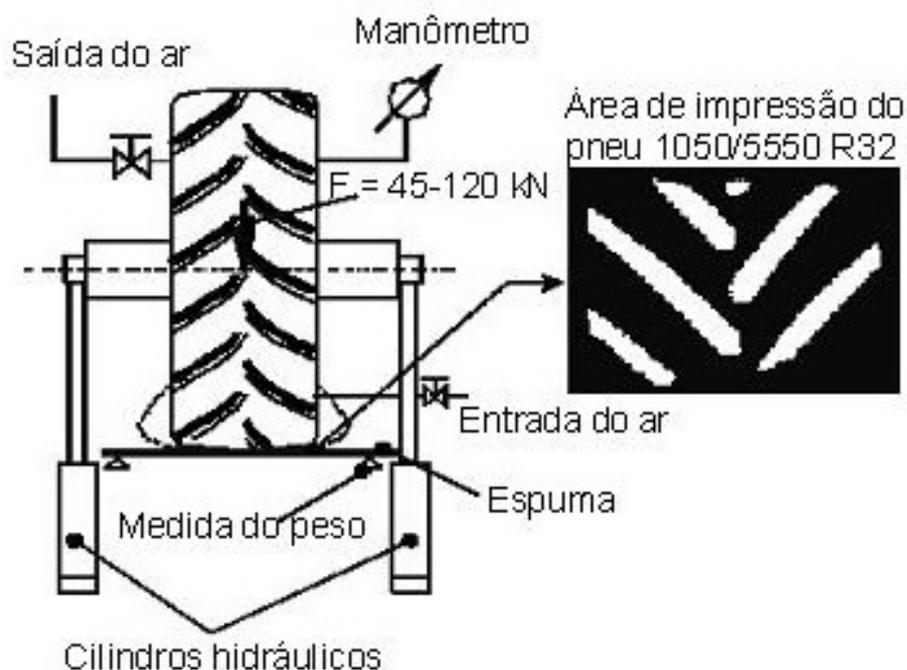


Figura 19 – Relação entre carregamento por pneu e pressão de insuflação. Institut Landtechnik. Bonn.

## 4.2. Material e Métodos

### 4.2.1. Solo

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

#### 4.2.2. Preparo da área no campo

Para realizar-se o ensaio para avaliar o efeito da palha no tráfego de máquinas nas propriedades físicas do solo a campo, foi preparada uma área experimental constituída de seis parcelas com dimensões de 4 x 5 m. Essa área, vinha sendo manejado durante 12 anos sob o sistema de plantio direto, sendo a última safra de soja colhida no ano de 2004.

Para eliminar todas as possíveis interferências advindas da palha de soja existente no local, foi efetuada uma capina manual (Figura 20a), eliminando-se toda a vegetação e a palha existentes na área. Após a limpeza da área, foram feitos ensaios de resistência à penetração até a profundidade de 30 cm antes do preparo da área com o subsolador no rastro e fora do rastro da colhedora (Figura 20b) com três repetições em cada local.



Figura 20 - Limpeza da área para ensaio (a), e resistência à penetração na área, no rastro e deixado pela colhedora e fora dele (b).

Antes da escarificação, também foram coletadas amostras para ensaios de compressibilidade e para a determinação da densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total. Essas amostras foram coletadas em quatro profundidades 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm (Figura 21).



Figura 21 – Coleta das amostras de compressibilidade e densidade antes da escarificação.

Após a coleta dessas amostras, foi realizada a escarificação (duas vezes), utilizando-se de um subsolador de 3 hastes, com 40 cm de comprimento, acoplado a um trator de 120 kW (Figura 22a), de modo a mobilizar o solo completamente, Figura 22b. O solo estava com umidade gravimétrica de  $0,16 \text{ g g}^{-1}$ .



Figura 22 - Escarificação da área para desestruturação do solo (a) e aspecto da área após a escarificação (b).

Após a escarificação, as parcelas foram demarcadas e sorteado para instalação dos tratamentos (cobertura e tráfego).

As determinações de resistência à penetração foram feitas até a profundidade de 30 cm em todas as parcelas. A determinação da umidade do solo foi feita com o solo coletado em cilindros com 3 cm de altura e 5,55 cm de diâmetro, utilizadas também para o cálculo da densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm.

Para o ensaio de compressibilidade, foram coletadas amostras com estrutura preservada em cilindros com altura de 2 cm e diâmetro de 5,50 cm. Essas amostras foram coletadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm, com três repetições a campo para cada tratamento, num total de 24 amostras.

Em seqüência à escarificação e à coleta das amostras antes do tráfego do trator sobre as parcelas, uma quantidade de palha de milho correspondente a 12 Mg ha<sup>-1</sup> foi distribuída uniformemente sobre a superfície do solo (no rastro do trator) (Figura 23a) e logo em seguida, foi efetuado o tráfego ao nível de duas passadas sobre as parcelas (Figura 23b). A umidade do solo, no momento do tráfego foi de 0,29 g g<sup>-1</sup> na camada de 0-5 cm.



Figura 23 - Detalhe da palha de milho sobre as parcelas (a) e do tráfego do trator sobre as parcelas (nível de 2 passadas).

Após o tráfego com duas passadas, ensaios de resistência à penetração foram realizados novamente até a profundidade de 30 cm. Amostras com estrutura preservada foram coletadas para determinação densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. Para os ensaios de compressibilidade foram coletadas amostras nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. Para o ensaio de resistência ao cisalhamento, amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em caixas com altura de 1,95 cm e lado de 5x5 cm, com duas repetições de campo, nas mesmas profundidades de coleta dos cilindros de compressibilidade, resultando em um total de 48 amostras.

Uma semana após o primeiro tráfego, um novo tráfego foi feito com seis passadas, repetindo-se o mesmo procedimento de coletas do nível de duas

passadas. A umidade do solo, no momento do tráfego foi de  $0,24 \text{ g g}^{-1}$  na camada de 0-5 cm.

Na Figura 24a pode-se observar detalhe da coleta das amostras e na Figura 24b detalhe da área após o tráfego do trator.



Figura 24 - Detalhe da coleta das amostras de compressibilidade e de cisalhamento (a), e do aspecto da área após o tráfego (b).

Para todos os ensaios de compressibilidade e de cisalhamento, as amostras foram equilibradas a uma tensão matricial de 6 kPa.

#### 4.2.3. Determinação da área de contato pneu-solo no campo

A determinação da área de contato do pneu com o solo a campo foi realizada com o auxílio de duas tábuas para suportar o peso do trator. Essas tábuas foram colocadas na trajetória do trator, o qual passou por cima das mesmas, em marcha ré, o movimento do trator foi cessado quando o pneu fazia contato direto no solo. Dessa maneira ficou impressa no solo a exata área de contato, a qual foi demarcada com o auxílio de farinha de trigo (Figura 25a). Após a demarcação, o trator foi retirado em marcha para frente, por cima das tábuas, ficando delimitada a área de contato no solo. Após mediu-se a elipse (Figura 25b) que ficou delimitada no solo, para o cálculo da área de contato. Esse procedimento foi realizado para o pneu traseiro bem como para o pneu dianteiro do trator. No momento dessa determinação, a umidade do solo foi de  $0,29 \text{ g g}^{-1}$  na camada de 0-5 cm.

A área de contato do pneu com o solo foi calculada pela seguinte equação:

$$A = \pi.b.h$$

Onde:

A = Área de contato pneu-solo (cm<sup>2</sup>),

b = base maior (cm),

h = base menor (cm).



Figura 25 – Determinação da área de contato pneu-solo, detalhe do pneu traseiro e das tábuas (a), e a área de contato demarcada no solo e medição do pneu dianteiro (b).

#### 4.2.4. Dados técnicos do trator

O ensaio no campo foi realizado com o auxílio de um trator Marca Massey Ferguson, Modelo 5030, com potência no motor de 120 kW com TDA (Tração Dianteira Assistida) do Núcleo de Ensaio de Máquinas Agrícolas (NEMA). A determinação do peso do trator foi feita através do método da dupla pesagem na balança do Almoarifado da Universidade Federal de Santa Maria, resultando num peso total de 5060 kg, sendo que 2080 kg no eixo dianteiro e 2980 kg no eixo traseiro.

Antes da pesagem foi feita a lastragem dos pneus, com água até  $\frac{3}{4}$  da capacidade, com uma insuflação de 200 kPa. A determinação do peso do trator e sua distribuição pode ser melhor visualizada através da Figura 26. Os cálculos para determinação da pressão exercida sobre o solo foram efetuados a partir dos dados do trator descritos na Tabela 8.

Tabela 8 – Características técnicas do trator utilizado nos ensaios com especificações de áreas de contato e pressões exercidas sobre o solo.

Trator	Massey Ferguson 5030
Peso total com lastre (kgf)	5060
Peso dianteiro (kgf)	2080
Peso traseiro (kgf)	2980
Pressão de inflação dos pneus (kPa)	200
Especificação pneu dianteiro	23.1-26 (super arroteiro)
Especificação pneu traseiro	14.9-24 (super arroteiro)
Área de contato pneu-solo (dianteiro) (cm <sup>2</sup> )	4926
Área de contato pneu-solo (traseiro) (cm <sup>2</sup> )	8168
Pressão de contato pneu dianteiro (kPa / pneu)	22
Pressão de contato pneu traseiro (kPa / pneu)	19
Pressão total exercida pelo trator (kPa)	105

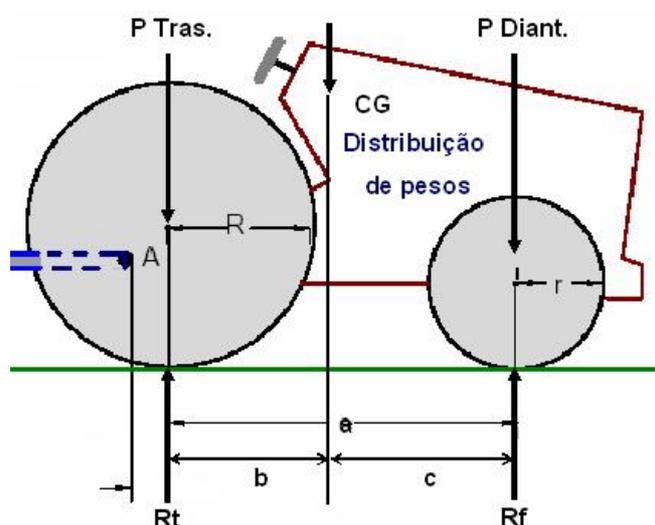


Figura 26 – Distribuição do peso em um trator de rodas (Adaptado de Paccola, 1996).

#### 4.2.5. Ensaio de Proctor

O ensaio de Proctor normal consiste na compactação do solo, utilizando-se de um ensaio padrão normalizado pela Norma Técnica ABNT/NBR 7182 MB 33. A curva de compactação é obtida compactando-se o solo em três camadas com 5 ou 6 umidades, com intervalos de 2,5% entre os pontos, de forma a ser o terceiro ponto o que se encontra o mais próximo da umidade ótima ou crítica.

A coleta do solo para a realização do ensaio de proctor em laboratório, foi feito no campo nos 10 cm superficiais, eliminando-se todo o material orgânico

existente no local. O solo coletado foi seco ao ar no laboratório de Física do Solo (Figura 27).



Figura 27 – Coleta do solo a campo profundidade de 0 a 10 cm (a) e secagem do solo ao ar para a realização do ensaio de Proctor (b).

Primeiramente foi realizado um ensaio de Proctor Normal para a obtenção da umidade ótima onde a densidade do solo é máxima. Esse ensaio foi realizado em um corpo de prova em três camadas, num cilindro de volume conhecido de  $1000 \text{ cm}^3$ , utilizando-se de um soquete de peso conhecido de 2,5 kgf, no qual são aplicados 25 golpes por camada deixando-o cair de uma altura de 30,5 cm, o que corresponde a uma energia aproximada de  $6 \text{ kgf cm cm}^{-3}$ .

O ensaio de Proctor Alterado foi realizado com base na norma da ABNT/NBR 7182, utilizando-se do cilindro de ensaio de dimensões maiores, com um volume de  $2.132,54 \text{ cm}^3$ , em uma única camada, utilizando-se 1,7 kg de solo para a realização dos ensaios. Tal modificação foi feita em razão de que, quando se compactada em camadas, parte da palha se mistura ao solo, a qual poderia interferir na compactação de uma nova camada.

Inicialmente o ensaio foi realizado utilizando-se energia diferente da utilizada pelo Proctor Normal. No entanto, os resultados obtidos não foram satisfatórios pelo fato de que o soquete, que tem uma área de  $19,63 \text{ cm}^2$  se enterrava muito no solo à medida que a umidade do solo era aumentada. Tal fato dificultava a medição que foi feita em quatorze pontos do cilindro devido à desuniformidade da superfície das amostras de solo, dificultando a determinação do volume que estava sendo ocupado pelo solo (Figura 28a). Com isso, não foi possível obter-se uma estimativa exata do volume, como também não se mostrou sensível para diferentes níveis de energia aplicada (Figura 28b).

Na primeira tentativa do ensaio de Proctor Alterado, foram aplicados 30 e 40 golpes; no entanto, não se conseguiu uma curva de compactação em função da umidade, porque os valores resultantes encontravam-se muito próximos.

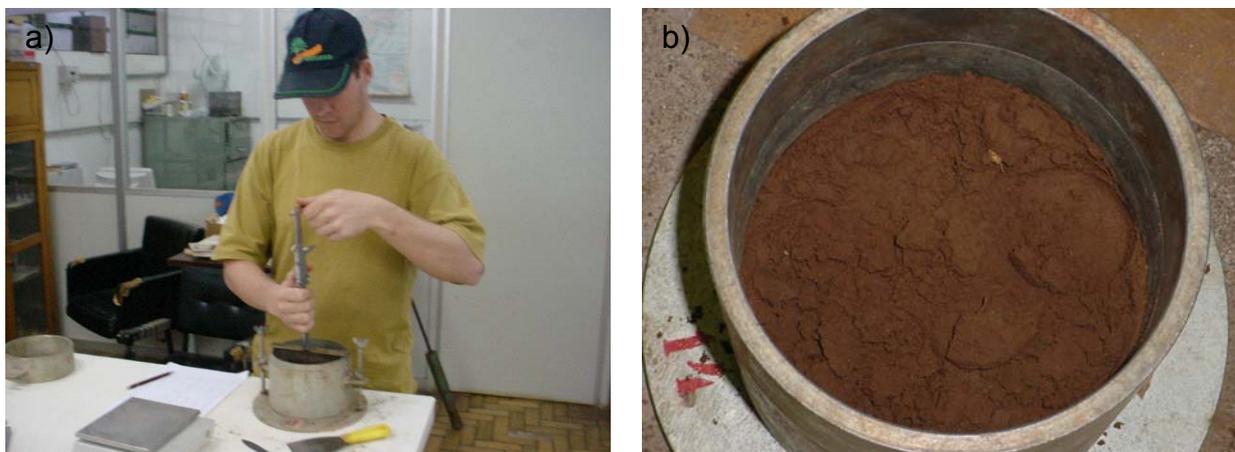


Figura 28 – Medição com o paquímetro para o cálculo do volume (a) e ensaio de proctor alterado com a superfície irregular (b).

A alternativa criada para eliminar a desuniformidade da superfície do solo, foi a usinagem de uma peça com uma área de  $172 \text{ cm}^2$ , com 12 mm de espessura, de maneira que o cilindro de Proctor ficasse totalmente preenchido pela peça (Figura 29 a, b).

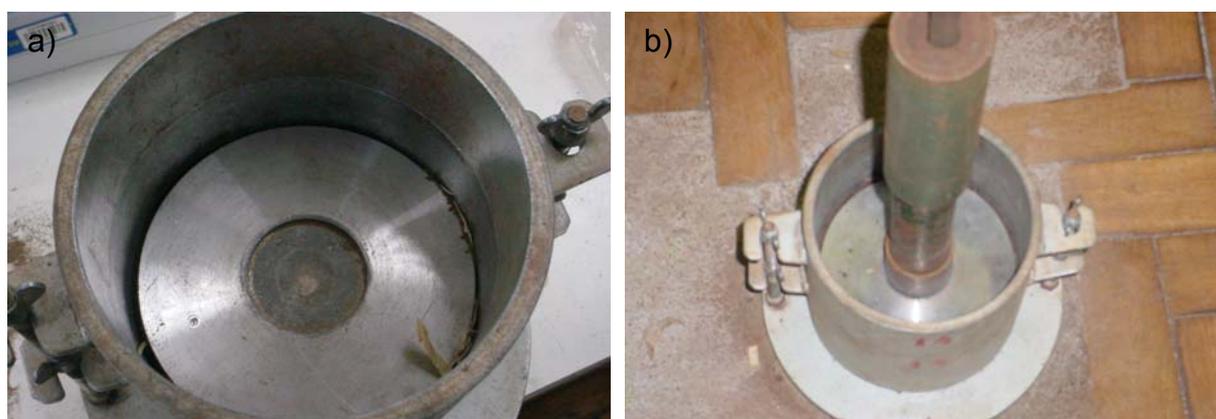


Figura 29 – Proctor alterado com o disco metálico (a) e o disco metálico com o soquete encaixado no centro (b).

Com a utilização do disco metálico, foi eliminado o problema da desuniformidade da superfície do solo dentro do cilindro, o que facilitou as medições com o paquímetro, as quais também foram reduzidas para seis. Foi observado que, ao contrário do que acontecia quando da execução do ensaio de proctor alterado com o soquete normal, quanto maior nível de golpes (maior energia de

compactação) e com o aumento do teor de água, o cilindro movimentava-se muito nas direções X e Y, o que pode ser devido a incompressibilidade da água. Na utilização do soquete normal, o solo se movimentava de um lado para o outro dentro do cilindro, o que não acontecia com o uso do disco. Este movimento do cilindro era um indicativo de que as umidades de compactação constituíam a região descendente da curva de compactação.

#### **4.2.6. Compressibilidade**

Após a coleta das amostras no campo, essas foram levadas para o laboratório de Física do Solo, onde foram preparadas para a realização dos ensaios de compressibilidade, densidade e cisalhamento. Essas amostras foram equilibradas em mesa de tensão a uma tensão de 6 kPa.

Os ensaios de compressibilidade, para a determinação da pressão de pré-consolidação, foram realizadas no laboratório de Física do Solo utilizando-se uma prensa de adensamento uniaxial modelo S 450 Terraload, seguindo a descrição da norma brasileira de adensamento ABNT/NBR 12007/90, a qual é específica para condições de solo não saturado. Foram aplicadas cargas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, com tempo de aplicação de cada carga de 5 minutos, tempo necessário para que mais de 99% da deformação máxima seja alcançada (Silva et. al, 2000).

#### **4.2.7. Cisalhamento**

Para o cisalhamento direto, foi utilizada uma prensa de cisalhamento direto, do laboratório de Mecânica do Solo modelo Solotest, onde foram aplicadas três pressões de 50, 100 e 200 kPa, com um deslocamento horizontal com uma velocidade constante de  $0,33 \text{ mm min}^{-1}$ . Para assentamento das amostras esperou-se 5 minutos para iniciar a leitura no defletômetro horizontal. Detalhes da prensa de cisalhamento, podem ser visualizados na Figura 30.



Figura 30 – Prensa de cisalhamento direto do laboratório de Mecânica do Solo.

#### 4.2.8. Densidade do solo

As amostras para a determinação da densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total foram coletadas em cilindros de 5,55 cm de diâmetro e 2,95 cm de altura em média. Essas amostras foram saturadas por 24 horas, pesadas, saturadas e levadas à mesa de tensão por 48 horas. Posteriormente foram retiradas da mesa de tensão, pesadas e levadas à estufa a 105 °C por 24 horas, retiradas da estufa, foram colocadas em dessecador para o resfriamento e pesadas após o resfriamento, e descontado o peso do pano mais o atilho em cada pesagem onde estava presente. Para os cálculos foram utilizadas as seguintes equações:

Densidade do solo ( $D_s$ )

$$D_s (\text{Mg m}^3) = \frac{M_{ss}}{V}$$

onde:

$M_{ss}$  = Massa de solo seco (g);

$V$  = Volume do cilindro ( $\text{cm}^3$ ).

Microporosidade do solo ( $mp$ )

$$mp (\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}) = \frac{M_{su60} - M_{ss}}{V}$$

onde:

$M_{su60}$  = Massa de solo úmido após drenagem a 60 cm de coluna d'água;

$M_{ss}$  = Massa de solo seco em estufa a 105°;

V = Volume do cilindro.

Macroporosidade do solo (Mp)

$$Mp (\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}) = Pt - mp$$

Porosidade total do solo (Pt)

$$Pt (\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}) = 1 - \left( \frac{Ds}{Dp} \right)$$

onde:

Ds = Densidade do solo;

Dp = Densidade de partículas.

Grau de saturação (Gs)

$$Gs = \frac{\theta}{Pt}$$

onde:

$\theta$  = Umidade volumétrica.

### 4.3. Análise estatística

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

## 4.4. Resultados e Discussão

### 4.4.1. Proctor Alterado

A curvas de compactação apresentadas na Figura 31 mostram que a palha de milho ( $12 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) foi responsável por dissipação de energia quando comparados os níveis de 15, 30 e 50 golpes. Estatisticamente, conforme especificado na

Tabela 9, pode ser verificado que a palha, em todos os níveis de energia, absorveu parte desta, na execução do ensaio modificado e na Tabela 10 estão apresentados os dados de umidade crítica.

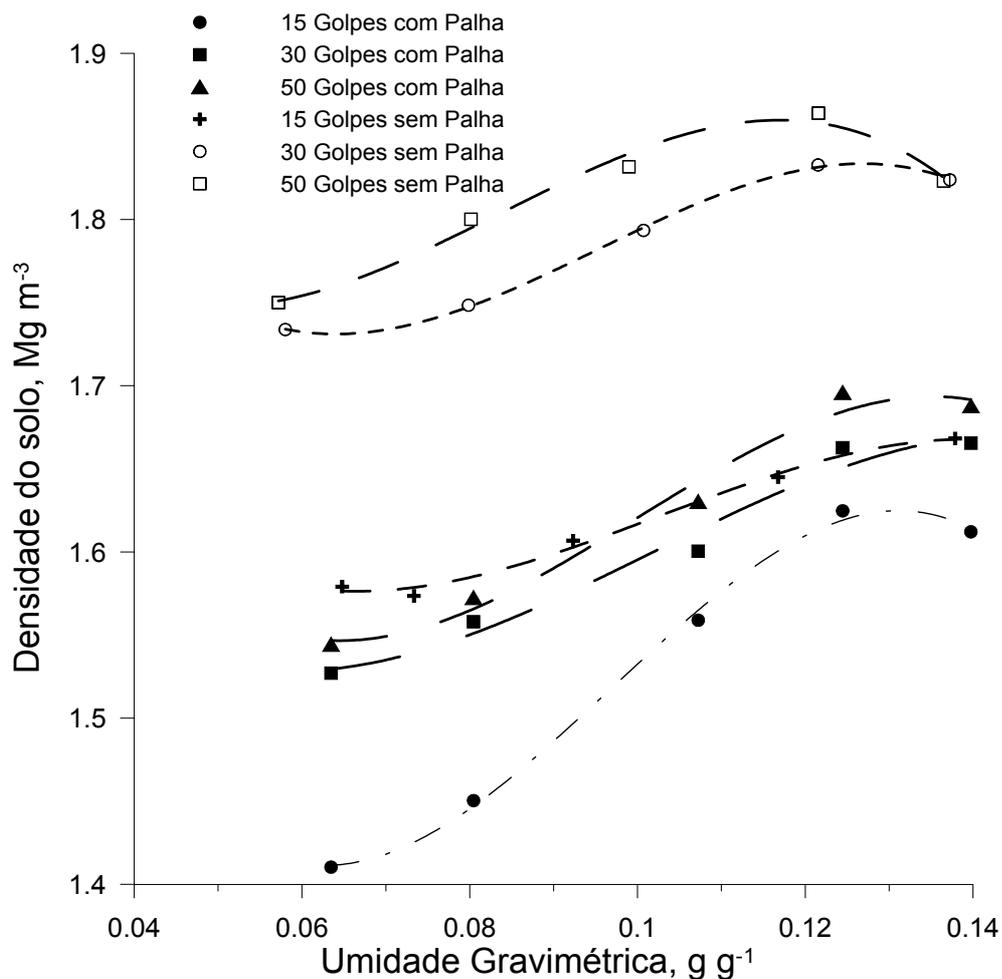


Figura 31 – Curvas do ensaio de Proctor Alterado, sem palha e com 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de milho, com 3 níveis de energia.

Tabela 9 – Densidade máxima com diferentes níveis de energia no ensaio de Proctor Alterado, sem palha e 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha.

Tratamento	Número de golpes		
	15	30	50
	Densidade máxima, Mg m <sup>-3</sup>		
<b>Sem palha</b>	1,68 a C	1,83 a B	1,86 a A
<b>Com palha</b>	1,63 b C	1,68 b B	1,71 b A

Médias seguidas de mesma letra minúsculas na coluna (com e sem palha) e letras maiúsculas na linha (número de golpes) não diferem entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade.

Tabela 10 – Umidade crítica com diferentes níveis de energia no ensaio de Proctor Alterado, sem palha e 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha.

Tratamento	Número de golpes		
	15	30	50
	Umidade crítica, g g <sup>-1</sup>		
<b>Sem palha</b>	0,13 a A	0,12 a A	0,12 a A
<b>Com palha</b>	0,13 a A	0,13 a A	0,13 a A

Médias seguidas de mesma letra minúsculas na coluna (com e sem palha) e letras maiúsculas na linha (número de golpes) não diferem entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade.

Com os dados de Ds obtidos nos ensaios, calculou-se a energia equivalente em cada nível de energia com e sem palha e fez-se uma estimativa da percentagem de energia dissipada pela palha na superfície do solo (Tabela 11). Observa-se que quando aplicados 15 golpes, ou seja, a energia equivalente de 3,27 kgf cm cm<sup>-3</sup>, a palha de milho absorveu 2,98 % da energia aplicada. Com o aumento da energia aplicada utilizando-se 30 golpes (energia equivalente 6,80 kgf cm cm<sup>-3</sup>), a palha de milho absorveu o equivalente a 8,20 % da energia que foi aplicada sobre o solo. Com aplicação de 50 golpes (energia equivalente 11,58 kgf cm cm<sup>-3</sup>), a palha de milho absorveu 8,60 % da energia aplicada sobre o solo. Segundo (Braidá, 2004) esse aumento de energia absorvida com o aumento de energia aplicada sobre o solo, pode ser em função que, nos primeiros golpes aplicados pelo soquete, o solo está tão susceptível à deformação quanto a palha e, portanto, a compactação é quase indiferente à presença da palha, sendo que com o aumento do número de golpes quando o solo está compactado a palha começa a ter um maior efeito na absorção de energia

Tabela 11 – Densidade do solo (Ds), energia equivalente (Ee) e energia dissipada (Edi) em função da energia de compactação (Ec) e da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio Proctor Alterado.

Ec	Palha	Ds	Ee	Edi	
Kgf cm cm <sup>-3</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	Mg m <sup>-3</sup>	kgf cm cm <sup>-3</sup>	%	
3,27	0	1,68	3,27	100,00	0,00
	12	1,63	3,18	97,02	2,98
6,80	0	1,83	6,80	100,00	0,00
	12	1,68	6,24	91,80	8,20
11,58	0	1,86	11,58	100,00	0,00
	12	1,70	10,58	91,40	8,60

#### 4.4.2. Compressibilidade

Os valores de  $\sigma_p$  nos diferentes níveis de tráfego 0, 2 e 6 passadas com o trator, em cada profundidade, são apresentados na Tabela 12. Dado que no ensaio de Proctor obteve-se uma redução significativa na densidade do solo aplicando-se diferentes níveis de energia, esperava-se neste ensaio que a presença de palha de milho o solo reduzisse a  $\sigma_p$  após o tráfego, o que não ocorreu.

Quanto aos níveis de tráfego, que foram três níveis 0, 2 e 6 passadas com o trator sobre as parcelas, houve diferença significativa somente nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm (Tabela 12).

Na profundidade de 0-5 cm, a  $\sigma_p$  teve um aumento significativo quando submetido a duas passadas com o trator em relação ao tráfego zero, o que não ocorreu entre duas e seis passadas. Contudo, na profundidade de 5-10 cm não houve diferença significativa no solo onde não teve tráfego e com duas passadas, somente diferindo quando o tráfego foi de seis passadas. Nas profundidades de 10-20 e 20-30 cm, o número de passadas sobre o solo não afetou a  $\sigma_p$ . Portanto, as camadas mais superficiais do solo foram mais sensíveis à compactação do solo com o tráfego do trator.

Tabela 12 – Pressão de pré-consolidação para o solo submetido a três níveis de tráfego, em quatro profundidades, determinada.

Tráfego	$\sigma_p$ , kPa			
	Profundidade, cm			
	0-5	5-10	10-20	20-30
0	21,23 b	28,73 b	65,62 a	71,08 a
2	43,02 a	51,75 ab	77,00 a	62,30 a
6	44,11 a	68,05 a	69,72 a	62,05 a

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

O  $C_c$  (Tabela 13) somente teve diferença significativa no tráfego no nível de seis passadas na camada superficial de 0-5 cm. Isso nos indica que quanto mais volume de tráfego o solo sofre, menor é a suscetibilidade de compactação adicional na superfície do solo.

Tabela 13 - Coeficiente de compressibilidade (Cc) para o solo submetido a três níveis de tráfego e quatro profundidades.

Tráfego	Cc			
	Profundidade, cm			
	0-5	5-10	10-20	20-30
0	0,33 a	0,33 a	0,35 a	0,39 a
2	0,20 a	0,22 a	0,32 a	0,37 a
6	0,19 b	0,22 a	0,27 a	0,33 a

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

#### 4.4.3. Resistência ao cisalhamento

As envoltórias de resistência ao cisalhamento, para cada nível de tráfego e cobertura do solo (com e sem palha) são apresentadas na Figura 32. A palha e os níveis de tráfego não tiveram efeito sobre a tensão cisalhante.

Obtiveram-se vários valores de coesão negativa (Figura 32) provavelmente devido que as amostras foram equilibradas a uma tensão de 6 kPa, (alto teor de água). Por isso não foi determinado o ângulo de atrito interno para esse ensaio. O ensaio teria sido melhor sucedido se as amostras tivessem sido equilibradas a uma maior tensão, pois à medida que a quantidade de água vai aumentando a coesão vai diminuindo, porque a curvatura do meniscos de água vão diminuindo (Zhang & Hartge, 1990). Na prática, valores de coesão levemente negativos podem ser considerados igual a zero (Braidá, 2004).

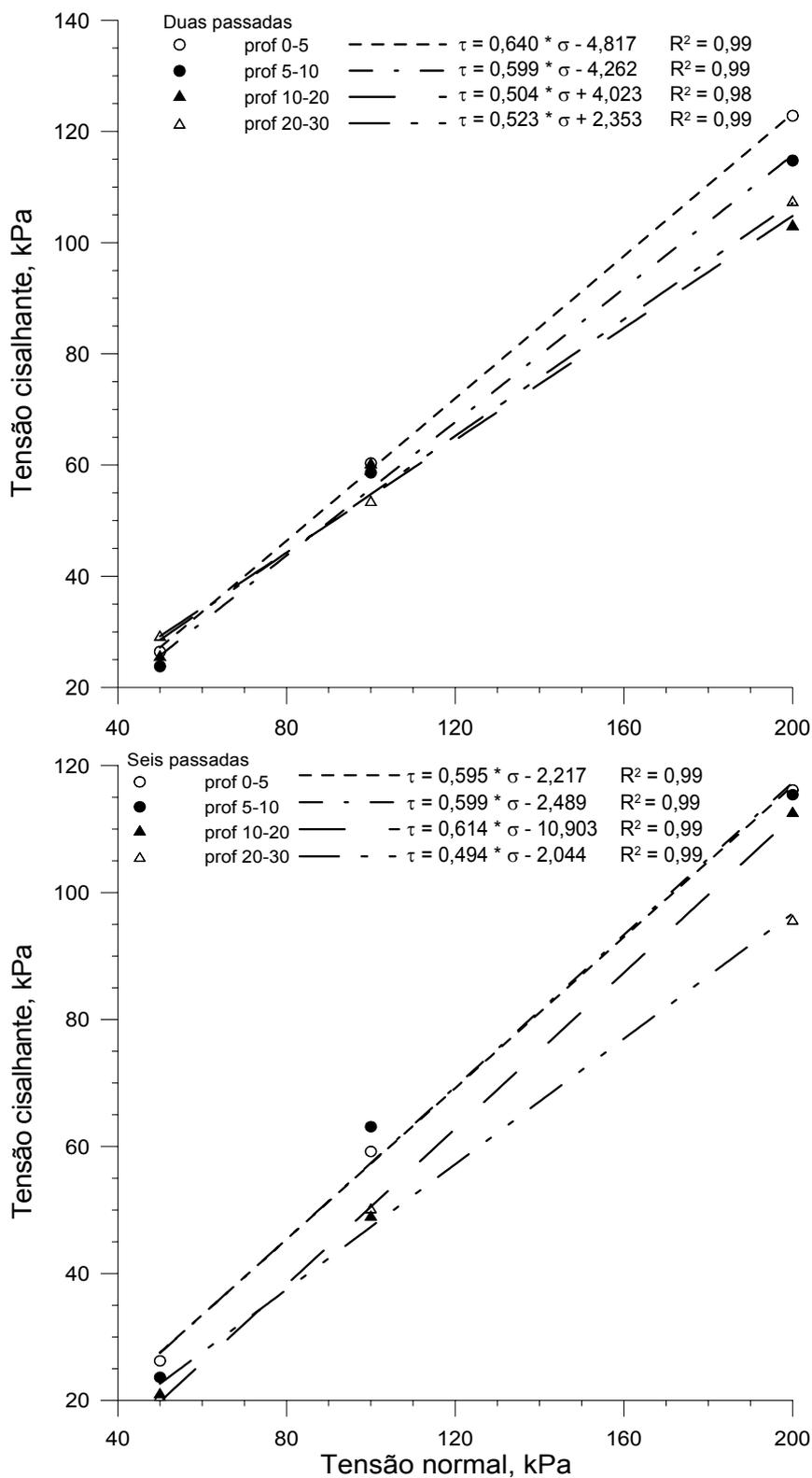


Figura 32 – Envolvórias de resistência ao cisalhamento do solo com dois níveis de tráfego.

#### **4.4.4. Resistência à penetração**

Com a adição de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de milho, esperava-se redução da RP, quando comparado o solo sem palha, o que não ocorreu nos níveis de tráfego (Anexo C). Quando o solo foi submetido a duas passadas, não houve aumento significativo da RP. Contudo, quando o solo foi submetido a seis passadas, obteve-se aumento significativo da RP, até a profundidade de 100 mm para as parcelas com palha e até a profundidade de 50 mm nas parcelas sem palha (Figura 33a,c).

A umidade do solo apresentou pouca variação, a qual, portanto, teve pequeno efeito nos resultados da RP (Anexo C).

#### **4.4.5. Densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total**

A palha de milho não teve efeito significativo na redução da densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, sendo que o tráfego teve efeito significativo (Tabela 14).

Quando o solo foi submetido a duas passadas com o trator, a densidade do solo aumentou significativamente comparada com o nível zero de tráfego, até a profundidade de 10-20 cm, e não apresentando diferença significativa na profundidade de 20-30 cm. Pode-se observar que a densidade do solo apresentou diferença significativa quando comparado o tráfego com duas passadas e seis passadas, mostrando que em um solo mobilizado submetido a tráfego de máquinas agrícolas, o aumento da densidade ocorre principalmente na primeira ou segunda passada; após, não sofre mais aumento da densidade ou esse é pequeno.

A macroporosidade, teve uma redução significativa quando o solo foi trafegado por duas vezes na profundidade de 0-5 cm, o que não ocorreu nas outras profundidades. Nas profundidades de 5-10 e 10-20 cm, a redução da macroporosidade ocorreu somente quando o solo foi submetido a seis passadas com o trator e, na profundidade de 20-30 cm, houve diferença significativa entre duas passadas e seis passadas.

A microporosidade não foi afetada pelo tráfego do trator sobre o solo. Houve diferença significativa na profundidade de 20-30 cm, mas não foi afetada pelo tráfego mas sim pela variabilidade do solo.

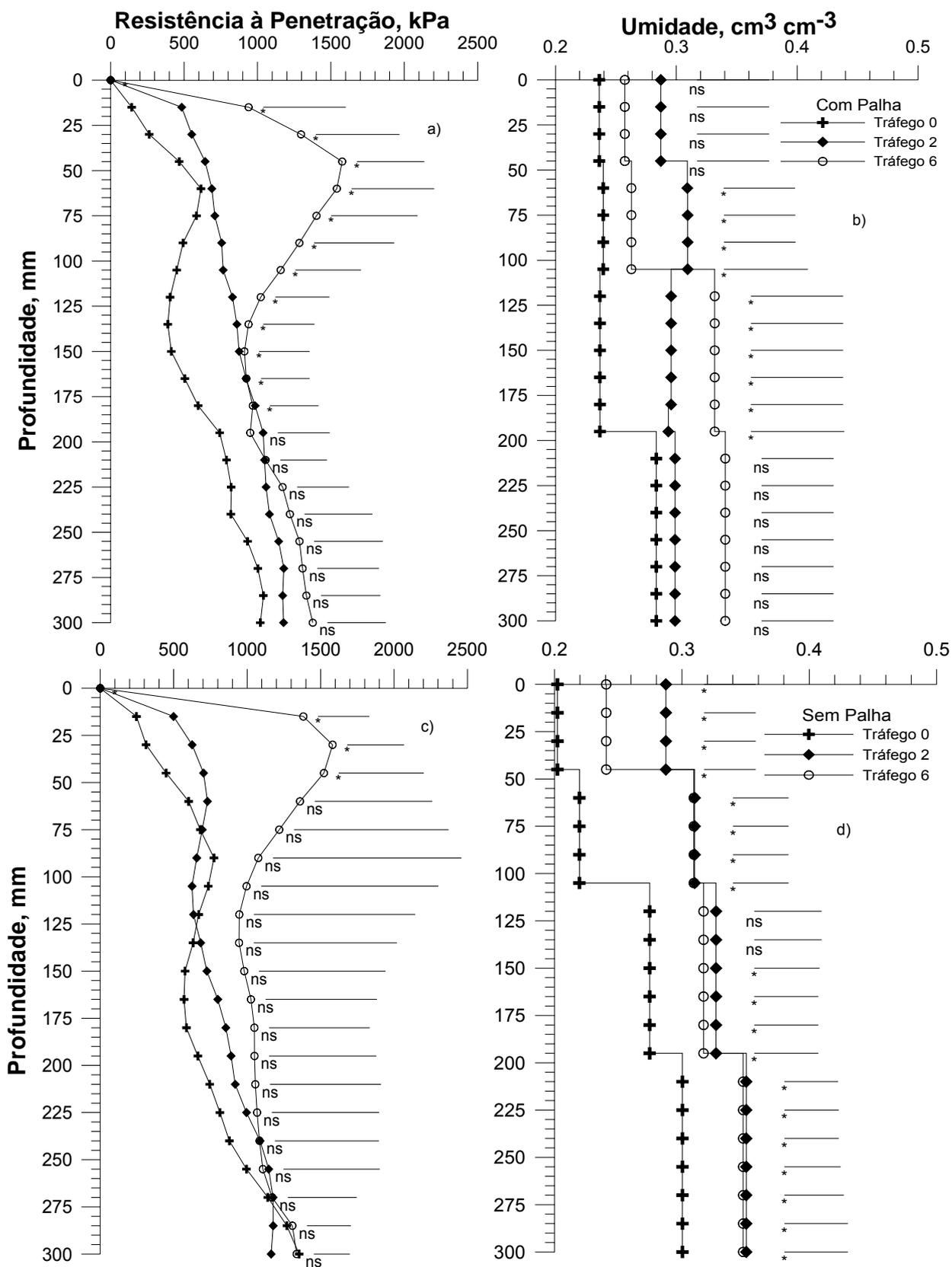


Figura 33 – Resistência à penetração e umidade gravimétrica nos diferentes níveis de tráfego com e sem palha nas diferentes profundidades.

A porosidade total, quando o solo foi submetido a duas passadas, teve redução significativa até a profundidade de 10-20 cm e não apresentando diferença

significativa na profundidade de 20-30 cm. Entre os níveis dois e seis de tráfego não houve diferença significativa.

Tabela 14– Densidade, porosidade total, macro e microporosidade, sob diferente níveis de tráfego em diferentes profundidades.

Tráfego	Densidade, Mg cm <sup>-3</sup>			
	Profundidade, cm			
	0-5	5-10	10-20	20-30
0	1,29 b	1,27 b	1,30 b	1,36 a
2	1,64 a	1,51 a	1,46 a	1,37 a
6	1,64 a	1,59 a	1,47 a	1,38 a
	Macroporosidade, %			
0	21,81 a	19,09 a	15,08 a	11,64 ab
2	6,24 b	13,83 ab	10,27 ab	14,04 a
6	5,16 b	6,70 b	7,92 b	9,37 b
	Microporosidade, %			
0	31,70 a	32,15 a	34,80 a	35,78 a
2	31,58 a	31,80 a	32,68 a	31,65 b
6	32,79 a	32,02 a	34,79 a	36,70 a
	Porosidade total, %			
0	50,63 a	51,41 a	50,51 a	47,95 a
2	37,16 b	44,19 b	44,21 b	47,67 a
6	37,06 b	39,39 b	43,70 b	47,43 a

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

#### 4.5. Conclusões

No ensaio de Proctor, obteve-se resultados expressivos na dissipação de energia e na redução da compactação. Contudo, no campo, presença de palha não diminuiu a compactação do solo.

Com o aumento do tráfego no campo, houve um aumento da compactação do solo nas camadas superficiais.

#### 5. Conclusões Gerais

Os resultados obtidos com o estudo com diferentes preparos do solo, estão em consonância com a hipótese do trabalho no que diz respeito às deformações plásticas do solo.

No estudo sobre o efeito da palha de milho na redução da compactação do solo quando este for submetido ao tráfego de máquinas agrícolas, a hipótese não se confirmou quando o solo é submetido ao tráfego.

## 6. Bibliografia Citada

- Aragon, A.; García, M.G.; Filgueira, R.R.; Pachepskyb, Ya.A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; the relationship with organic carbon and water content. *Soil Tillage Res.*, 56:197-204, 2000.
- Arvidsson, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. *Soil Tillage Res.*, 49:159-170, 1998.
- Ashburner, L. E. & Sims, B. G. Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. San José: IICA, 1984. 476p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 12007: Ensaio de adensamento unidimensional. - ABNT. 1990. NBR 12007. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 6457: Amostras de Solo. Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. - ABNT. 1986. NBR 6457. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 7182: Solo. Ensaio de compactação - ABNT. 1986. NBR 3. Rio de Janeiro, 1986. 11p.
- Ball, B.C.; Campbell, D.J.; Hunter, E.A. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil Tillage Res.*, 57:83-91, 2000.
- Balstreire, L. A. Máquinas agrícolas. São Paulo: Manole, 1987.
- Bengough, A. G.; Mullins, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science, Oxford*, v. 41, p. 341-358, 1990.
- Boeni, M. Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator. Porto Alegre, UFRGS, 2000. 99 f. (Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo).
- Braida, J. A. Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto. 2004, 126f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Busscher, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. ASAE*, v. 33, p. 519-524, 1990.

- Carpenedo, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre, UFRGS, 1994. 106 p. (Tese de Doutorado)
- Centurion, J. F. & Demattê, J. L. I. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. R. Bras. Ci. Solo, 9:263-266, 1985.
- Costa, F.S.; Albuquerque, J.A.; Bayer, C.; Fontoura, S.M.V.; Wobeto, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. R. Bras. Ci. Solo, 27:527-535, 2003.
- Dias Junior, M. S. & Pierce, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. Bras. Ci. Solo, 20:175-182, 1996.
- Dias Júnior, M. S. Compactação do solo. In: Tópicos em ciência dos solo. Sociedade Brasileira de Ciência do solo. Viçosa, 2000. p 55-94.
- Dias Junior, M.S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114p. (Tese de doutorado).
- Doran, J.W. & Parkin, T.B. Defining and assessing soil quality. In Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F.; et al. eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, SSSA, 1994.
- EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Rio de Janeiro: Embrapa, 1999. 412p.
- Forsythe, W.M. Física de suelos: manual de laboratório. San José: IICA, 1975. 212 p.
- Gaggero, M.R. Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo. Porto Alegre, UFRGS, 1998. 125 f. (Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo)
- Genro JR., S.A. Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas. 2002, 89f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2002.
- Håkansson, I. & Voorhees, W.B. Soil compaction. In: Lal, R.; Blum, W.H.; Valentin, C. & Stewart, B.A., eds. Methods for assessment of soil degradation. Boca Raton, Lewis Publishers, 1997. p.167-179.
- Håkansson, I.; Medvedev, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles Soil Tillage Res., 35:85-97, 1995.

- Håkansson, I.; Voorhees, W. B.; Riley, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Tillage Res.*, 11:239-282, 1988.
- Henklain, J. C. Influência do tempo no manejo do sistema de semeadura direta e suas implicações nas propriedades físicas do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26,1997, Rio de Janeiro. Resumos. Rio de Janeiro, SBCS/EMBRAPA, 1997. (CD ROM)
- Hillel, D. *Fundamentals of soil physics*. New York, Academic Press. 1980. 413p.
- Holtz, R.D. & Kovacs, W.D. *An introduction to geotechnical engineering*. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733 p.
- Horn, R. & Lebert, M. Soil compactability and compressibility. In: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p 45-69.
- Imhoff, S.; da Silva, A. P.; Tormena, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agrop. Bras.*, 35:1493-1500, 2000.
- Inns, F. M. & Kilgour, J. *Agricultural tyres* London Dunlop Limited, 1978. 70p.
- Kondo, M.K. & Dias Junior, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:211-218, 1999a.
- Kondo, M.K. & Dias Junior, M.S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:497-506, 1999b.
- Konstantinovic, M., Lammers, P.S., Damerow, L. Soil stress due to high wheel loads. *Agritechnica 2003*, Poster.
- Larson, W.E. & Gill, W.R. Soil physical parameters for designing new tillage systems. 1. Management principles. In: *CONSERVATION TILLAGE, THE PROCEEDINGS OF A NATIONAL CONFERENCE*. Ankeny, SCSA, 1973. p. 13-22.
- Larson, W.E.; Gupta, S.C.; Useche, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:450-457, 1980.
- Lebert, M. & Horn, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage Res.*, 19:275-256, 1991.
- Letey, J. Relationship between soil physical conditions and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-293, 1985.

- Lima, C.L.R. Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada. Piracicaba, USP, 2004. 69p. (Tese de Doutorado em Agronomia).
- Mazetto, F. R. Lanças, K. P. Quem compacta menos? Cultivar Máquinas. V.22, 2003.
- Maziero, J.V.G., Mialhe, L.G., Corrêa, I.M.C. et al. Efeito da patinagem da roda motriz de um trator agrícola na compactação do solo. *Bragantia*. V.56, 1997.
- McCormack, D.E. & Wilding, L.P. Soil properties influencing strength of Cranfield and Geeburg soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:167-73, 1979.
- Moraes, M.H.; Benez, S.H.; Libardi, P.L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. *Bragantia*, 54: 393-403, 1995.
- Moreno, J.A. Clima do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonizações, Secção de Geografia, 1961,46p.
- Müller, M.L.; Ceccon, G.; Rosolem, C.A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:531-538, 2001.
- Ohu, J. O.; Folorunso, O. A.; Raghavan, G. S. V.; Adeniji, F. A. Critical moisture content as an index of compactibility of agricultural soils in Borno state of Nigeria. *Soil Techn.*, 2:211-219, 1989.
- Paccola, H., Cataneo, A. O ângulo de elevação das barras inferiores do sistema de engate de três pontos e a estabilidade estática longitudinal de um trator com implemento em posição de transporte. *Energia na Agricultura*. V.11, n.3, 1996.
- Reinert, D. J. Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf. Michigan, Michigan State University. 1990. 128 p. (Tese de Doutorado).
- Reinert, D.J.; Robaina, A.D. & Reichert, J.M. COMPRESS – Software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Viçosa, 2003. Resumos Expandidos. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 4p.
- Riquelme, U. F. B. Propriedades físicas e hídricas do solo em sistemas de manejo do feijoeiro. 2004, 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.
- Rosolem, C.A.; Almeida, A.C.S.; Sacramento, L.V.S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. *Bragantia*, 53:259-266, 1994.

- Salire, E.V.; Hammel, J.E.; Hardcastle, J.H. Compression of intact subsolis under short – duration loading. *Soil Tillage Res.*, 31:235-248, 1994.
- Salton, J.C. & Mielniczuk, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 19, P. 313-319, 1995.
- Santos, I. B. P., Lanças, K. P. Determinação da área de contato entre um pneu agrícola e uma superfície rígida utilizando-se o método da prensa hidráulica. *Energia na Agricultura*, São Paulo, 10 jun. 2004. Disponível em: <<http://www.fca.unesp.br/posgradua/Energia/revista/V14n3-99/Pedro.pdf>>. Acessado em: 10 jun.2004.
- Secco, D. Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois latossolos sob plantio direto. Santa Maria, UFSM, 2003. 171p. (Tese de Doutorado em Agronomia).
- Silva, A. P Da; Kay, B.D.; Perfect, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, p. 1775-1781, 1994.
- Silva, A.P.; Libardi, P.L.; Camargo, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:91-95, 1986.
- Silva, R.B.; Dias Junior, M.S.; Santos, F.L.; Franz, C.A.B. Resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:165-173, 2004.
- Silva, V. R. Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. Santa Maria, UFSM, 2003. 192p. (Tese de Doutorado em Agronomia).
- Silva, V.R. da; Reinert, D.J.; Reichert, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II. Grau de saturação em água. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:9-15, 2002a.
- Silva, V.R. da; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Soares, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I. Estado inicial de compactação. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:1-8, 2002b.
- Silva, V.R.; Reinert, D.J. & Reichert, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:239-249, 2000.

- Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C., eds. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier, 1994. p. 1-21.
- Stafford, J.V. & Tanner, D.W. Effect of rate on soil shear strength and soil-metal friction. I. Shear strength. *Soil Tillage Res.*, 3:245-260, 1983.
- Stancati, G.; Nogueira, J.B. ; Villar, O.M. Compactação do solo. In: Ensaio de laboratório em mecânica do solos. São Paulo, USP, 1981. p. 81-93.
- Stepniewski, W.; Horn, R.; Martyniuk, S. Managing soil biophysical properties for environmental protection. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 88:175-181, 2002.
- Stone, R. J. & Ekwue, E. I. Compressibility of some trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. *J. Agricult. Engng. Res.*, 60:15-24, 1995.
- Stone, R.J.; Ekwue, E.I. Maximum bulk density achieved during soil compaction as affected by the incorporation of three organic materials. *Trans. ASAE*, 36 (6): 1713-1719. 1993.
- Taylor, H.M.; Roberson, G.M.; Parker Jr, J.J. Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, v.102, p.18-22. 1966.
- Tormena, C. A.; da Silva, A. P.; Libardi, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Tillage Res.*, 52:223-232, 1999.
- Unger, P.W. & Kaspar, T.C. Soil compaction and root growth: A review. *Agronomy Journal*, v. 86, p.759-766, 1994.
- Vargas, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo, Mcgraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.
- Veen, B.W. & Boone, F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. *Soil Tillage Res.*, 16:219-226, 1990.
- Voorhees, W.B.; Senst, C.G.; Nelson, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern corn belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42:344-349, 1978.
- Whalley, W. R.; Dumitru, E.; Dexter, A. R. Biological effects of soil compaction. *Soil Tillage Res.*, 35:53-68, 1995.
- Zhang, H.; Hartge, K.H.; Ringe, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:239-245. 1997.
- Zhang, H.Q. & Hartge, K.H. Cohesion in unsaturated sandy soils and the influence of organic matter. *Soil Technology*, 3:311-326. 1990.

Zorita, M.D., Grove, J.H., Perfect, E. Laboratory Compaction of Soils using a Small Mold Procedure. *Soil. Sci, Soc. Am. J.*, 65:1593-1598, 2001.

## **7. Anexos**

---

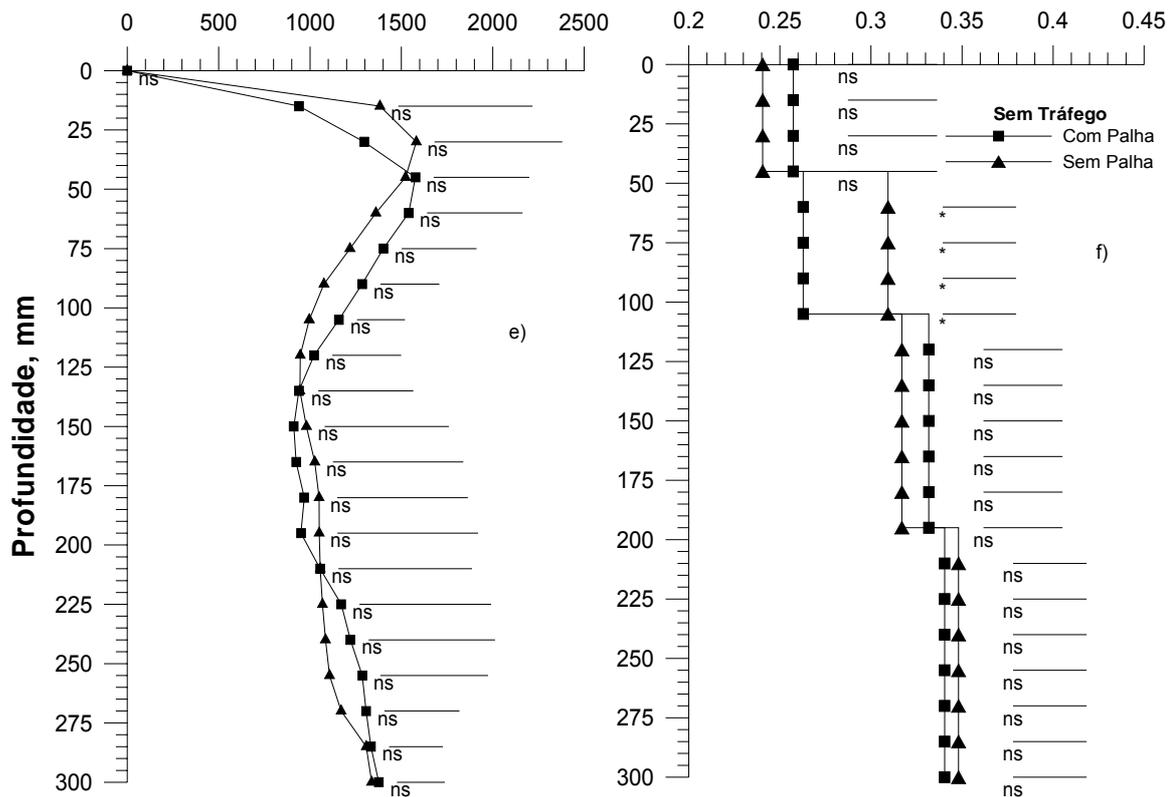
Anexo A – Pressão de pré-consolidação para os tratamentos PD13 (plântio direto 13 anos), ESC01 (escarificado em 2001), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004), PC03 (preparo convencional 2003) e PC04 (preparo convencional 2004), em três tensões e duas profundidades.

Tratamento	Tensão, kPa		
	6	100	300
	$\sigma_p$ , kPa		
Profundidade 0-2 cm			
PD13	118,47	152,95	201,50
ESC01	62,85	130,10	138,60
ESC02	49,50	131,00	163,67
ESC04	51,60	134,50	182,30
PC03	82,07	142,30	144,47
PC04	36,00	102,85	121,70
Profundidade 10-12 cm			
PD13	108,37	152,70	174,00
ESC01	67,80	130,10	180,50
ESC02	95,23	144,37	189,85
ESC04	75,57	127,33	140,15
PC03	87,30	138,67	155,60
PC04	69,13	116,73	156,40

Anexo B – Pressão de pré-consolidação para os tratamentos PD13 (plântio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em quatro tensões e duas profundidades.

Tratamento	Tensão, kPa			
	6	33	100	300
	$\sigma_p$ , kPa			
Profundidade 0-2 cm				
PD13	101,67	158,97	163,67	177,37
ESC02	98,67	165,33	141,37	178,93
ESC04	96,10	174,43	241,43	228,17
PC04	83,67	157,40	197,03	186,23
Profundidade 10-12 cm				
PD13	102,17	138,53	159,00	168,67
ESC02	98,17	121,03	155,67	164,20
ESC04	107,57	121,03	225,83	236,03
PC04	111,77	155,97	217,33	227,83





Anexo C – Resistência à penetração e umidade gravimétrica nos diferentes níveis de tráfego com e sem palha nas diferentes profundidades.