

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS
UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
MESTRADO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**Influência da carga dinâmica na compactação e alteração estrutural de um
Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo**

Patrícia Freitas Candine

Anápolis
2019

**INFLUÊNCIA DA CARGA DINÂMICA NA COMPACTAÇÃO E ALTERAÇÃO
ESTRUTURAL DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE MANEJO**

PATRÍCIA FREITAS CANDINE

Orientador: Prof. Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás – UEG, Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas de Anápolis como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola – Sistemas Agroindustriais, para obtenção do título de MESTRE.

Anápolis
2019

Candine, Patrícia Freitas.

Influência da carga dinâmica na compactação e alteração estrutural de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo – 2019.

65 f. il.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Goiás. Mestrado *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, 2019.

Bibliografia.

1. Compactação. 2. Cisalhamento Direto. 3. Recalque superficial. 4. Simulador de tráfego. I. Título.

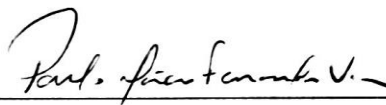
**INFLUÊNCIA DA CARGA DINÂMICA NA COMPACTAÇÃO E ALTERAÇÃO
ESTRUTURAL DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE MANEJO**

Por

Patrícia Freitas Candine

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de
MESTRA EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Aprovado em 28/02/2019



Prof. Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana

Orientador
UEG/CCET



Prof. Dr. Elton Fialho dos Reis

Membro
UEG/ CCET



Prof. Dr. Gregório Luis Silva Araújo

Membro
UnB/PPGG

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas oportunidades, conquistas e por mais essa etapa.

À minha família, por todo apoio neste experimento, desde a retirada dos blocos de solo, à conferir as referências bibliográficas. Meus pais e meus irmãos foram meu alicerce, sem esse apoio e incentivo essa dissertação não seria possível.

Ao meu orientador, professor Paulo Viana, pelas contribuições, sugestões e empréstimo do laboratório para ensaios.

Ao Philip Lemos pelo empréstimo da área e disposição em ajudar.

Aos colegas de mestrado pela companhia, estudos, experimentos e convivência durante esses anos.

A Nayane e Amanda pela disposição em ajudar, pelos estudos juntas, principalmente em estatística, por dividir as dificuldades e pela amizade.

A Diana Coelho pelos conselhos, pelas traduções, conversas sobre teoria de mecânica dos solos, apoio e amizade.

A Victor Diniz pela ajuda, apoio, ensaios no simulador de tráfego aos finais de semana e modelagem dos blocos para o ensaio de cisalhamento.

Ao Waldeir Costa pelas ideias e empréstimo de equipamentos.

Ao Rafael Veloso pela ajuda no laboratório de solos e nos ensaios do simulador.

A Eliete pelo auxílio na secretaria com documentação, prazo e vontade em ajudar.

A Maria Joselma de Moraes pelo primeiro experimento no mestrado, pela oportunidade de ir ao congresso, pela paciência em ensinar, pelo incentivo e amizade.

Ao Elton Fialho dos Reis, pelo primeiro incentivo como coordenador do programa, pelos conselhos e ajuda na escolha do tema.

Aos professores Sueli, André, Gisele e Roberta pelas matérias ministradas e pela banca de qualificação.

A UEG pela oportunidade de realizar o mestrado em Engenharia Agrícola.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Principais propriedades físicas alteradas pelo tráfego de máquinas	2
2.2. Pneu e área de contato	4
2.3. Pressão média de contato com o solo	6
2.4. Recalque	6
2.5. Parâmetros de cisalhamento	7
2.6. Sistemas de manejo	8
3. MATERIAL E MÉTODO	11
3.1. Caracterização da área	11
3.2. Delineamento estatístico	12
3.3. Extração das amostras de solos indeformadas	13
3.4. Simulador linear de tráfego	15
3.5. Nível de tráfego e pressão de inflagem do pneu	16
3.6. Pressão aplicada ao solo	16
3.7. Determinação da área de contato do pneu com o solo	17
3.8. Cisalhamento direto	17
3.9. Variáveis analisadas	20
3.9.1. Recalque superficial do solo	21
3.9.2. Índice de vazios.....	22
3.9.3. Grau de compactação e densidade	22
3.9.4. Intercepto coesivo e ângulo de atrito	23
4. RESULTADO E DISCUSSÃO	26
4.1. Área de contato e pressão de contato com o solo	26
4.2. Recalque do solo	29
4.3. Densidade	30
4.4. Índice de vazios	32
4.5. Grau de compactação	34
4.6. Intercepto coesivo	38
4.7. Ângulo de atrito	40
5. CONCLUSÕES	43
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Resumo da comparação das propriedades do solo entre os sistemas de plantio direto e plantio convencional conforme autores.....	10
TABELA 2. Caracterização física e mecânica do Latossolo Vermelho sob plantio direto (Apd) e plantio convencional (Apc)	12
TABELA 3. Resumo da análise de variância das variáveis: recalque do solo (R), densidade (ρ), índice de vazios (e), grau de compactação (GC), intercepto coesivo (IC) e ângulo de atrito (Φ).....	26
TABELA 4. Área de contato (cm ²) e pressão média de contato (kPa) média das áreas em cada carga.....	27
TABELA 5. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável deformabilidade (mm) em cada sistema de manejo	30
TABELA 6. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável densidade do solo na interação da carga em cada sistema de manejo.....	35
TABELA 7. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável índice de vazios do solo na interação da carga em cada sistema de manejo.....	36
TABELA 8. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável grau de compactação (%) da carga em cada sistema de manejo.....	39
TABELA 9. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável intercepto coesivo (kPa) da carga em cada sistema de manejo	42
TABELA 10. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável ângulo de atrito ($^{\circ}$) da carga em cada sistema de manejo	44

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Área experimental: a) Apd (plantio direto); e b) Apc (plantio convencional).....	12
FIGURA 2. Retirada de amostras indeformadas: a) Molde com medidas para retirada do bloco; b) Escavação do bloco de solo; c) Bloco escavado e desprendido; d) Blocos retirados, plastificados e identificados; e e) Blocos armazenados na câmara úmida.....	14
FIGURA 3. Vistas do simulador linear de tráfego: a) Perspectiva; b) Lateral esquerda; e c) Lateral direita.....	15
FIGURA 4. Sistema de aplicação de carga: a) Balança eletrônica; b) Célula de carga; e c) Carga aplicada.....	16
FIGURA 5. Determinação da área de contato do pneu do simulador por meio do software AutoCad: pressão de inflagem 96,5 kPa, carregamento aplicado pelo pneu de 150 kgf e pressão de contato 512,98 kPa.....	17
FIGURA 6. Cisalhamento Direto: a) Máquina de cisalhamento Direto Sheartronic; b) Sistema de aplicação de carga; c) Visor da máquina Sheartronic (registra o deslocamento horizontal e a tensão aplicada); d) Molde da amostra indeformada; e) Caixa bi-partida; f) Sistema completo para montagem na caixa bi-partida; g) Retirada da amostra do molde para a caixa bi-partida com carimbo; h) Caixa bi-partida montada na máquina Sheartronic; i) Amostra rompida.....	19
FIGURA 7. Deslocamento do solo (mm) versus tempo de aplicação de cada pressão para o tempo de 10 minutos (exemplo típico)	20
FIGURA 8. Deslocamento do solo (mm) versus tempo de aplicação de cada pressão para o tempo de 60 minutos (exemplo típico).....	20
FIGURA 9. Método fotográfico: a) Solo antes do tráfego; b) Após o tráfego; c) Miras demarcadas sobre a superfície do solo; e d) Medidas globais no programa AutoCad.....	22
FIGURA 10. Imagem representativa do local de retirada da amostra indeformada do blo de solo após o tráfego no simulador linear	23
FIGURA 11. Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal de cada tensão normal aplicada (exemplo típico).....	24
FIGURA 12. Envoltória Tensão cisalhante x Tensão normal de cada deslocamento até 100% (exemplo típico).....	25
FIGURA 13. Gráfico Intercepto coesivo e Ângulo de atrito pelo deslocamento.....	25
FIGURA 14. Valores médios de área de contato (cm ²) em função das cargas para as áreas.....	28
FIGURA 15. Valores médios de pressão média de contato (kPa) em função das cargas para as áreas.....	28
FIGURA 16. Recalque superficial do solo em função das cargas de tráfego nas duas áreas.....	29

FIGURA 17. Regressão da variável densidade (g/cm^3) do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apd.....	33
FIGURA 18. Regressão da variável densidade (g/cm^3) do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apc	34
FIGURA 19. Regressão da variável índice de vazios do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apd	35
FIGURA 20. Regressão da variável índice de vazios do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apc	36
FIGURA 21. Regressão da variável grau de compactação do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apd	38
FIGURA 22. Regressão da variável grau de compactação do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apc.....	38
FIGURA 23. Regressão da variável intercepto coesivo do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apd	41
FIGURA 24. Regressão da variável intercepto coesivo do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apc	41
FIGURA 25. Regressão da variável ângulo de atrito ($^\circ$) do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apd	43
FIGURA 26. Regressão da variável ângulo de atrito ($^\circ$) do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apc	43

LISTA DE SÍMBOLOS

Ac: área de contato

Apc: área de plantio convencional

Apd: área de plantio direto

Ca²⁺: cálcio

cm: centímetros

cm²: centímetros quadrados

cm³: centímetros cúbicos

Cv: coeficiente de variação

e: índice de vazios

F: força

FV: fator de variação

g: gramas

GC: grau de compactação

GL: grau de liberdade

IC: intercepto coesivo

K⁺: potássio

Kg: quilo

kPa: quiloPascal

LC: limite de contração

LL: limite de liquidez

LP: limite de plasticidade

m: metros

m²: metros quadrados

mm: milímetros

min: minutos

Mg²⁺: magnésio

N: newton

P: fósforo

Pa : pascal

Pc: pressão de contato

Pi: pressão interna

R: recalque

tg: tangente

η : porosidade total

δ : peso específico real dos grãos

c' : intercepto coesivo

σ' : tensão efetiva do solo

Φ' : ângulo de atrito interno

ρ : densidade ou massa específica aparente

$\rho_{dm\acute{a}x}$: massa específica aparente seca máxima

τ : tensão cisalhante

w: umidade

wot: umidade ótima

INFLUÊNCIA DA CARGA DINÂMICA NA COMPACTAÇÃO E ALTERAÇÃO ESTRUTURAL DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO

RESUMO

Uma das principais conseqüências do manejo inadequado do solo é a perda da sua estrutura, que leva à redução da sua sustentabilidade e à diminuição da produtividade. O objetivo deste estudo foi avaliar as alterações estruturais e a compactação de um Latossolo Vermelho sob Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC) quando submetido a diferentes cargas. Para a análise dessa influência foram realizados ensaios em um simulador de tráfego e em um equipamento de cisalhamento direto, de modo a registrar o recalque superficial e realizar o cálculo do grau de compactação do solo. Para tanto, foi realizado um experimento com delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2x5, com 4 repetições, totalizando 40 unidades experimentais. As parcelas foram constituídas de duas áreas (PD e PC) e cinco cargas (0, 50, 100, 150 e 200 kgf). Os resultados demonstraram que as variáveis utilizadas foram capazes de caracterizar as mudanças no estado de compactação e na estrutura do solo. O recalque superficial apresentou crescimento linear até a carga de 200kg, e maiores valores para área de PD; a densidade apresentou comportamento quadrático aumentando até as cargas de 150kg (PD) e 100kg (PC); o índice de vazios apresentou redução dos valores até as cargas de 150kg (PD) e 100kg (PC), estando os maiores valores relacionados ao PD; o grau de compactação aumentou até as cargas de 150kg (PD) e 100kg (PC), estando os maiores valores relacionados ao PC; o intercepto coesivo apresentou tendência de acréscimos para cargas até 150kg, correspondendo os maiores valores para a área de PC; os valores de ângulo de atrito subiram até as cargas de 150kg (PD) e 100kg (PC), apresentando maiores valores para o PC. As variáveis relacionadas a uma possível melhor estrutura do solo foram associadas ao solo sob PD.

Palavras-chaves: compactação, cisalhamento direto, recalque superficial, simulador de tráfego.

INFLUENCE OF THE DYNAMIC LOAD IN COMPACTION AND STRUCTURAL ALTERATION OF A OXISOL UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS

ABSTRACT

One of the main consequences of the inadequate handling of soil is the compaction of its structure which leads to a loss of its sustainability and reduction of productivity. The goal of this study is to analyse the structural changes and the compaction of a oxisol under no tillage (NT) and conventional till (CT) when under the stress of different loads. To determine this influence, experiments were conducted on a traffic simulator and on a shear force equipment to register the superficial settling and calculate the soil's compactation degree. A totally randomised approach with a factorial 2X5 scheme with 4 repetitions adding up to a total of 40 experimental units was utilised. The subjects were constituted of 2 areas (NT and CT) and 5 loads (0,50,100,150 and 200kgf). The results demonstrated that the utilised variables were capable of displaying the changes in compactation and structure of the soil. The superficial settling showed a linear increase until the 200kg load and higher values for the NT load; the density showed quadratic behavior increasing up to the loads of 150kg (NT) and 100kg (CT); the voids index presented a reduction of the values up to the loads of 150kg (NT) and 100kg (CT), with the highest values related to NT; the compactation degree increased until 150kg NT and 100kg CT, displaying much bigger values for NT. The cohesive intercept showed a tendency to increase to loads up to 150kg, which corresponds to the highest values for the CT area. The friction angle values increased until 150 kg (NT) and 100kg (CT) loads, with much higher values for CT. The variables associated with a possible better soil structure were associate with the NT area.

Keywords: compactation, shear force, superficial settling, traffic simulator.

1. INTRODUÇÃO

A busca por elevada produtividade e melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo faz com que sejam necessários estudos que avaliem diferentes sistemas de manejo. Os sistemas estão correlacionados ao tráfego agrícola, o qual ocasiona o aumento do grau de compactação, este aumento pode dificultar o crescimento das plantas principalmente em condições críticas de umidade do solo (De Marins et al., 2018).

Os sistemas de manejo utilizados na produção agrícola são o cultivo mínimo, o convencional e o de plantio direto, com destaque para os dois últimos. De maneira geral os sistemas de cultivo reduzido e plantio direto possuem um caráter de validade do ponto de vista agrônomo, quanto à redução das perdas de solo e água e, no caso específico do plantio direto, na melhoria da estrutura do solo, mantendo-se os níveis de produtividade adequados (REICHERT et al., 2016).

A determinação dos parâmetros do cisalhamento de solos pode ser útil na agricultura para avaliação da capacidade de suporte e como indicador do estado de compactação do solo (SILVA et al., 2004; MARASCA et al., 2011). Solos compactados apresentam maiores valores de pré-compressão (PIRES et al., 2012) e maior resistência ao cisalhamento (BACHAMANN et al., 2006) devido à proximidade entre as partículas, que diminuem os vazios e aumentam a densidade do solo.

A resistência ao cisalhamento do solo pode ser expressa pela equação de Coulomb ($\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \Phi'$), que define a envoltória de resistência ao cisalhamento do solo. Nessa equação, os parâmetros c' e Φ' representam, respectivamente, o intercepto de coesão entre as partículas do solo e o ângulo de atrito interno. Esses parâmetros são características intrínsecas do solo, pois são dependentes de outras propriedades e características deste, como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, densidade do solo, mineralogia e conteúdo de água (ROCHA et al., 2002; BRAJA DAS, 2015).

Desta forma o presente estudo avaliou a influência da carga dinâmica aplicada por um simulador de tráfego na compactação e alteração estrutural de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Principais propriedades físicas alteradas pelo tráfego de máquinas

As modificações nas propriedades físicas do solo, decorrentes do tráfego de máquinas nas operações agrícolas, têm sido amplamente estudadas, ressaltando-se os efeitos negativos da compactação do solo sobre a produtividade das culturas. Contudo, nas últimas décadas, a mecanização das operações agrícolas tem-se intensificado, resultando em aumento na carga aplicada pelas máquinas, provocando, na maioria dos casos, a alteração física do solo em superfície e subsuperfície (YAVUZCAN et al., 2005).

O tráfego de máquinas agrícolas é apontado como a principal causa da compactação, intensificando-se pelo incremento no peso das máquinas e implementos, e pela intensidade do uso do solo decorrentes do processo de modernização da agricultura (BERISSO et al., 2013; FOUNTAS et al., 2013). A compactação do solo causada pelo tráfego de veículos agrícolas é uma das principais ameaças à produtividade do solo na agricultura mecanizada. Esta variável modifica o arranjo do poro do solo, com impactos negativos em uma ampla faixa de funções do solo e, portanto, reduz a qualidade física do solo. A maioria das propriedades e processos físicos, químicos e biológicos do solo são afetados pela redução do volume do solo (DEXTER, 2004).

Os efeitos negativos do tráfego das máquinas sobre a estrutura dos solos são bem relatados pela literatura, por meio do monitoramento dos atributos físicos do solo em diferentes sistemas de uso e manejo do solo. Quando as pressões aplicadas pelo tráfego ultrapassam a capacidade de suporte de carga do solo, há grande redução do volume de macroporos (TARAWALLY et al., 2004; SERVADIO et al., 2005; SCHÄFFER et al., 2007), enquanto o de microporos permanece praticamente inalterado (TORMENA et al., 1998), ou até mesmo aumentado (TARAWALLY et al., 2004; SCHÄFFER et al., 2007).

Quando o tráfego não é muito intenso e, ou, realizado sob condições de solo seco, os macroporos podem ser reduzidos a mesoporos (TARAWALLY et al., 2004), alterando, assim, a geometria do espaço poroso (SERVADIO et al., 2005). O tráfego de máquinas e de animais pode aumentar a densidade do solo e diminuir a porosidade total (KULLI et al., 2003; SERVADIO et al., 2005; BOTTA et al., 2006), indicando que esses atributos podem ser usados como indicadores da compactação ocasionada por esse tráfego (DIAS JÚNIOR, 2000; LIMA, 2004).

De acordo com Severiano et al. (2008), a compactação restringe o crescimento das plantas, pois esta é marcada pela diminuição da porosidade de aeração do solo (macroporosidade) e aumento da resistência à penetração das raízes, caso que não ocorre em solos bem estruturados, onde as restrições são relacionadas ao déficit hídrico. Já Oliveira Filho et al. (2015) descreve que a compactação do solo influencia todas as fases de desenvolvimento da cultura.

A compactação é um processo em que a porosidade e a permeabilidade são reduzidas e a resistência é acrescida, em função de cargas ou pressões aplicadas. Esse processo acarreta na diminuição do crescimento e do desenvolvimento radicular, aumenta a densidade do solo, as perdas de nitrogênio por desnitrificação, o consumo de combustível das máquinas no preparo do solo e a erosão do solo pela menor infiltração de água. Ainda, por diminuir a macroporosidade, a água retida nos microporos permanece sob altas tensões, apresentando baixa disponibilidade para as plantas (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004; BOTTA et al., 2009; CUNHA; CASCÃO; REIS, 2009; NAWAZ; BOURRIÉ; TROLARD, 2012; SILVA et al., 2006).

A densidade do solo quantifica mudanças no volume, porém a variável densidade não é considerada apropriada para medir o impacto do tráfego quando diferentes texturas do solo são consideradas (HAKANSSON & LIPIEC, 2000). Isto é devido ao intervalo da densidade variar em função da textura (KELLER & HAKANSSON, 2010). Portanto, o impacto de cargas externas é melhor quantificado quando a compactação é relativizada (HAKANSSON & LIPIEC, 2000; LIPIEC & HAKANSSON, 2000).

Hakansson e Lipiec (2000) relataram que o estado de compacidade é melhor caracterizado quando é fornecido como um produto comparável para todos os valores de solos, e esses autores recomendaram o uso da densidade relativa, como grau de compactação. De acordo com os autores o grau de compactação facilita a modelagem de respostas do solo e das culturas ao tráfego de máquinas e é independente da composição do solo (isto é, textura) ao determinar valores críticos dos indicadores físicos de crescimento da planta.

No entanto, deve ser notado que o grau de compactação é uma propriedade da densidade. Por exemplo, dois solos com um dado grau de compactação poderiam ter estruturas diferentes e, portanto, qualidades diferentes. No entanto, em média, a maior compactação do solo é geralmente associada à pior qualidade física do solo no campo. O grau de compacidade tem sido principalmente relacionado ao desempenho das culturas e

usado em estudos com foco agrônômico (NADERI- BOLDAJI & KELLER, 2016). Naderi- Boldaji & Keller (2016) sugerem que o grau de compactação possui uma boa correlação para ser usado como um índice de qualidade física do solo e é mais fácil de obter que outros índices.

2.2 Pneu e área de contato

Os pneus agrícolas são o elo entre o trator e o solo, além de serem também responsáveis pelo tracionamento que o trator irá proporcionar para o arraste das demais máquinas e implementos agrícolas, realizando, assim, as operações no campo para as quais foram construídos (GABRIEL FILHO et al., 2010).

Segundo Barbosa et al. (2005), o pneu de um trator é um de seus componentes mais importantes, pois é responsável pela sustentação, equilíbrio, deslocamento, direcionamento e realização do esforço do trator. A capacidade de fornecer potência para tracionar implementos e realizar satisfatoriamente as operações agrícolas depende da configuração do rodado que equipa o trator, além disso, também influenciam na compactação do solo.

A mais importante característica do pneu é o ar contido no seu interior, ou seja, sua pressão de inflação. A carga é suportada pelo ar dentro do pneu e, de acordo com a quantidade de ar que o pneu contém, executará tarefas mais ou menos eficientemente. Neujahr et al. (1998) afirmam que a pressão interna do pneu, determina a manutenção de sua estrutura, quando submetido a cargas, sendo também responsável pelas características dimensionais. Mialhe (1980) comentou que a pressão interna é um fator importante para o desempenho e a manutenção dos pneus agrícolas, sendo as pressões recomendadas, variando de acordo com o pneu, número de lonas e a carga sobre o pneu.

Quando um pneu carrega uma carga sobre uma superfície rígida, este deflexiona, causando um aumento da área de contato, até que a pressão interna atuando na área de contato possa suportar a carga. Para os pneus agrícolas a deflexão máxima é limitada em cerca de 18 a 20% da seção altura. Com o aumento da carga sobre o pneu a pressão interna pode ser aumentada, dentro de certos limites, mantendo aceitáveis as deflexões. Em solos arenosos ou arados, o solo também se deforma e aumenta a área de contato, reduzindo a deflexão do pneu para a dada carga e pressão interna (INNS e KILGOUR, 1978).

ALAKUKKU et al. (2003) define a área de contato pneu-solo como a área de uma superfície que realmente suporta a carga, sendo diretamente proporcional a carga vertical

imposta e inversamente proporcional a pressão interna dos pneus. A área de contato pode variar com o tipo de rodado, com a pressão interna do pneu, com a carga vertical incidente sobre o mesmo e, com a deformação sofrida pelo solo.

A estimativa da área de contato contribui para a determinação das pressões de contato, da relação tensão-deformação e do risco potencial de compactação. Aumentando a superfície de contato entre pneu e solo pode-se reduzir os índices de patinagem, aumentar a força de tração disponível e diminuir o consumo de combustível por área trabalhada (FRANTZ, 2011). À medida que aumenta a área de contato do pneu com o solo, mediante do uso de pneus com maior largura da banda de rodagem, ou até mesmo com a utilização de menor pressão de inflação e lateral mais flexível, há uma distribuição de maneira uniforme da carga do rodado sobre o solo, conseqüentemente a resistência ao rolamento e o consumo de combustível reduzem (DISERENS, 2009).

A pressão interna e a carga dinâmica afetam significativamente a área de contato rodado-solo, a combinação de tipos de pneu e cargas radiais alteram de forma significativa a área de contato, obtendo uma elevação gradativa das áreas de contato com o aumento das cargas radiais (MAZETTO et al., 2004). Além disso que a área de contato do rodado com o solo, por ser influenciada pela pressão interna do pneu, constitui um dos mais importantes fatores para o estudo da capacidade de tração e fornecimento de potência para desempenhar as operações agrícolas (ZOZ e GRISSO, 2003). De acordo com a pressão interna do pneu as suas características dimensionais são alteradas, entre elas o raio estático, raio dinâmico, diâmetro geral, seção largura do pneu e a deflexão (FERREIRA et al., 2000).

A pressão interna tem papel fundamental na área de contato entre o pneu e o solo, além da distribuição de pressão na sua superfície. A uma mesma carga, com a diminuição da pressão de inflagem, é aumentada a área de contato crescendo o coeficiente de aderência, o que é uma vantagem em terrenos de baixa capacidade de suporte, provocando menores pressões de trabalho e reduzindo a compactação do solo até profundidades de 0,30m (MION, 2016).

Demonstrando a importância do efeito da pressão de inflagem do pneu também na redução da compactação. Resaltando que a utilização de pressão baixa, porém ideal, resulta em alta capacidade tratorial, baixo consumo de combustível, alta produtividade operacional e baixo grau de compactação do solo.

2.3 Pressão média de contato com o solo

A distribuição das tensões provocadas por rodados das máquinas agrícolas influencia no rendimento, na eficiência do trator, e no consumo de combustível. Esta interação é estudada por meio da pressão de contato do pneu com o solo, a qual é definida como a pressão exercida na superfície, a qual é equivalente à carga total aplicada dividida pela área de contato entre o solo e o pneu (MION et al., 2016). Cada tipo de rodado aplica uma dada carga de modo particular e com pressão de contato característica.

Machado e Trein (2000) encontraram em seu estudo que maiores pressões de inflação dos pneus provocaram menores áreas de contato entre o solo e o pneu, e por via de consequência maior pressão deste sobre o solo. Porterfield e Carpenter (1986), utilizando a pressão média de contato de um pneu em uma superfície rígida, observaram que o nível de compactação superficial depende da pressão de contato, enquanto a compactação profunda depende da área de contato, largura do pneu e da carga suportada pelo mesmo.

As tensões verticais encontradas na superfície do solo são aproximadamente iguais às pressões de inflação dos pneus, sendo que a menor pressão provoca a menor tensão, as maiores pressões causam as maiores deformações provocadas pela diminuição da área de contato pneu/solo (MION et al., 2016). Flores et al. (2007), cita que a pressão exercida sobre o solo é o agente causador da compactação, e a compactação subsuperficial está relacionada à carga total aplicada por eixo das máquinas agrícolas, independentemente da pressão exercida sobre a superfície.

2.4 Recalque

O recalque do solo provocado por cargas, tais como aquelas impostas pelos rodados de tratores e máquinas, tem sido uma matéria de interesse tanto na área agrícola como no setor de mobilidade veicular e transporte, objetivando avaliar a condição de trafegabilidade e tração conforme o tipo de solo (CASTRO NETO, 2001).

O recalque é uma designação técnica com base no conceito de mecânica do solo e trata-se do rebaixamento do leito de rolamento pelos rodados, causando uma redução de volume e macroporos, com expulsão do ar e água neles existentes.

Conforme Chancellor (1977), a diminuição do volume de poros devido à compactação pelo tráfego de máquinas é aproximadamente igual ao volume do recalque produzido e

que os sulcos mais largos resultam em compactação mais superficialmente se comparado aos mais estreitos. O método mais importante para evitar compactação pelo tráfego é restringir o uso de máquinas mais pesadas às condições de solo secos o suficiente de modo a deformarem o mínimo possível. Portanto, utilizando-se de máquinas mais leves e pneus mais largos visando a menor compactação é possível remover as camadas compactadas com uso de ferramentas de cultivo convencionais.

O estudo do recalque têm-se mostrado uma variável importante de estudo em vários trabalhos como por Taghavifar e Mardani (2013), Couto et al. (2013), Mion et al. (2016) e Alcantara (2017).

2.5 Parâmetros de cisalhamento

Quando um solo é submetido ao tráfego de máquinas, as camadas que compõem sua estrutura são submetidas às variações das tensões devido à ação da carga dinâmica imposta pelo rodado. A ação de uma carga na roda de um veículo induz a tensões normais e cisalhantes em todas as faces do elemento de contato, tensões essas oriundas da decomposição da tensão resultante segundo as direções dos três eixos de coordenadas, representados por X, Y e Z. Nas faces opostas do elemento, atuam as tensões de reação iguais em magnitude e direção, e em sentidos opostos, mantendo-se assim a condição de equilíbrio dinâmico (MION et al., 2016).

A resistência do solo ao cisalhamento pode ser expressa pela equação de Mohr Coulomb ($\tau = c' + \pi tg\phi'$), onde os parâmetros c e ϕ representam, respectivamente, a coesão e o coeficiente de atrito entre as partículas do solo. Esses parâmetros são características intrínsecas do solo, sendo determinados por suas propriedades e atributos, tais como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, densidade, mineralogia e teor de água (ROCHA et al., 2002; SILVA et al., 2004).

De acordo com Caputo (2008) o ângulo de atrito do solo é uma variável complexa por envolver todo entrosamento entre os grãos do solo, sendo compreendido como o ângulo máximo entre as forças do peso do corpo na superfície e a normal sem que aconteça o deslizamento entre as partículas (PINTO, 2012). E a coesão do solo pode ser descrita como a coesão aparente, que atua como uma pressão externa, ou a coesão real, que é a interação entre os grãos de argila (CAPUTO, 2008).

Desta forma o sistema de manejo altera a estrutura do solo, e essa alteração resulta em alterações nos parâmetros das resistência ao cisalhamento segundo Braida et al.

(2007a). A modificação da estrutura, no plantio direto, pode ser associada a um aumento de matéria orgânica na camada superficial do solo, conforme Freixial e Carvalho (2013).

A matéria orgânica atua sobre os parâmetros do cisalhamento de diferentes formas. Basicamente, espera-se um aumento da coesão entre as partículas do solo, resultante do aumento da força das ligações e/ou estabelecimento de novas ligações entre as mesmas, seja pelas características físicas e químicas das moléculas orgânicas, seja em função de enlaces de partículas produzidas por filamentos orgânicos como hifas de fungos e raízes (SOANE, 1990).

Ao reduzir a densidade do solo, a matéria orgânica pode diminuir o ângulo de atrito interno, por reduzir o número de pontos de contato entre as partículas e, ainda, por ser um material mais flexível e de menor dureza que as partículas minerais (Braida et al., 2007a). No entanto, em baixos teores de água, as substâncias orgânicas, por reterem fortemente a água, podem aumentar a fricção entre as partículas .

A matéria orgânica pode ser associada a dois efeitos contraditórios sobre a resistência do solo: aumento da força de ligação entre as partículas minerais e mudança no arranjo das partículas. O aumento ou redução da resistência do solo dependerá do balanço entre seus efeitos conjuntos sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação de água (ZHANG et al., 1997).

Na literatura, encontram-se resultados contraditórios, mostrando situações em que maiores teores de matéria orgânica são acompanhados de diminuição da resistência ao cisalhamento do solo e outros nos quais essa aumenta. Provavelmente, essas diferenças são devidas à origem da matéria orgânica, ao tempo decorrido após a incorporação da matéria orgânica, ao teor de água no solo e à textura do solo. Conforme Braida et al. (2004) o aumento do teor de matéria orgânica diminui a resistência do solo.

Considerando, ainda, que o comportamento mecânico do solo é dependente do comportamento mecânico de seus agregados, é possível que parte dos resultados contraditórios existentes na literatura sejam produzidos por diferenças estruturais das amostras avaliadas.

2.6 Sistemas de manejo

Os diferentes sistemas de manejo do solo têm a finalidade de criar condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas, entretanto alteram as propriedades físicas do solo influenciando no crescimento e desenvolvimento das plantas (BERTOL et al., 2001).

Todavia, a desconsideração às condições mais favoráveis (solo úmido - consistência friável) para o preparo do solo e o uso de máquinas cada vez maiores e pesadas para essas operações levam a degradações da sua estrutura, e esta condição física alterada pode ocasionar a diminuição da produtividade (RODRIGUES, 2011), por interferir na densidade do solo, na porosidade, na infiltração de água e no desenvolvimento radicular das culturas.

O preparo físico do solo se faz segundo duas alternativas principais: o preparo convencional e o plantio direto. O preparo físico convencional é feito tradicionalmente pelas operações de aração e gradagem, para se formar um leito adequado para as fases de semeadura, germinação e desenvolvimento inicial das plântulas, além de reduzir a infestação de plantas invasoras. Este sistema promove maior aeração, quebra dos agregados do solo e a incorporação dos resíduos vegetais, causando a perda de carbono orgânico no solo (DA SILVA, 2012). Esse método vem sendo gradualmente substituído pelo plantio direto, onde o plantio é efetuado sem o revolvimento do solo, apenas com operações de abertura do sulco para a deposição de sementes e adubos.

O plantio direto representa o método de manejo do solo mais moderno e correto ambientalmente. Excluindo em grande parte as operações físicas de preparo do solo, principalmente eliminando a aração e a gradagem. Esse sistema exige um preparo inicial da área onde será implantado, com a limpeza da área, eliminação de tocos e raízes e a correção da fertilidade e da acidez. A eliminação de plantas invasoras se faz por meio de herbicidas. Desta forma o plantio direto tem se mostrado mais promissor na recuperação das propriedades físicas do solo na sua camada superficial (ALVES & SUZUKI, 2004).

Segundo Freixial e Carvalho (2013), a Agricultura de Conservação (mobilização mínima e não-mobilização) tem efeitos positivos sobre as características químicas, físicas e biológicas do solo. Entre elas destacam-se o aumento de bioporos, o maior volume explorado pelas raízes, superiores taxas de infiltração de água, acréscimo dos teores de MO, etc. Para os agricultores, a adoção da Agricultura de Conservação, reflete-se numa redução de fatores de produção (FREIXIAL & CARVALHO, 2013) e de menores passagens nas parcelas cultivadas (KROULÍK et al., 2009).

De forma geral o plantio direto melhora a estrutura do solo, aumentando o contato das partículas gerando uma melhor qualidade física do solo para resistir a forças externas. Após alguns anos de cultivo o plantio direto adquire uma estrutura caracterizada por apresentar agregados mais densos, resistentes e próximos entre si. Além disso, nesse

sistema, observa-se um aumento do teor de matéria orgânica do solo, especialmente na camada superficial (REICHERT et al., 2016).

Desta forma é possível atribuir ao plantio direto uma estrutura de solo melhor que a do plantio convencional. O plantio direto e o plantio convencional podem ser comparados também em termos de rendimento operacional e consumo de combustível, sendo atribuído o menor consumo ao plantio direto e o melhor rendimento operacional ao mesmo sistema de manejo (MOREIRA et al., 1985).

Já para perdas de nutrientes e quantidade de teor de carbono orgânico na superfície, o sistema de plantio direto é o sistema de manejo que apresenta menores perdas de nutrientes, possivelmente devido o solo com maior tráfego apresentar uma alta compactação na superfície dificultando a entrada de materiais orgânicos (CHEN e WEIL, 2011). A tabela abaixo apresenta uma comparação entre os dois sistemas.

TABELA 1 – Resumo da comparação das propriedades do solo entre os sistemas de plantio direto e plantio convencional conforme autores

Plantio Direto	Plantio Convencional
•Melhores propriedades físicas da camada superficial do solo	•Propriedades físicas da camada superficial reduzidas
•Melhor arranjo estrutural do solo	•Arranjo estrutural inferior do solo
•Acréscimo dos teores de matéria orgânica	•Perdas dos teores de matéria orgânica
•Menor perda de nutrientes do solo	•Maior perda de nutrientes do solo
•Aumento de bioporos	•Menor volume de bioporos
•Melhor rendimento Operacional	•Menor rendimento operacional
Menor consumo de combustível	•Maior consumo de combustível

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Caracterização da área

A área de estudo apresenta Latossolo Vermelho (EMBRAPA,2006), localizada em Anápolis, Go, cuja localização geográfica é definida pelas coordenadas 16° 15' S e 49° 01' W, com altitude média de 980 m. Predomina na região de Anápolis o clima tropical semi-úmido, megatérmico, conforme classificação de Köppen, com chuvas concentradas no verão (outubro-abril) e estação seca no inverno (maio-setembro). No período chuvoso as máximas de precipitação ocorrem em dezembro e as mínimas em agosto, estando o total anual em torno de 1.400 mm. Neste período os meses de setembro e outubro são considerados os mais quentes, com médias entre 23° a 26°C. No inverno as mínimas de temperaturas ocorrem nos meses de junho e julho com médias a 21°C.

O estudo foi dividido em duas áreas diferentes, sendo nomeadas Apd (área de plantio direto) e Apc (área de plantio convencional). A Apd apresenta um histórico de ser utilizada para pastagem antes de 2015, sendo utilizada para plantio convencional por 1 ano, e para plantio direto de milho de silagem por 2 anos e continua nesse sistema. A Apc apresenta um histórico de ser utilizada para pastagem antes de 2016, sendo utilizada para plantio convencional de milho de silagem por 2 anos.

Foram realizados os ensaios de caracterização física e mecânica do solo conforme as normas: análise granulométrica, umidade e porosidade total conforme Embrapa (2017); massa específica segundo NBR 6508 (ABNT,1984); limite de liquidez, limite de plasticidade e limite de contração conforme Embrapa (2017) e o ensaio de proctor conforme NBR 7182 (ABNT, 1986a). Os resultados das análises de caracterização física e mecânica do solo, realizadas no Laboratório de Mecânica dos Solos dos cursos de Engenharia Civil e Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Goiás, são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 - Caracterização física e mecânica do Latossolo Vermelho sob plantio direto (Apd) e plantio convencional (Apc)

Propriedades analisadas	Valores Obtidos	
	Apd	Apc
Análise Textural		
Teor de areia	160 ± 22 g kg ⁻¹	240 ± 21 g kg ⁻¹
Teor de silte	380 ± 31 g kg ⁻¹	400 ± 29 g kg ⁻¹
Teor de argila	460 ± 38 g kg ⁻¹	360 ± 33 g kg ⁻¹
Índices Físicos		
Umidade (w)	27,72 ± 1,48 %	24,66 ± 1,09 %
Peso específico real dos grãos (δ)	2,72 ± 0,12 g/cm ³	2,69 ± 0,05 g/cm ³
Massa específica aparente seca (ρ)	1,08 ± 0,05 g/cm ³	1,10 ± 0,03 g/cm ³
Porosidade total (η)	60,29 ± 0,39 %	58,45 ± 0,39 %
Limites de Consistência		
Limite de Liquidez (LL)	44,83 ± 1,39 %	43,92 ± 1,12 %
Limite de Plasticidade (LP)	36,69 ± 2,36 %	34,32 ± 2,97 %
Limite de Contração (LC)	26,64 ± 1,88 %	24,97 ± 1,72 %
Propriedades Mecânicas		
Massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$)	1,37 ± 0,16 g/cm ³	1,38 ± 0,16 g/cm ³
Umidade ótima de compactação (wot)	31,00 ± 1,84 %	31,8 ± 1,54 %
Grau de Compactação (GC)	79,37 ± 0,8%	80,07 ± 0,8%

A área utilizada no experimento foi de 0,25 hectares, para cada área, com dimensões de 50 x 50 m (Figura 1). As coletas de solo foram conduzidas no mês de Maio, no ramo seco do solo com aproximadamente 27,72% e 24,66% de umidade para Apd e Apc, respectivamente. Conforme a análise textural os dois solos são da classe Argilosos por conterem mais de 35% de argila, o solo Apd contém em torno de 16% de areia, 38% de silte e 46% de argila, o solo Apc contém 24% de areia, 40% de silte e 36% de argila.

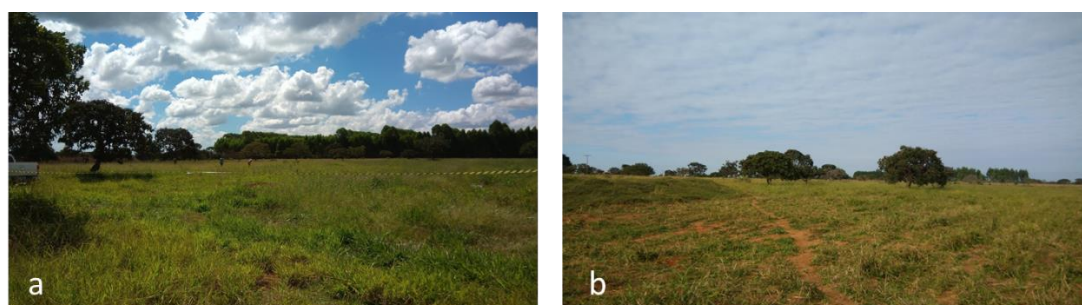


FIGURA 1. Área experimental: a) Apd (plantio direto); e b) Apc (plantio convencional).

3.2. Delineamento Estatístico

O experimento em laboratório foi conduzido delineamento inteiramente ao acaso, no esquema fatorial 2x5, composto por dez tratamentos com quatro repetições por tratamento, totalizando 40 unidades experimentais. As parcelas foram constituídas de duas áreas experimentais: Apd e Apc; e cinco cargas aplicadas: zero (testemunha), cinquenta, cem, cento e cinquenta e duzentos kgf.

3.3.Extração das amostras de solo indeformadas

As amostras para os ensaios em laboratório foram retiradas amostras indeformadas do solo com o intuito de retirar o solo mantendo sua estrutura e condições de umidade e compactidade. A amostra indeformada utilizada nos ensaios foi retirada na profundidade de 0-0,20m, possuindo dimensões 0,20x0,20x0,40 (altura, largura e comprimento). No total foram retiradas 40 amostras indeformadas para os ensaios.

As amostras foram retiradas conforme NBR 9604 (ABNT, 1986b), seguindo os seguintes passos: retirada da camada superior do solo com vegetação, escavação do bloco com dimensões um pouco maiores ao tamanho da amostra, com profundidade maior que a altura definida do bloco, escavação do bloco por baixo do mesmo até desprendê-lo e cuidadosamente o bloco foi virado. O excesso de solo foi retirado até as dimensões desejadas, o bloco foi envolvido em plástico filme, identificado, e colocado em bandeja para transporte.

As amostras foram acondicionadas na câmara úmida no laboratório na Universidade Estadual de Goiás para manter suas condições de umidade de campo até o momento do ensaio.



FIGURA 2. Retirada de amostras indeformadas: a) Molde com medidas para retirada do bloco; b) Escavação do bloco de solo; c) Bloco escavado e desprendido; d) Blocos retirados, plastificados e identificados; e) Blocos armazenados na câmara úmida.

Cada amostra foi embalada com um plástico filme, que teve a função de facilitar o transporte dando maior firmeza para a estrutura do bloco, como também funcionando com papel impermeabilizante, evitando a perda de água até o armazenamento do bloco na câmara úmida.

3.4. Simulador linear de tráfego

Para avaliar o efeito do tráfego nas propriedades físicas e mecânicas do solo, em condição laboratorial, foi utilizado o simulador linear de tráfego. O simulador de tráfego de laboratório pode ser denominado como um simulador de pequeno porte capaz de estimar em um pequeno espaço de tempo a resposta da amostra ao longo de seu tempo de serviço. A carga dinâmica, a pressão interna dos pneus e as múltiplas passadas afetam a densidade do solo, variando-a significativamente de acordo com o tipo de solo. O simulador de tráfego, por meio de um braço articulado em um conjunto mecânico, aciona linearmente a roda que aplica um esforço vertical e seu movimento longitudinal se dá sobre o corpo de prova, podendo ser utilizado para verificação da deformação do solo devido a carga aplicada pelo pneu.

A utilização de um simulador linear de tráfego para repetir as condições de campo em laboratório foi validada tecnicamente por Couto et al. (2013), que utilizou do simulador de tráfego para reproduzir ou prever mudanças no estado de compactação do solo. Os autores avaliaram a aplicação de cinco diferentes intensidades de tráfego, zero, uma, duas, quatro e oito passadas, em campo e em laboratório, sendo que em laboratório utilizou-se um simulador de tráfego devidamente adaptado para a condição de solo agrícola. Obtendo em seu trabalho valores médios das variáveis do experimento de campo estatisticamente iguais aos encontrados em laboratório, comprovando a viabilidade da utilização do simulador de tráfego para experimentos em laboratório.



FIGURA 3. Vistas do simulador linear de tráfego: a) Perspectiva; b) Lateral esquerda; e c) Lateral direita.

3.5. Nível de tráfego e pressão de inflagem do pneu

O tráfego constituiu de quatro passadas do pneu do simulador, baseado no trabalho de Silva et al. (2011) e Couto et al. (2013) que encontraram maiores valores de grau de compactação para o número de quatro passadas. A pressão de inflagem do pneu foi constante para todos os tratamentos, sendo adotada a pressão de inflagem de 96,5 kPa, conforme maior utilização no campo e baseado no trabalho de Couto et al. (2013) que utilizou o mesmo simulador de tráfego.

3.6. Pressão aplicada ao solo

Para aplicação da carga vertical na superfície do solo foi utilizado um macaco hidráulico, a carga aplicada foi monitorada por uma célula de carga posicionada entre a placa de suporte do simulador e o macaco. A célula de carga foi calibrada e ligada a uma balança eletrônica LD1050 da marca líder com capacidade de 2000kg.

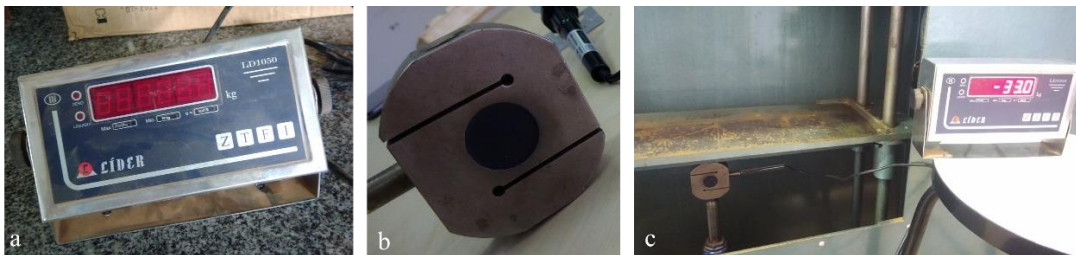


FIGURA 4. Sistema de aplicação de carga: a) Balança eletrônica; b) Célula de carga; e c) Carga aplicada.

O carregamento foi aplicado até que as amostras de solo fosse submetidas a valores de carga de: 0kg (testemunha), 50kg, 100kg, 150kg e 200kg; de acordo com o tratamento. Evidenciando que na amostra testemunha não houve simulação de tráfego, referindo-se a exata condição de campo. As pressões de contato aplicadas ao solo foram calculadas pela equação de Mialhe (1980):

$$Pm = \frac{W}{S}$$

Em que:

Pm = pressão média aplicada ao solo pelo rodado (Pa);

W = carga suportada pelo rodado (N); e

S = área de contato do rodado (m²).

3.7. Determinação da área de contato do pneu com o solo

Na determinação da área de contato entre o pneu e o solo, utilizou-se metodologia proposta por Mazetto et al. (2004), em que um quadro de madeira foi colocado e ajustado sobre o solo, contendo calcário, para ser fotografado junto com a área de contato do pneu para cada pressão estudada. As fotos digitais foram descarregadas em um microcomputador, e as leituras gráficas das áreas de contato foram obtidas utilizando o software AutoCad, sendo ajustadas as proporções do tamanho real com o tamanho da imagem.

Para cada carga aplicada ao solo foi necessário o calcular a área de contato do pneu com o solo, essa metodologia também foi utilizada por Santos et al. (2018).

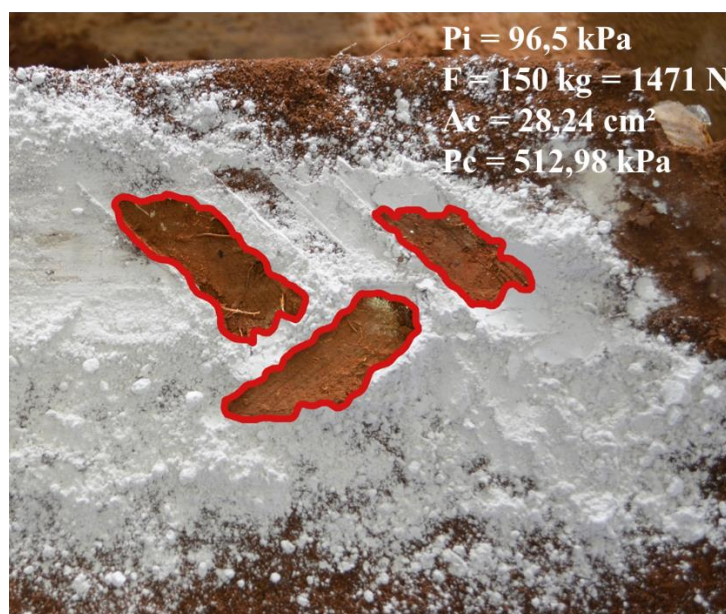


FIGURA 5. Determinação da área de contato do pneu do simulador por meio do software AutoCad: pressão de inflagem 96,5 kPa, carregamento aplicado pelo pneu de 150 kgf e pressão de contato 512,98 kPa.

3.8. Cisalhamento Direto

Para cada bloco de solo ensaiado no simulador de tráfego foram retiradas 3 amostras indeformadas para serem ensaiadas no cisalhamento direto, totalizando 120 amostras. Essas amostras foram retiradas do bloco e moldadas diretamente no molde, de 0,06x0,06m e 0,02m de altura, e colocadas com o auxílio do carimbo na caixa bi-partida

do ensaio. A caixa bi-partida foi fixada na máquina de ensaio na qual o deslocamento da deformabilidade do solo devido a carga aplicada foi medido, e o deslocamento vertical e a tensão aplicada foram registrados.

O ensaio de cisalhamento foi realizado conforme a norma americana ASTM D3080 (2011), com aplicação de pressões estáticas de 25; 50 e 100 kPa. O tempo final de cada carregamento foi determinado em pré-testes, verificando-se que a deformação máxima alcançada na maioria dos testes foi em cinco minutos de aplicação de cada pressão, obtendo parâmetros similares a Carpenedo (1994), Silva et al. (2000) e Braida et al. (2007a). Na figura 7 é possível observar que o maior deslocamento ocorreu após a aplicação da carga, ocasionando leve aumento do deslocamento até cinco minutos, na figura 8 é possível observar que para o tempo de sessenta minutos não houve maior alteração no deslocamento. Visando adotar um padrão com um maior coeficiente de segurança adotou-se o tempo de trinta minutos para cada carregamento.

Após a aplicação dos carregamentos, o deslocamento vertical foi iniciado pela prensa de cisalhamento direto Sheartronic, aplicando-se uma velocidade de deslocamento horizontal de 0,10 mm/min, com um valor de deslocamento horizontal máximo de 10mm. O valor da velocidade adotado foi baseado na curva de deslocamento vertical x raiz do tempo, conforme Head (1986), prolongado-se o trecho retilíneo inicial até encontrar o horizonte correspondente ao trecho final, o ponto de intersecção fornecia a raiz de t_{100} em minutos. O valor de t_{100} era usado para definir a velocidade de cisalhamento, que de acordo com Bishop e Henkel (1962), o tempo requerido para a ruptura (t_r) é relacionado a t_{100} pela equação empírica:

$$t_r = 12,7 \cdot t_{100}$$

Todos os valores de t_{100} encontrados foram menores que um minuto, resultando em tempos finais de ruptura de 12 minutos, e velocidades de 0,83 mm/min, considerada uma alta velocidade de ensaio. O cálculo da velocidade de cisalhamento foi feito admitindo-se que a ruptura ocorreria para um deslocamento menor que 10mm e adotando um tempo de ruptura de 90 minutos. Desta maneira a velocidade calculada foi 0,11 mm/min e a adotada de 0,10 mm/min.

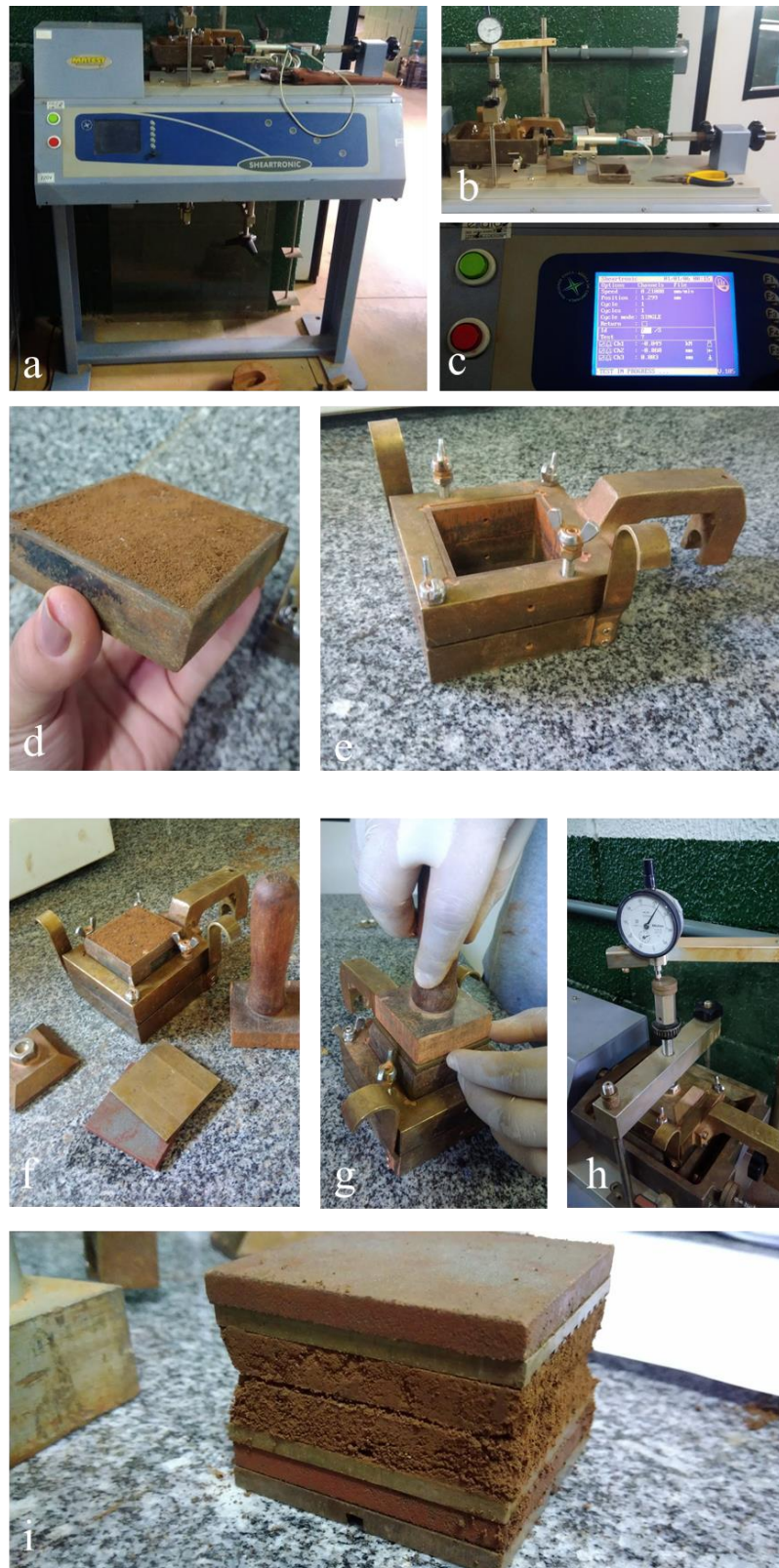


FIGURA 6. Cisalhamento Direto: a) Máquina de cisalhamento Direto Sheartronic; b) Sistema de aplicação de carga; c) Visor da máquina Sheartronic (registra o deslocamento horizontal e a tensão aplicada); d) Molde da amostra indeformada; e) Caixa bi-partida; f) Sistema completo para montagem na caixa bi-partida; g) Retirada da amostra do molde para a caixa bi-partida com carimbo; h) Caixa bi-partida montada na máquina Sheartronic; i) Amostra rompida.

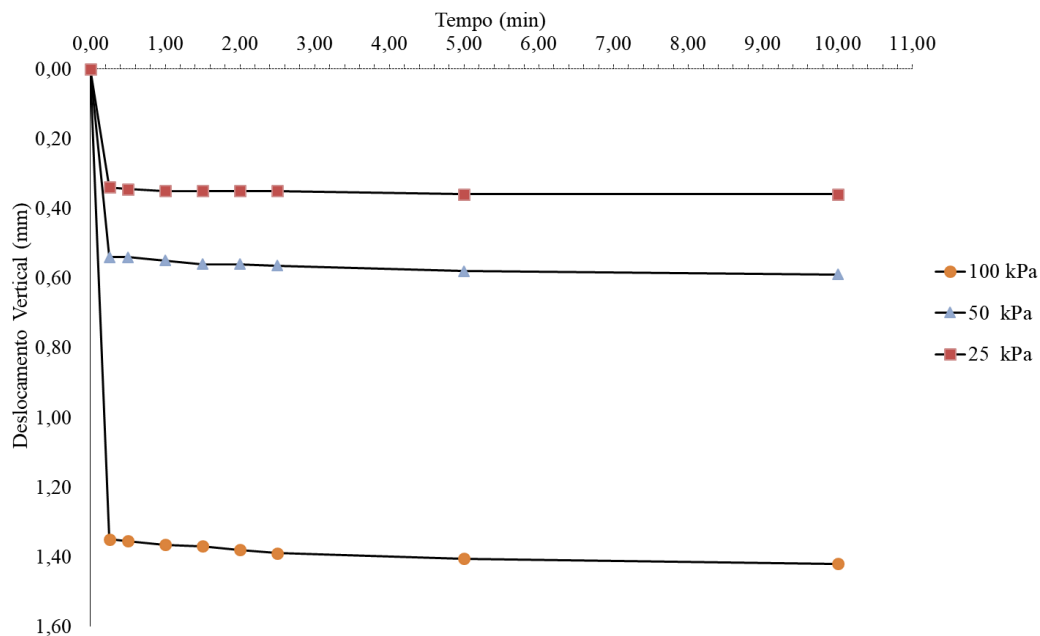


FIGURA 7 – Deslocamento do solo (mm) versus tempo de aplicação de cada pressão para o tempo de 10 minutos (exemplo típico).

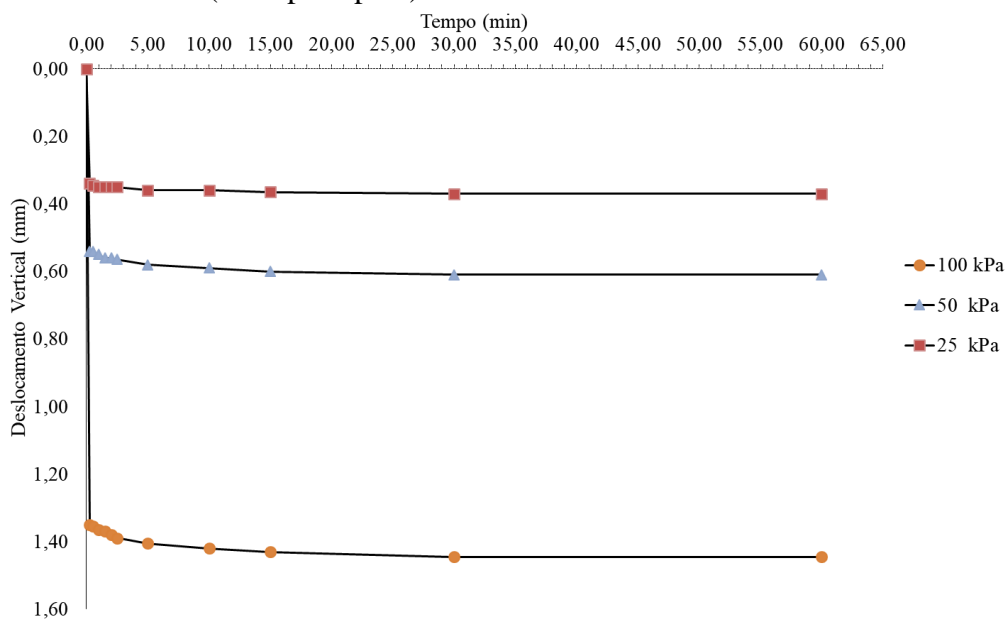


FIGURA 8 – Deslocamento do solo (mm) versus tempo de aplicação de cada pressão para o tempo de 60 minutos (exemplo típico).

3.9. Variáveis analisadas

Foram analisadas as seguintes variáveis: recalque superficial do solo, índice de vazios, densidade, grau de compactação, ângulo de atrito e intercepto coesivo.

3.9.1. Recalque superficial do solo

A influência do tráfego no recalque superficial do solo foi avaliada pelo método fotográfico de leitura dos recalques decrito por Bueno (1987) e utilizado por Taghavifar e Mardani (2012), Couto et. al (2013), Feitosa (2015) e Alcântara (2017). O método permite que através de uma foto antes do tráfego e outra foto após o tráfego, com o auxílio do programa AutoCad e uma planilha Excel, se obtenha a diferença em milímetros da superfície devido ao tráfego.

Bueno (1987) baseou-se no conhecimento da posição real de pontos que possam determinar um plano, chamado de plano de referência global que circunscreve a amostra ensaiada. Com essas referências pode-se conhecer a posição real de qualquer ponto presente numa imagem a ser trabalhada, por intermédio de um fator de escala obtido de um sistema de equações escrito em função das coordenadas locais dos pontos de leitura medidas na foto (AutoCad) e das coordenadas dos marcos de referência do sistema global.

O modelo matemático proposto obtém em cada foto as coordenadas globais e locais dos pontos de referência, conseguindo transformá-las em posições reais de pontos na foto relativas ao sistema de coordenadas criados. Os recalques foram obtidos através de planilha no Excel na qual foi necessário entrar com as coordenadas globais e locais, baseadas nas miras colocadas no simulador de tráfego, e nas seis posições das miras demarcadas sobre a superfície do solo para o cálculo do deslocamento.

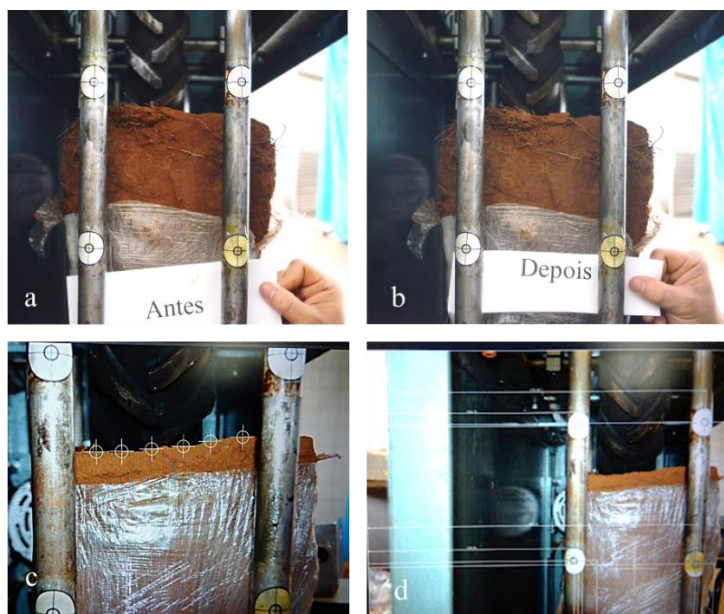


FIGURA 9. Método fotográfico: a) Solo antes do tráfego; b) Após o tráfego; c) Miras demarcadas sobre a superfície do solo; e d) Medidas globais no programa AutoCad.

3.9.2. Índice de vazios

O comportamento do solo depende da quantidade relativa de sólidos, água e ar, podendo os dois últimos variar em função da evaporação e compressão do solo, reduzindo o volume de vazios. As propriedades do solo sofrem influência do volume de vazios, quando este diminui a resistência do solo aumenta, e um dos índices que correlaciona esses parâmetros é o índice de vazios (PINTO, 2012).

O índice de vazios é a relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas, e pode ser calculado pela razão entre o volume de vazios obtido pela diferença entre o volume da amostra e volume seco, pelo volume de sólidos obtido no ensaio de massa específica real dos grãos.

3.9.3. Grau de compactação e densidade

Amostras deformadas de solo foram retiradas das duas áreas para determinar a densidade máxima do solo ($\rho_d \text{ max}$) usando o teste Proctor. O teste de proctor foram realizados em acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas Metodologia (ABNT (1986)). A determinação da densidade máxima consistiu da adição de água a amostra, homogeneização, adição de solo em 3 camadas, e cada camada foi submetida a 26 golpes de soquete. Este processo foi repetido para amostras de solo com diferentes valores de umidade, utilizando-se em média 5 pontos para a obtenção da curva de compactação. O $\rho_d \text{ referência}$ foi extraída como o ponto máximo da relação quadrática entre densidade e teor de umidade do teste Proctor. O grau de compactação foi calculado de acordo com Eq:

$$GC = \frac{\rho_d \text{ campo}}{\rho_d \text{ referência}} 100$$

Em que:

GC = Grau de compactação do solo (%);

$\rho_d \text{ campo}$ = densidade seca obtida no campo; e

$\rho_d \text{ referência}$ = densidade aparente seca máxima obtida no laboratório (Ensaio de Proctor Normal).

O ρ_d campo foi obtido em cada bloco de amostra indeformada após o tráfego no simulador, foi retirado o solo no molde de cisalhamento direto, que conhecido o volume e o peso obteve-se um valor de densidade para cada amostra. A densidade está relacionada com a porosidade total e com a composição orgânica e mineralógica média do solo, correspondendo a uma variável que influencia o comportamento do solo (EMPRABA, 2017).

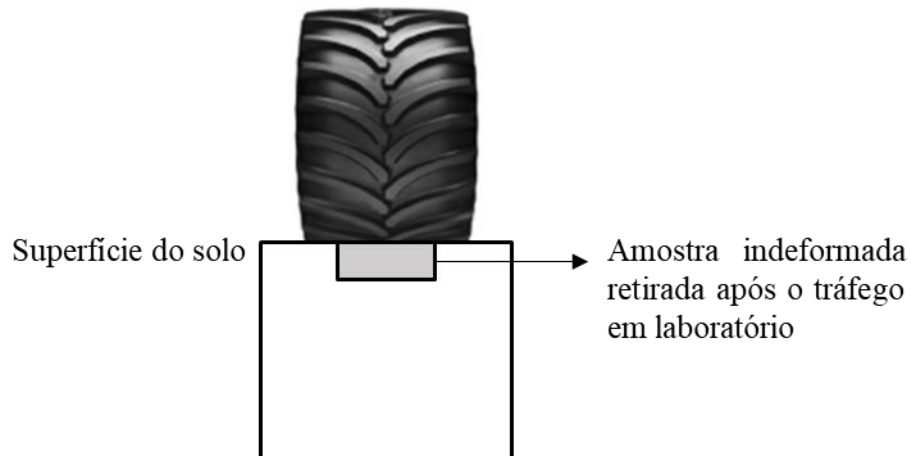


FIGURA 10. Imagem representativa do local de retirada da amostra indeformada do bloco de solo após o tráfego no simulador linear.

3.9.4. Intercepto coesivo e ângulo de atrito

As variáveis intercepto coesivo e ângulo de atrito foram obtidas por meio do ensaio de cisalhamento direto. Os valores da tensão de cisalhamento aplicados ao solo ao longo do deslocamento vertical para cada tensão normal (25, 50 e 100kPa) aplicada são registrados em planilha Excel e gerado um gráfico (Figura 11), a envoltória da tensão cisalhante com a tensão normal é calculada para vários deslocamentos até 100%, representada pelo 10mm (Figura 12).

Atráves do gráfico da envoltória é adicionada uma linha de tendência a qual fornece a equação linear que representa a reta, por meio dos valores da equação é possível obter o intercepto coesivo e calcular o ângulo de atrito. O ângulo de atrito é calculado pelo arcotangente da parcela a da equação, multiplicado por 180 e dividido por π para

seu valor resultar em graus. Obtido as duas variáveis o gráfico do intercepto coesivo e ângulo de atrito pelo deslocamento é gerado (Figura 13).

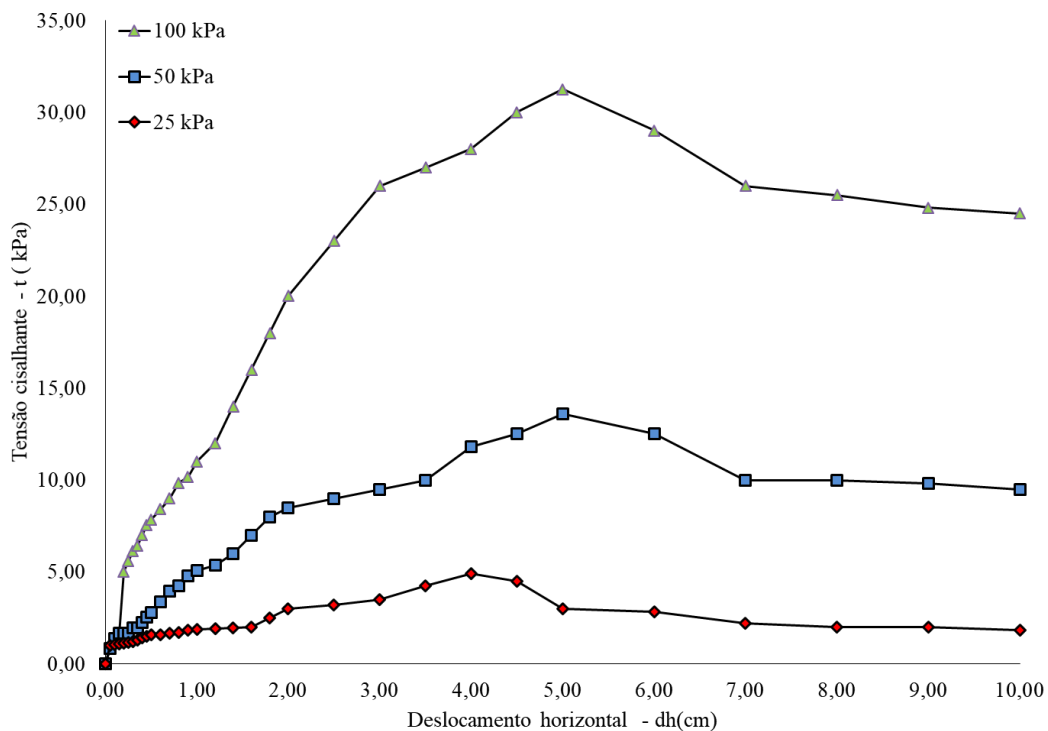


FIGURA 11. Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal de cada tensão normal aplicada (exemplo típico).

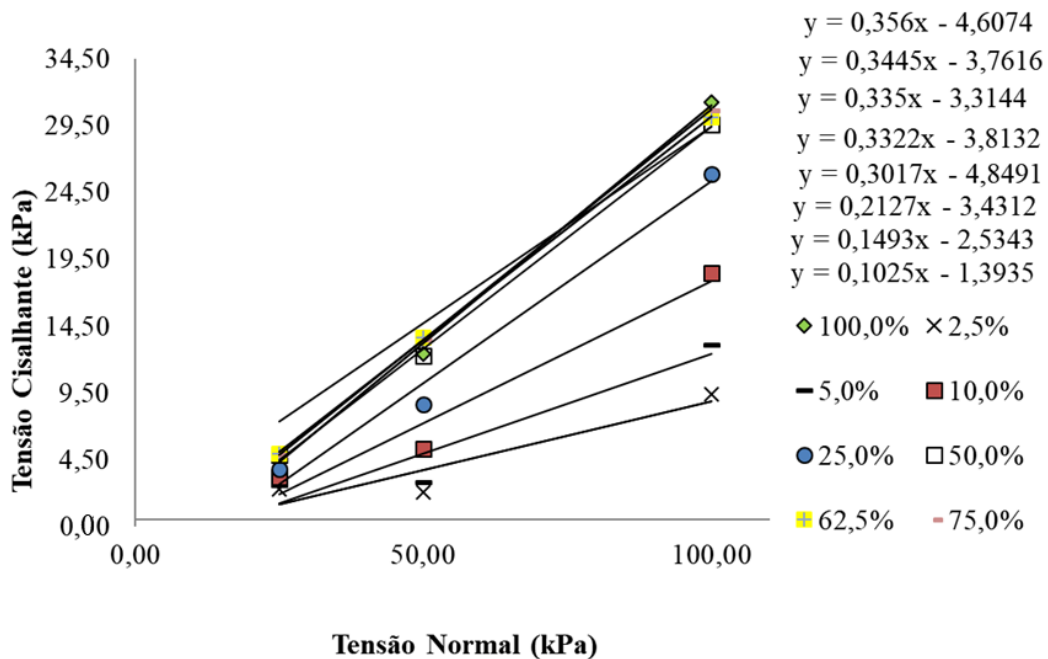


FIGURA 12. Envoltória Tensão cisalhante x Tensão normal de cada deslocamento até 100% (exemplo típico).

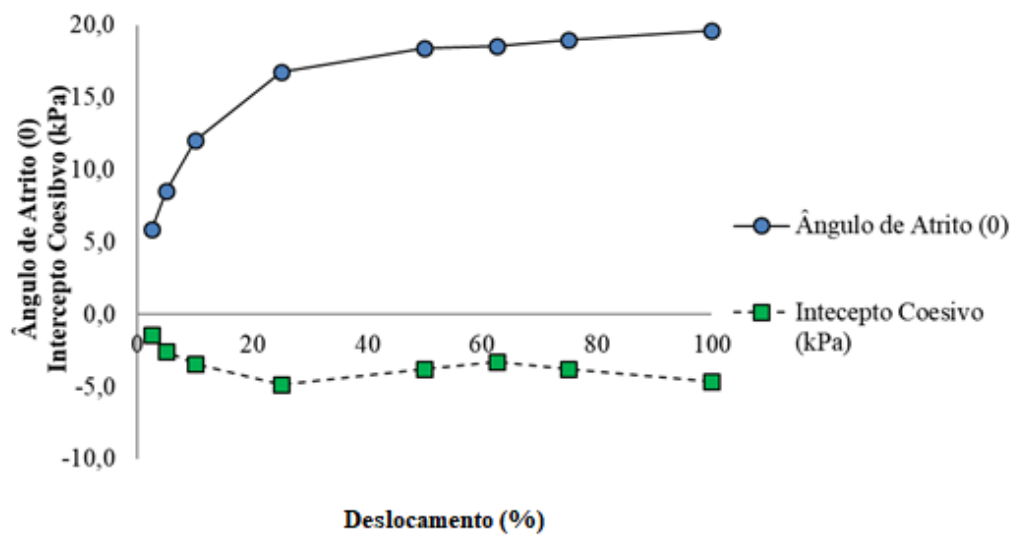


FIGURA 13. Gráfico Intercepto coesivo e $\hat{\theta}$ Ângulo de atrito pelo deslocamento (exemplo típico).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de variância para as variáveis recalque do solo (R), densidade (D), índice de vazios (e), grau de compactação (GC), intercepto coesivo (IC) e ângulo de atrito (Φ) estão apresentados na tabela 3. A análise de variância consiste na decomposição dos graus de liberdade e da variância total de um material, sendo que os graus de liberdade e a soma dos quadrados proporciona uma estimativa de variância, a fim de que se possa obter uma estimativa válida para o erro experimental.

TABELA 3. Resumo da análise de variância das variáveis: recalque do solo (R), densidade (ρ), índice de vazios (e), grau de compactação (GC), intercepto coesivo (IC) e ângulo de atrito (Φ).

FV	GL	R	ρ	e	GC	IC	Φ
Área	1	16,913*	0,001	0,004	1,939	13,769*	400,056*
Carga	4	33,517*	0,014*	0,053*	61,955*	10,170*	65,602*
Área*Carga	4	2,712*	0,003*	0,011*	15,665*	5,649*	18,102*
Resíduo	30	0,222	0,001	0,001	2,205	0,238	0,756
Total	39						
CV(%)		17,32	1,81	3,21	1,78	7,92	3,36
Média		2,72	1,146	1,367	83,223	6,165	25,842

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F

CV: coeficiente de variação (%)

GL: Grau de liberdade

O teste F tem por finalidade comparar estimativas de variância, quando adotado a 5% de probabilidade representa uma confiança de 95% da diferença entre os tratamentos trabalhados não serem casuais. Observa-se que as variáveis recalque do solo, índice de vazios, grau de compactação, intercepto coesivo e ângulo de atrito, sofreram alterações estatisticamente significativas na interação das áreas com as cargas. Todas as variáveis citadas anteriormente também sofreram influência da alteração das cargas de tráfego. Para o efeito da área as variáveis recalque do solo, intercepto coesivo e ângulo de atrito apresentaram diferenças significativas, entretanto para as variáveis grau de compactação, densidade e índice de vazios não notaram-se influência da área.

4.1. Área de contato e pressão de contato com o solo

A pressão exercida no solo está diretamente ligada à relação força/área, conforme um dos objetos de estudo deste trabalho é a força aplicada pelo pneu no simulador de tráfego, a variação da área de contato foi mensurada, e a pressão média aplicada pelo pneu ao solo

foi calculado e apresentada na tabela 4. A comparação entre as médias da área de contato e a pressão média de contato pelas cargas aplicadas foi realizada por meio do teste T de Student, as médias confrontadas no constraste diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

TABELA 4. Área de contato (cm²) e pressão média de contato (kPa) média das áreas em cada carga.

Carga (kgf)	Área de contato (cm ²)		Pressão média de contato (Kpa)	
50	21,875	d	215,018	d
100	26,604	c	381,563	c
150	28,243	b	512,988	b
200	30,062	a	689,973	a

*Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste T (P>5%)

Devido a pressão de inflagem dos pneus ser um fator de influência na área de contato com o solo e conseqüentemente na pressão de contato, é importante ressaltar que a pressão interna do pneu manteve-se constante durante o experimento. A escolha da pressão de inflagem do pneu de valor baixo (96,5 kPa) é justificado por ser um valor mais utilizado em campo, e por também ter sido utilizada no trabalho de Couto et al. (2013) que utilizou o mesmo simulador de tráfego.

Na figura 14 é possível ver o comportamento quadrático da área de contato em relação a carga, a qual evidencia um comportamento crescente em função da carga, esse comportamento é confirmado por Taghavifar e Mardani (2012) que avaliando o efeito de cargas verticais atuantes no pneu, e variadas pressões de inflação do pneu, obteve que a área de contato com o solo aumentou em relação ao aumento da carga vertical aplicada para a mesma pressão de inflação do pneu, porém a área de contato apresenta uma limitação para seu aumento, não correspondendo a um comportamento linear de crescimento.

Na figura 15 é apresentado o comportamento crescente e linear da pressão média de contato com a carga vertical aplicada, corroborado por Couto (2013) que ao utilizar a mesma pressão de inflagem do pneu, o mesmo simulador de tráfego, obteve valores similares de pressão de contato e observou um comportamento linear crescente em relação a carga. A correlação obtida para a área de contato e pressão média de contato em

função de cargas crescentes demonstrou diferença significativa para as cargas de maneira crescente para as duas variáveis, obtendo maiores valores para a carga de 200kgf.

As pressões médias aplicadas no simulador de tráfego estão entre 215 e 689 kPa, valores estes que estão dentro da estimativa das pressões médias aplicadas aos solos pelas máquinas agrícolas, as quais situam entre 50 e 300 kPa, e dos reboques e caminhões que exercem pressões entre 300 e 600 kPa (Lebert & Horn, 1991; Carpenedo, 1994; Silva et al., 2000; Silva et al., 2000).

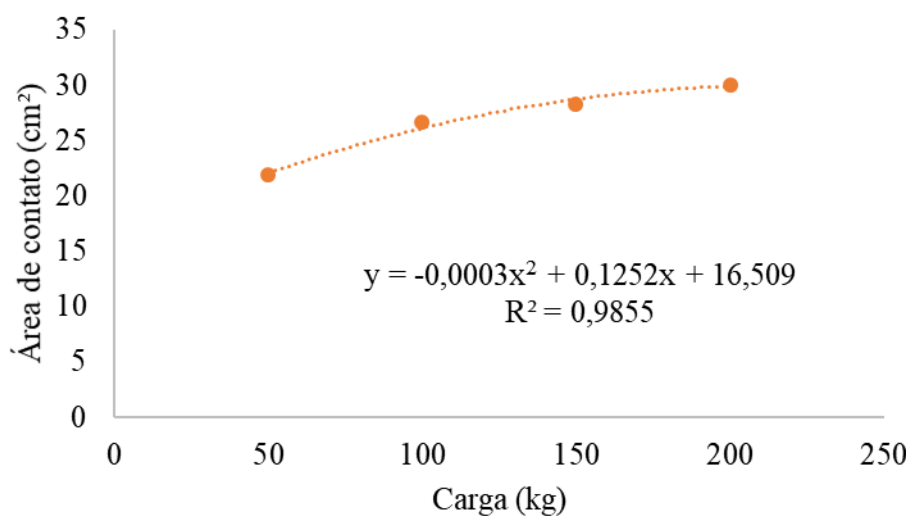


FIGURA 14. Valores médios de área de contato (cm²) em função das cargas para as áreas.

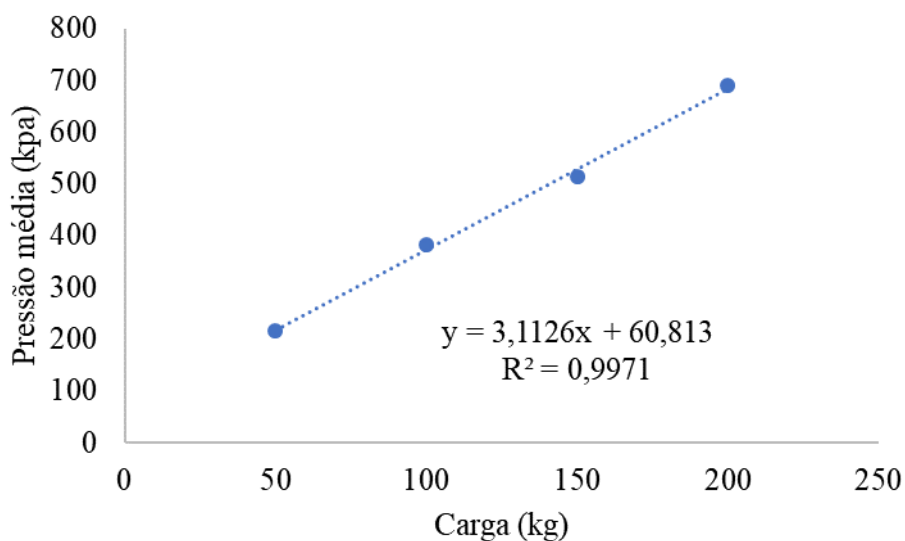


FIGURA 15. Valores médios de pressão média de contato (kPa) em função das cargas para as áreas.

4.2.Recalque do solo

O comportamento do recalque do solo em função da carga aplicada e da área utilizada apresentou diferença significativa, conforme apresentado na tabela 3. O efeito da interação da carga nos valores de recalque sofrido pelo solo na Apd (plantio direto) e na Apc (plantio convencional), são apresentados na figura 16. Essa interação é representada estatisticamente pela regressão constatando um comportamento linear, o modelo matemático constata que 98% da variação sofrida pelo recalque do solo pode ser explicado pela carga na simulação de tráfego.

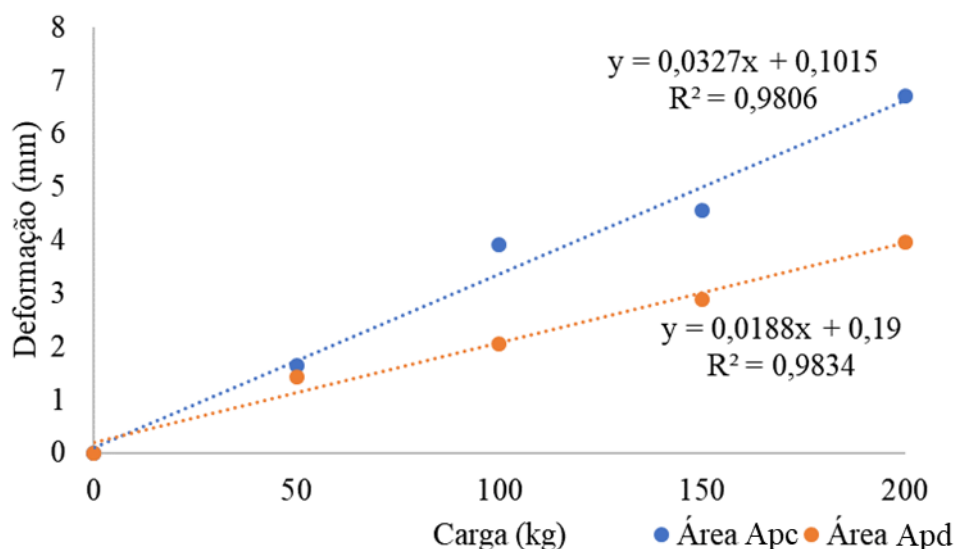


FIGURA 16. Recalque superficial do solo em função das cargas de tráfego nas duas áreas.

A carga aplicada no solo pelo tráfego do trator aumentou o recalque em função do aumento da mesma para as duas áreas. Demonstrando uma tendência de aumento na deformação superficial da camada do solo com o aumento da carga aplicada ao mesmo.

Os resultados encontrados são conforme Alcantara (2017) que utilizando diferentes valores peso/potência encontrou valores de recalque crescentes para peso/potência crescentes. Mion et al (2016) ao avaliarem numericamente a distribuição dos deslocamentos e tensões atuantes em um solo provocada pela passagem de um trator agrícola, encontraram valores crescentes de deslocamento vertical para valores de pressões crescentes, conforme encontrado nesse estudo. Taghavifar e Mardani (2013) avaliando a compactação em diferentes cargas, velocidades e números de passadas do trator, obtiveram valores crescentes de recalque para o número de passadas e em função do aumento da carga, corroborando o estudo atual.

Nas duas áreas o aumento do recalque foi conforme o aumento da carga, os maiores valores de deformabilidade foram para a carga de 200kg para as duas áreas. A área de plantio direto apresentou maiores valores de recalque em comparação a área de plantio convencional.

A tabela 5 mostra a análise do desdobramento da carga dentro de cada área, a diferença entre o recalque das áreas foi a partir da carga de 100kg, sendo a área de plantio direto a área que apresentou maiores valores de deformabilidade. Esse resultado pode ser justificado devido a área de plantio direto apresentar maior valor de índice de vazios e porosidade iniciais que a área de plantio convencional, possibilitando um rearranjo estrutural maior quando aplicada maiores cargas sobre esse solo.

TABELA 5. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável deformabilidade (mm) em cada sistema de manejo.

Carga(kg)	Área Apd	Área Apc
0	0,000 a	0,000 a
50	1,650 a	1,440 a
100	3,925 a	2,047 b
150	4,560 a	2,885 b
200	6,717 a	3,977 b

*Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>5$)

4.3.Densidade

Conforme a análise de estatística demonstrada na tabela 2, a variável densidade apresentou relação para a interação das áreas com as cargas. Conforme as figuras 19 e 20 é possível notar que a densidade do solo da área de plantio direto e plantio convencional apresentam relação quadrática com a carga, e a equação expressa nas figuras demonstram que em média 83% da variação da densidade depois do tráfego é explicada pelo aumento da carga.

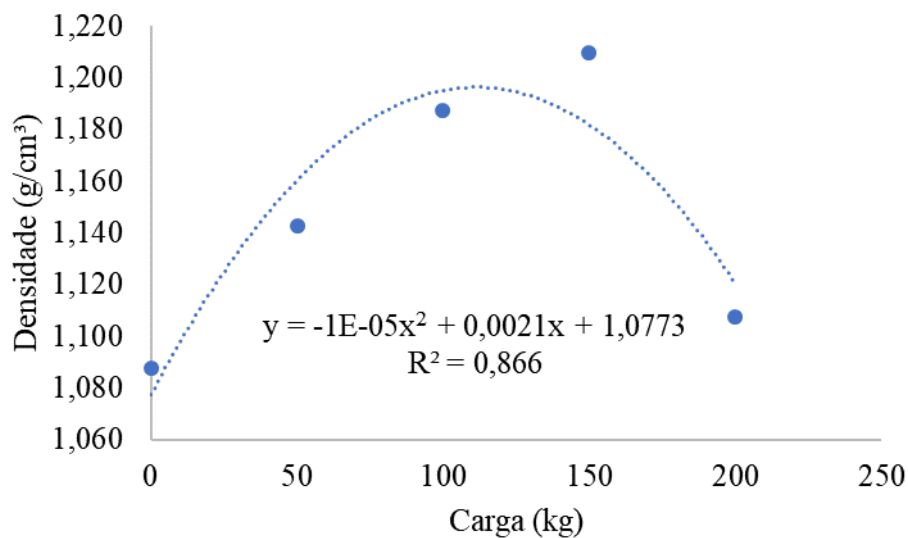


FIGURA 17. Regressão da variável densidade (g/cm³) do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apd.

Na figura 17 é possível observar que a densidade do solo do plantio direto apresenta um acréscimo até a carga de 150kg, encontrando-se o valor da densidade correspondente a carga de 200kg com menor valor que a carga anterior.

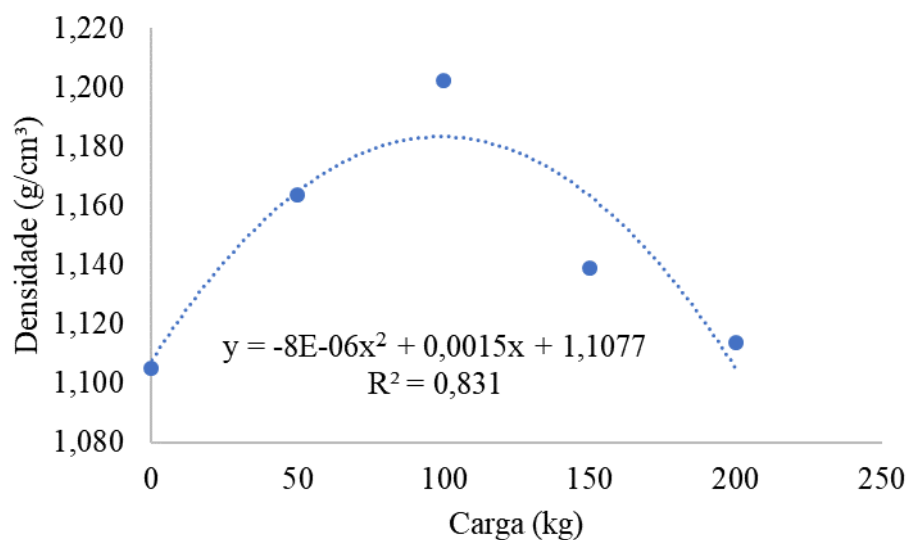


FIGURA 18. Regressão da variável densidade (g/cm³) do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apc.

Na figura 18 é possível observar que a densidade do solo do plantio convencional apresenta um acréscimo até a carga de 100kg, encontrando-se um decréscimo de valor da densidade a partir da carga de 150kg.

O comportamento de acréscimo da densidade do solo com o aumento da carga de simulação de tráfego nas áreas de plantio é justificada pelo tráfego de máquinas agrícolas alterarem propriedades do solo, fazendo com que a densidade do solo seja aumentada com o aumento da carga (Reichert et al., 2016).

Os efeitos da densidade do solo resultam no rearranjo estrutural das partículas do solo e das cargas exercidas durante o tráfego pelas máquinas, conforme Botta et al. (2011). Podendo ser indicada essa tendência do efeito do tráfego influenciar na densidade do solo pelas mudanças nos valores da densidade, e a propensão do rearranjo das partículas do solo ser visualizada pela relação quadrática com a carga.

Reichert et al. (2016), em seu estudo sobre o efeito a longo prazo do plantio direto e do tráfego a nas propriedades do solo, observou que com o aumento do tempo do sistema de plantio direto a densidade apresentou uma tendência a aumentar inicialmente até atingir um valor estável após 3,5-5 anos da adoção do sistema. Visto que a área de estudo ainda apresenta um histórico considerado inicial, pode ser um indício do motivo pelo qual na tabela 6 as áreas não apresentarem diferença estatística entre si para a condição inicial para essa variável.

TABELA 6. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável densidade do solo na interação da carga em cada sistema de manejo.

Carga (kg)	Área Apd	Área Apc
0	1,088 a	1,105 a
50	1,143 a	1,164 a
100	1,188 a	1,203 a
150	1,210 a	1,139 b
200	1,108 a	1,114 a

*Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 5$)

4.4.Índice de vazios

O índice de vazios apresentou relação para a interação das duas áreas com as cinco cargas, em concordância com a tabela 2. Essa variável apresenta relação quadrática com a carga para os solos da área de plantio direto e plantio convencional, e a equação expressa nas figuras demonstram que em média 88% da variação do índice de vazios depois do tráfego é explicada pelo aumento da carga, conforme as figuras 19 e 20.

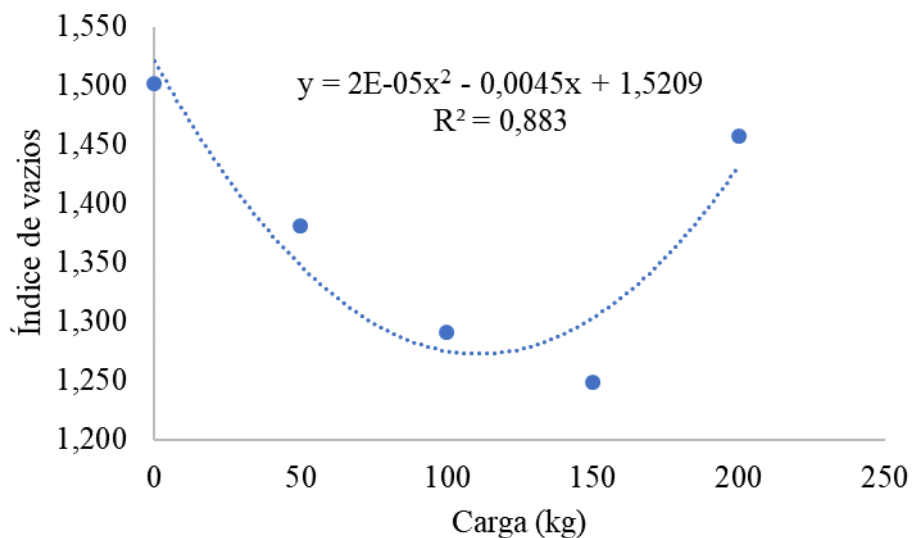


FIGURA 19. Regressão da variável índice de vazios do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apd.

Para o plantio direto o índice de vazios apresentou uma relação quadrática com tendência a mudar a diminuição dos valores na carga de 150kg, apresentando um valor maior para a carga de 200kg.

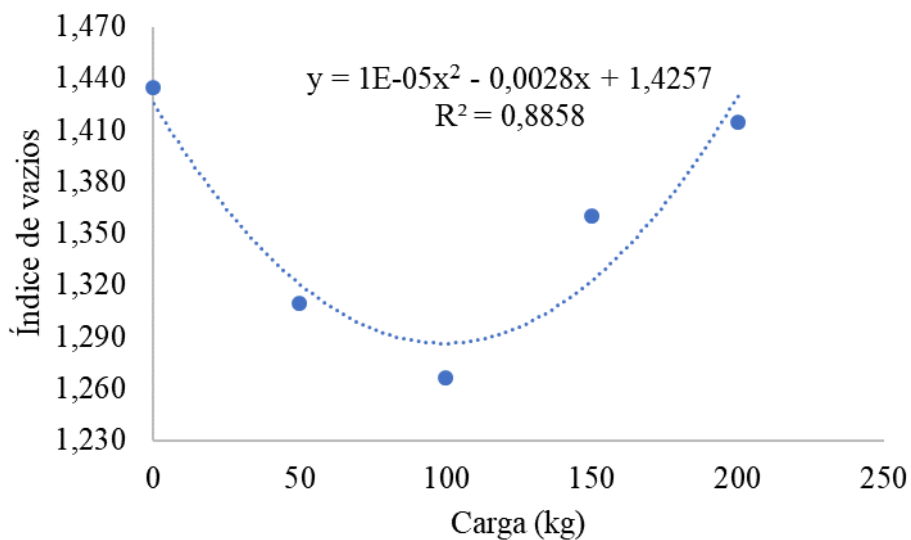


FIGURA 20. Regressão da variável índice de vazios do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apc.

O índice de vazios para o solo sob plantio convencional, apresentou uma relação quadrática com tendência a mudar a diminuição dos valores na carga de 100kg, apresentando um valor maior a partir da carga de 150kg.

TABELA 7. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável índice de vazios do solo na interação da carga em cada sistema de manejo.

Carga (kg)	Área Apd	Área Apc
0	1,502 a	1,435 b
50	1,381 a	1,309 b
100	1,291 a	1,267 a
150	1,249 b	1,361 a
200	1,457 a	1,415 a

*Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 5$)

Analisando a tabela 7 é possível notar que para as cargas de 100kg e 200kg não houve diferença estatística entre as áreas, para as cargas de 0kg e 50kg a área de plantio direto apresentou maiores valores que a área de plantio convencional, e para a carga de 150kg a área de plantio convencional apresentou maior valor de índice de vazios que a área de plantio direto.

Por meio da tabela é plausível assumir que os valores iniciais do índice de vazios do solo sob plantio direto são maiores do que o solo sob plantio convencional. Os valores encontrados estão conforme o esperado neste estudo, pois o plantio direto afeta de forma significativa as propriedades de capacidade do solo, resultando em uma porosidade e macroporosidade maiores, sendo justificável o maior valor inicial de índice de vazios encontrado para o solo sob plantio direto (REICHERT et al., 2016).

A mudança nos valores de índice de vazios para a carga de 150kg no solo sob plantio direto e de 100kg no solo sob plantio convencional são um indício do rearranjo da estrutura do solo após uma carga acima da qual o solo poderia suportar, a qual poderia promover uma possível ruptura da estrutura do solo promovendo um estado residual (SILVA et al., 2011). O retorno a média entre as médias iniciais e as médias finais da carga de 200kg para a Apd e Apc demonstram o estado residual após a ruptura do solo.

4.5. Grau de compactação

Verifica-se que houve efeito significativo da interação das cargas de tráfego com as áreas no grau de compactação a 95% de confiança. A interação das cargas com as áreas pode ser representada pela regressão na figura 21 e 22.

A análise de regressão indicou comportamento quadrático para o grau de compactação depois do tráfego, e a equação expressa nas figuras demonstram que em média 83% da variação do grau de compactação depois do tráfego é explicada pelo aumento da carga.

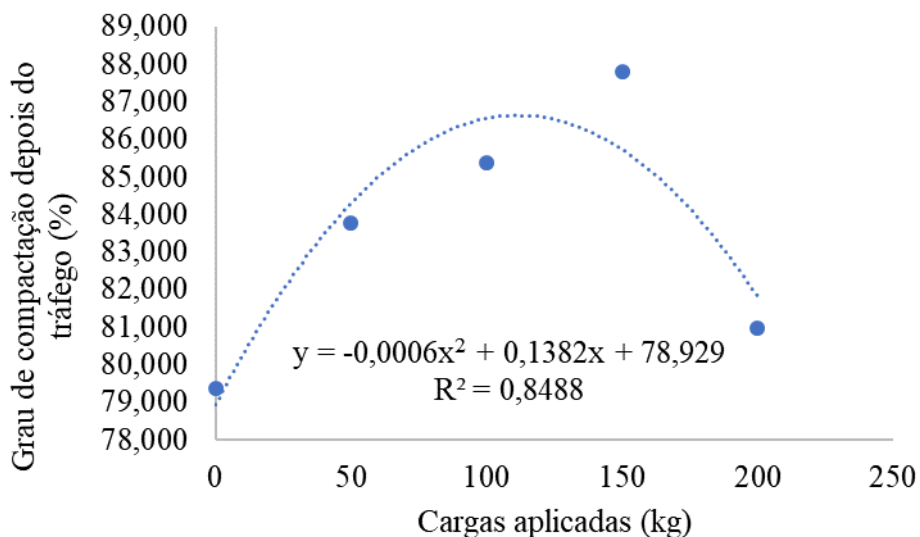


FIGURA 21. Regressão da variável grau de compactação do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apd.

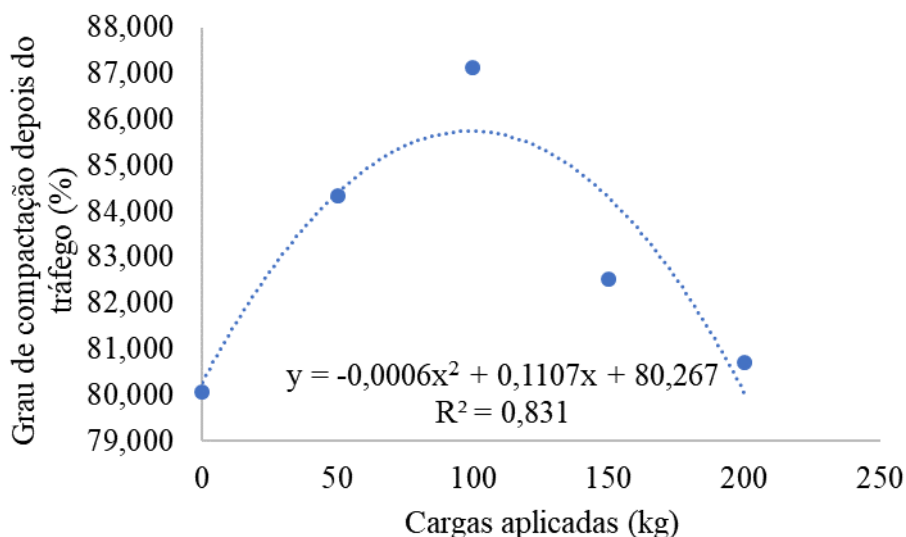


FIGURA 22. Regressão da variável grau de compactação do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apc.

É possível notar que para área de plantio direto o grau de compactação apresenta crescimento da carga 0kg até a carga 150kg, apresentando maior valor de compactação

para a carga de 150kg. Para a área de plantio convencional o aumento do grau de compactação ocorreu até a carga de 100kg, apresentando maior valor de compactação para a carga de 100kg.

TABELA 8. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável grau de compactação (%) da carga em cada sistema de manejo.

Carga(kg)	Área Apd		Área Apc	
0	79,380	a	80,073	a
50	83,783	a	84,330	a
100	85,379	a	87,138	a
150	87,809	a	82,518	b
200	80,957	a	80,707	a

*Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>5$)

Na tabela 8 é possível notar que apenas a carga de 150kg apresentou diferença significativa para o grau de compactação entre a área de plantio direto e convencional. A ínfima diferença entre áreas pode ser justificada pelo fator de a área de plantio direto ainda possuir um histórico de apenas 2 anos sob esse sistema de manejo, classificada como histórico inicial (REICHERT et al., 2016). Porém a área de plantio direto apresenta uma queda no grau de compactação para a carga de 150kg enquanto a área de plantio convencional apresenta a queda para a carga de 100 kg, mostrando que a estrutura do solo da área de plantio direto apresenta uma tendência a suportar maiores cargas antes da alteração de sua estrutura, validando uma melhora estrutural no solo. Após o rearranjo estrutural as estruturas do solo possuem uma predisposição de apresentarem um estado com tendências residuais após 100kg sob plantio convencional e após 150 kg sob plantio direto.

O sistema de plantio direto, ao longo do tempo, apresenta uma tendência a diminuir o grau de compactação na superfície do solo (REICHERT et al., 2016), podendo a diminuição desta variável fornecer melhores condições para o crescimento das plantas e contribuir para a agregação do solo melhorando sua estrutura (Veiga et al., 2007), colaborando para que o solo consiga resistir a cargas de compactação aplicadas (Cavaliere et al., 2009). Demonstrando que apesar de ainda não possuir diferença estatística entre os valores iniciais de grau de compactação, o valor do grau de compactação do plantio direto é inferior ao do plantio convencional, existindo uma possível tendência desse valor diminuir ao longo do tempo.

Esses resultados confirmam o aumento do grau de compactação do 0 kg para as amostras com carga, conforme encontrado por Couto et al (2013) e Lima et al (2017). Lima et al. (2017) realizou um experimento para avaliar as mudanças nos indicadores de compactação em resposta ao tráfego agrícola em duas áreas com diferentes teores de argila, onde houve compactação de ambos os solos depois do tráfego. Essa compactação pôde ser verificada pelas diferenças nas médias do grau de compactação e, conseqüentemente, a verificação de variação significativa na densidade, que se refere à compactação do solo. Para o solo com menor teor de argila o grau de compactação aumentou de 83 para 86% enquanto no solo com maior teor de argila aumentou de 84 pra 88%. Comprovando que o tráfego resultou em compactação, evidenciado pelas mudanças significativas no grau de compactação.

Couto et al (2013) avaliou o aumento do grau de compactação em relação ao número de passadas, também obtendo acrcsimo do grau de compactação em relação a amostra testemunha do solo. O autor obteve aumento do grau de compactação até 4 passadas, obtendo uma tendência do comportamento quadrático diminuir o grau de compactação para 8 passadas, demonstrando que não houve maior grau de compactação a partir de 4 passadas. Nesse experimento a carga aplicada demonstrou aumento no grau de compactação, podendo ser justificado seu menor grau de compactação para cargas maiores pela mudança na estrutura do solo, ocasionando o rearranjo dos vazios do solo.

Silva et al (2011) justificou a queda dos valores de grau de compactação de 4 passadas para 8 passadas pelo fato dos niveis de pressões aplicadas serem maiores que a capacidade de suporte de carga do solo, o que promoveu a destruição de sua estrutura. No caso deste experimento a a estrutura do solo apresentou uma propensão a ser alterada pela carga de 150kg para o solo sob plantio direto e 100kg para o solo sob plantio convencional.

O grau de compactação é correlacionado com o crescimento e desenvolvimento satisfatório de plantas, correspondendo a um grau de compactação de aproximadamente 75% para solos com 30 – 70% de argila, os solos das áreas de estudo se classificam nesse percentual de argila, verificando ser valores elevados de grau de compactação para o desenvolvimento das plantas. Freddi (2007) constatou que o grau de compactação a partir do qual ocorrem limitações severas ao desenvolvimento do milho de textura média e argilosa foi de 78 e 80%, corroborando que os valores encontrados limitariam o desenvolvimento da cultura.

4.6. Intercepto coesivo

Conforme análise estatística, o intercepto coesivo apresentou relação significativa para a interação área e carga, apresentando diferença entre as áreas e entre as cargas aplicadas. Conforme a figura 23 é possível notar que o intercepto coesivo da área de plantio direto apresenta relação quadrática com a carga, enquanto a área de plantio convencional apresenta relação cúbica do intercepto coesivo com a carga (figura 24).

Na área de plantio direto ocorre uma relação de acréscimo do intercepto coesivo em função do aumento da carga, sendo a carga de 150kg com maior valor de intercepto coesivo, começando a reduzir para a carga de 200kg. Na área de plantio convencional a carga de 150kg também apresenta maior valor de intercepto coesivo, enquanto a carga de 200kg apresentou menor valor.

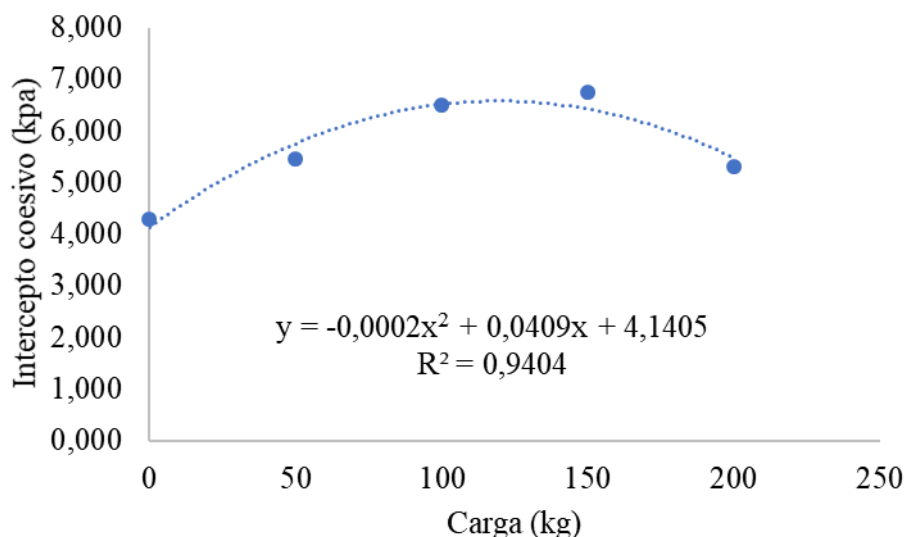


FIGURA 23. Regressão da variável intercepto coesivo do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apd.

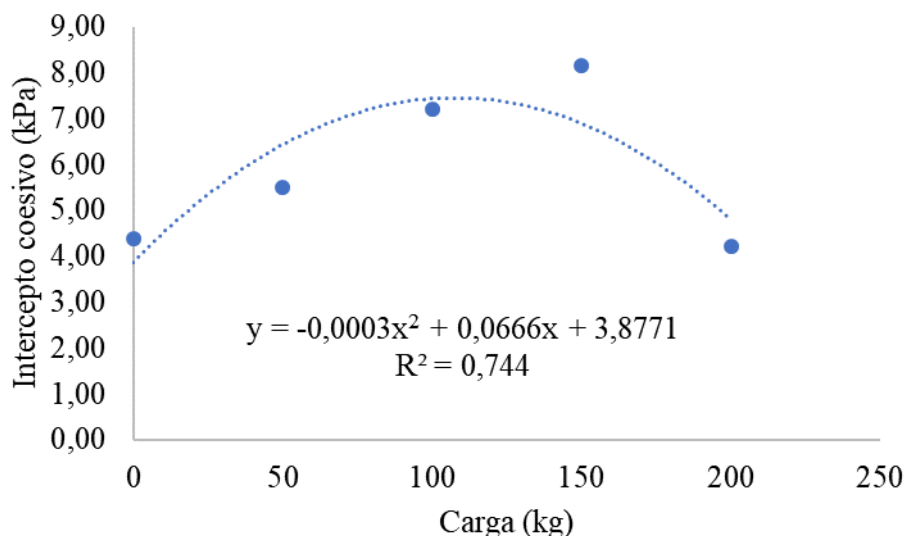


FIGURA 24. Regressão da variável intercepto coesivo do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apc.

Na tabela 9 é possível verificar o comportamento do intercepto coesivo nas áreas, havendo diferença significativa entre as mesmas. Para as menores cargas de 50kg e 100kg não houve diferença entre as áreas de plantio direto e convencional, possivelmente foi devido a compacidade do suporte de carga, já nas maiores cargas houve diferença. A área de plantio convencional apresentou maior valor do intercepto coesivo para a carga de 0kg, já para a carga de 200kg a área de plantio direto apresentou maior valor.

TABELA 9. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável intercepto coesivo (kPa) da carga em cada sistema de manejo.

Carga (kg)	Área Apd		Área Apc	
0	4,290	a	4,380	a
50	5,463	a	5,507	a
100	6,500	a	7,190	a
150	6,738	b	8,140	a
200	5,318	a	4,208	b

* Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 5\%$)

Os resultados encontrados estão conforme os valores médios de coesão descritos variando de 0 a 49 kPa nos solos, sendo para solos com argila essa variação de 4 a 49 kPa.

A não diferença significativa para a coesão em alguns valores entre os dois solos pode ser justificada pelo teor de matéria orgânica não ter afetado a coesão no ensaio de cisalhamento direto (BRAIDA, 2004).

A variação dos valores de coesão encontrados neste estudo apresentaram uma tendência a diminuir a partir de certa carga aplicada na simulação de tráfego, porém o intercepto coesivo é influenciado por diferentes variáveis como o teor de carbono do solo, a quantidade de argila e a tensão de água no solo, fazendo-se importante estudar a coesão em função de outras variáveis para comparar os resultados obtidos.

4.7. Ângulo de atrito

O ângulo de atrito sofreu interferência significativa para a interação das cargas aplicadas com a área. A Apd (plantio direto) e Apc (plantio convencional) podem ser correlacionadas por uma relação quadrática conforme figura 25 e 26.

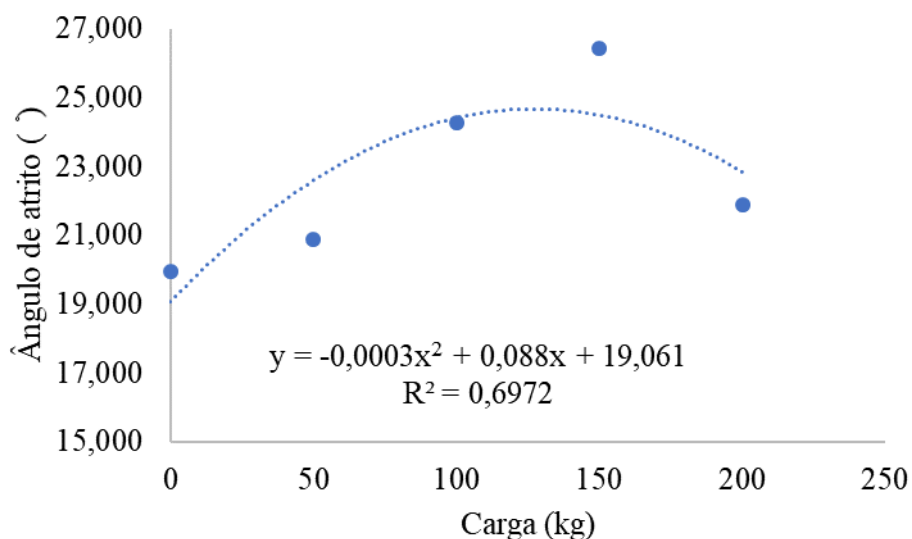


FIGURA 25. Regressão da variável ângulo de atrito (°) do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apd.

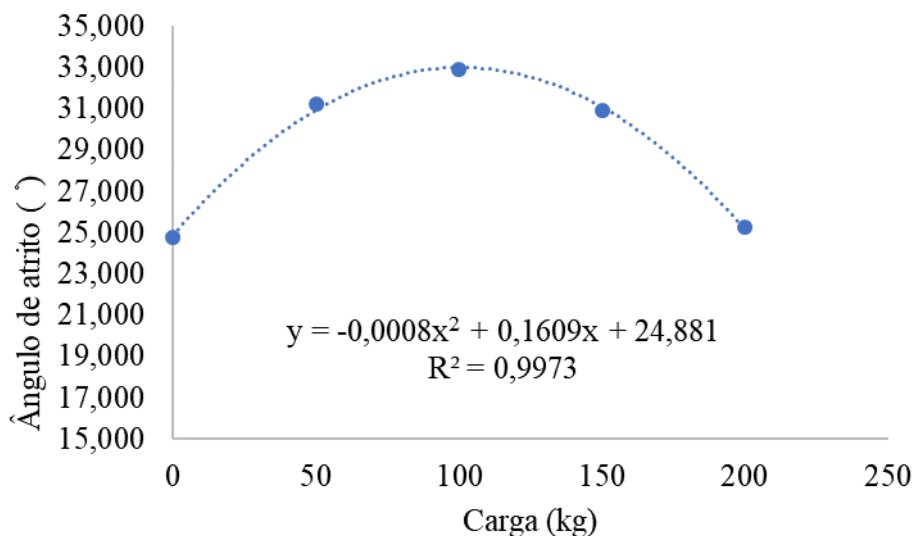


FIGURA 26. Regressão da variável ângulo de atrito (°) do solo após o tráfego em função das cargas aplicadas, Apc.

Por meio do teste de médias entre os valores do ângulo de atrito para as cargas, dentro da mesma área, verifica-se um retorno a média inicial para a carga de 200kg, constatando a ruptura do solo. Verifica-se que a área de plantio convencional apresentou maiores valores de ângulo de atrito para todas as cargas. Na área de plantio direto é possível notar o aumento do ângulo de atrito com o aumento da carga, sendo o maior valor para a carga de 150kg e caindo seu valor para a carga de 200kg, conforme tabela 10. Na área de plantio convencional o aumento do ângulo de atrito ocorre até a carga de 100kg, decaindo seu valor para 150 e 200kg.

TABELA 10. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para a variável ângulo de atrito (°) da carga em cada sistema de manejo.

Carga (kg)	Área Apd	Área Apc
0	19,950 b	24,750 a
50	20,875 b	31,225 a
100	24,250 b	32,900 a
150	26,425 b	30,900 a
200	21,900 b	25,250 a

* Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 5\%$)

Os resultados encontrados estão conforme os valores médios de ângulo de atrito que variam de 12° a 37°, conforme o tipo do solo. Braida et al. (2007b) em seu estudo

disponibilizou uma tabela com valores médios de ângulo de atrito para Latossolos vermelhos, os quais variaram de 9° a 44° conforme quantidade de argila, corroborando os valores encontrados neste estudo.

Como valores médios Ferreira et al. (2013) encontrou para um solo argiloso valores de ângulo de atrito de 29° a 33° em seu estudo sobre solo-muro. Posselt (2016) ao analisar parâmetros de resistência do solo em um estudo de caso encontrou para um solo argiloso valores de 30° para o ângulo de atrito. Os dois estudos apresentaram valores encontrados nesse trabalho.

A redução da densidade do solo representa uma redução do número de pontos de contato entre as partículas, reduzindo portanto o atrito entre elas, demonstrando que a redução dos valores de ângulo de atrito do solo eram esperados já que o comportamento da densidade do solo reduziu a partir das mesmas cargas (BRAIDA et al., 2007a).

Os valores menores de ângulo de atrito encontrados para o solo sob plantio direto são justificados pelo estudo de Braida (2004), o qual estudou a matéria orgânica e sua relação com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto realizando ensaios de cisalhamento direto. Em suas análises, devido o plantio direto permitir um enriquecimento das camadas superficiais com matéria orgânica, ele concluiu que o aumento do teor de matéria orgânica, nos dois solos estudados, diminuiu significativamente o ângulo de atrito interno.

5. CONCLUSÕES

A interação entre as cargas aplicadas e as duas áreas adotadas nesse estudo afetaram de forma significativa o recalque, a densidade, o índice de vazios, o grau de compactação, o ângulo de atrito e o intercepto coesivo.

O maior recalque superficial ocorreu com a carga de 200kg para o plantio direto e convencional, apresentando maior valor na área PD, apresentando tendência linear de crescimento. O maior valor do recalque superficial para o PD é justificado pelo maior índice de vazios iniciais quando comparado ao PC.

Considerando o carregamento de 100kg, anterior a ruptura e rearranjo estrutural do solo no PC, pode-se verificar que o GC, quando comparados PC x PD foram de 87,13% x 85,38%. Evidenciando o melhor comportamento estrutural do PD para os carregamentos aplicados até 100kg.

A densidade não apresentou variação significativa entre os dois sistemas de manejo, porém apresentou o mesmo comportamento que as demais variáveis em relação as cargas, de acréscimo até 150kg para o PD e até 100kg para o PC.

O intercepto coesivo apresentou maiores valores para a carga de 150kg, sendo que a área PC obteve maiores valores.

O ângulo de atrito apresentou maiores valores para a carga de 150 kg para área PD e 100kg para área PC, apresentando maiores valores para a área PC, demonstrando maior resistência do solo para o PC.

É possível notar a propensão a alteração estrutural do solo com a simulação de tráfego para a aplicação da carga de 150kg no PD e de 100kg no PC, relacionando-se a diminuição a resistência do solo (representado pelo ângulo de atrito) e alteração do comportamento do índice de vazios e grau de compactação.

De acordo com as variáveis analisadas neste estudo o PD apresentou melhores valores estruturais quando comparado ao PC, pois o solo sob plantio direto apresentou menores valores de ângulo de atrito, relacionando-se a diminuição da resistência do solo, maiores valores de índice de vazios e menores valores de grau de compactação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.519-531, 2004.

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; van der LINDEN, J. P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: a review: Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, v.73, p.145-160, 2003.

ALCÂNTARA, A. S. **Resistência mecânica do solo ao tráfego de pneus radiais em função da relação peso/potência do trator**. 2017. (Mestrado em Agronomia – Ciência do solo) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Solo – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7182**: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro: ABNT, 1986b. 9p.

ASTM D3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken: ASTM, 2011. 6p.

BACHMANN, J.; CONTRERAS, K.; HARTGE, K.H.; MACDONALD, R. Comparison of soil strength data obtained in situ with penetrometer and with vane shear test. **Soil and Tillage Research**, v.87, p.112-118, 2006.

BARBOSA, J. A.; VIEIRA, L. B.; DIAS, G. P.; DIAS JÚNIOR, M. D. S. Desempenho operacional de um trator agrícola equipado alternadamente com pneus radiais e diagonais. **Engenharia Agrícola**, v.25, p.474-480, 2005. ISSN 0100-6916.

BERISSO, F. E.; SCHOJONNING, P.; LAMANDÉ, M.; WEISSKOPF, P.; STETTLER, M.; KELLER, T. Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. **Soil and Tillage Research**, v.131, p.36-46, 2013.

BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D. & BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, vol 58, p. D555-560, 2001.

BISHOP, A. W., HENKEL, D.J. **The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test**. 2ed. Londres, Edward Arnold LTD, 1962.

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. 126p. (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SOARES, J. M. D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. **Ciência Rural**, v. 37, n. 6, 2007a.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SOARES, J. M. D. Resistência inter e intra-agregados em ensaios de cisalhamento direto de um nitossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, 2007b.

BRAJA DAS, M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**, tradução da edição norte-americana. 8 ed. Cengage, 2015.

BOTTA, G.F.; JORAJURIA, D.; ROSATTO, H. & FERRERO, C. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. **Soil and Tillage Research**, vol. 86, pag 9-14, 2006.

BOTTA, G. F., TOLON, B. F. A. T., & BELLORA, T. (2009). Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. **Soil and Tillage Research**, 103(2), 381-386.

BOTTA, G.F., TOLON-BECERRA, A., TOURN, C., LASTRA-BRAVO, X., RIVERO, D., 2011. Agricultural traffic: motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions. **Soil and Tillage Research**, vol 120, pag 92–98.

BUENO, B.S. **The behavior of thin walled pipes in trenches**. 1987. 325p. (Ph.D. in Civil Engineering) – Leeds University, Leeds.

CAPUTO, H. P.. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**, vol.1: Fundamentos. 6ª ed. Rio de Janeiro : LTC, 2008.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. 2001. 155p. (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu.

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

CAVALIERI, K.C.V., SILVA, A.P., TORMENA, C.A., LEÃO, T.P., DEXTER, A.R., HAKANSSON, I., 2009. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Parana, Brazil. **Soil and Tillage Research**, vol 103, pag.158–164.

CHANCELLOR, W.J. **Compaction of soil by agricultural equipment**. Davis: University of California, 1977. 53p. (Bulletin, 1881).

CHEN, G., WEIL, R.R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil and Tillage Research**, vol. 117, p. 17–27, 2011.

COUTO, R. F.; REIS, E. F.; VIANA, P. M. F.; HOLTZ, V.; OLIVEIRA, L. A.; ALVES, S. M. F. Compactação e recalque superficial de um Latossolo Vermelho em condição de campo e laboratório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v.17, n.11, p.1239-1245, 2013. ISSN 1806-9657.

CUNHA, J. P. A. R. D.; CASCÃO, V. N.; REIS, E. F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 371-375, jul./set. 2009.

DA SILVA, V. L.; DIECKOW, J.; MELLEK, J. E.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; VEZZANI, F. M. Melhoria da estrutura de um Latossolo por sistemas de culturas em plantio direto nos campos gerais do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.983-992, 2012.

DE MARINS, A.C., REICHERT, J.M., SECCO, D., ROSA, H.A., VELOSO, G. Crambe grain yield and oil content affected by spatial variability in soil physical properties. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, vol. 81, p. 464–472, 2018.

DEXTER, A.R.. Soil physical quality. Part I: theory, effects of soil texture, density and organic matter and effects on root growth. **Geoderma**, vol. 120, pag. 201–214, 2004.

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

DISERENS, E. Calculating the contact area of trailer tyres in the field. **Soil Tillage Research**, New York, v.103, p.302–309, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017.

FERREIRA, M.F.; NEUJHR, E.B.; SCHLOSSER, J. F.; SCHNEIDER, V. Influência da pressão interna em pneus diagonais na força de tração de um trator 4x2 em duas condições de superfície. **Revista Brasileira de Agrocência**, Pelotas, v.6, n.1, p.66-70, 2000.

FERREIRA, S. R. M.; OLIVEIRA, J. T. R.; FUCALE, S. P.; SA, W. B.; MOURA, S. F. A. Avaliação do ângulo de atrito solo-muro e da rugosidade das superfícies de contato. **Ciência & Engenharia**, Uberlândia, v. 22, n. 2, p. 11-19, 2013.

FEITOSA, J. R.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R. Influência da pressão interna dos pneus e da velocidade de deslocamento nos parâmetros operacionais de um trator agrícola e nas propriedades físicas do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 1, p. 117-127, 2015.

FLORES, J.P.C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L.C.; CARVALHO, P.C.F.; LEITE, J.G.D.B. & FRAGA, T.I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.771-780, 2007.

FOUNTAS, S.; PARAFOROS, D.; CAVALARIS, C.; KARAMOUTIS, C.; GEMTOS, T. A.; ABU-KHALAF, N.; TAGARAKIS, A. A five-point penetrometer with GPS for measuring soil compaction variability. *Computers and Electronics in Agriculture*, New York, v. 96, p. 109-116, 2013.

FRANTZ, U. G. **Análise de desempenho em tração de rodado simples e duplo em um trator agrícola**. 2011. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Mecanização Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

FREIXIAL R, CARVALHO M. 2013. As fases de transição e consolidação da agricultura de conservação e da sementeira directa (AC/SD) em culturas anuais nas condições mediterrâneas. **Vida Rural**. Mensal: 36-40.

GABRIEL FILHO, A.; MONTEIRO, L. A.; GUERRA, S. P. S.; JESUÍNO, P. R. Influência da altura das garras dos pneus de um trator em área de plantio direto. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.10, p.1123-1128, 2010.

HAKANSSON, I., & LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, New York, vol. 53, p. 71e85, 2000.

HEAD, K.H. **Manual of soil laboratory testing**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. v. 2.

HERNANI L. C.; KURIHARA C. H.; SILVA W. M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v 23, p 145 – 154, 1999.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. VAN. (Edi.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 662p.

INNS, F.M.; KILGOUR, J. **Agricultural Tyres**. London: Dunlop Limited, 1978. 70p.

Keller, T., & Hakansson, I. (2010). Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, vol. 154, p. 398-406.

KROULIK, M.; KUMHALA, F.; HULA, J.; HONZIK, I. The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies **Soil and Tillage Research**, New York, 105, p 171-175.

KULLI, B.; GYSI, M.; FLÜHLER, H. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. **Soil and Tillage Research**, New York, v.70, n.1, p.29-40, 2003.

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2004. 70p. (Tese de Doutorado)

LIMA, R. P., SILVA, A. P., GIAROLA N. F. B., SILVA, A. R., & ROLIM, M.M. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. **Biosystems Engineering**, Korea, vol. 162, 1-10, 2017.

LIPIEC, J., & HAKANSSON, I. (2000). Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. **Soil and Tillage Research**, New York , vol. 53, 87-94.

MACHADO, A. L. T.; TREIN, C. R. Determinação da compressibilidade em dois tipos de solos do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, n.3, 2000. Pelotas. CD - ROM.

MARASCA, I.; OLIVEIRA, C.A.A. de; GUIMARÃES, E.C.; CUNHA, J.P.A.R. da; ASSIS, R.L. de; PERIN, A.; MENEZES, L.A.S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água em sistema de plantio direto na cultura da soja. **Bioscience Journal**, v.27, p.239-246, 2011.

MAZETTO, F.; LANÇAS, K.P.; NAGAOKA, A.K.; NETO, P.C.; GUERRA, S.P.G. Avaliação do contato pneu-solo em três modelos de pneus agrícolas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.750-757. 2004.

MION, R. L.; HOLANDA, A. S.; BARROSO, S. H. A.; SILVA, S. A. T. Tensões aplicadas no solo pelas diferentes pressões do pneu de um trator agrícola. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 1, p. 63-77, 2016.

NADERI- BOLDAJI M., & KELLER T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. **Soil and Tillage Research**, New York, 159, 41-46, 2016.

NAWAZ, M.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 33, n. 2, p. 1-19, Apr. 2012.

- NEUJAHR, E.B.; FERREIRA, M.F; SCHLOSSER, J.F.; SCHNEIDER, V.
Comportamento da área de contato e raio dinâmico de um pneu agrícola diagonal em função da pressão interna. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 27, 1998, Poços de Caldas. **Resumos...** Lavras: UFLA/SBEA, 1998. v.4, p.241-243.
- OLIVEIRA FILHO, Francisco X. de et al. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**. [online]. 2015, vol.19, n.2, pp.186-193. ISSN 1415-4366.
- PINTO, CARLOS DE SOUZA. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- PIRES, B.S.; DIAS JUNIOR, M. de S.; ROCHA, W.W.; ARAUJO JUNIOR, C.F.; CARVALHO, R. de C.R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.635-642, 2012.
- PORTERFIELD, J.W; CARPENTER, T.G. Soil compaction: an index of potential compaction for agricultural tires. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.4, p.917-22, 1986.
- POSSELT, D.C. **Análise de sensibilidade dos parâmetros envolvidos no projeto de fundações superficiais**. 2016. p. 130. (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Univates, Lajeado.
- REICHERT, J. M.; DA ROSA, V. T. ; VOGELMANN, E. S. ; DA ROSA, D. P. ; HORN, R. ; REINERT, D. J. ; SATTTLER, A. ; DENARDIN, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil & Tillage Research**, v. 158, p. 123-136, 2016.
- ROCHA, W.W. et al. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.2, p.297-303, 2002.
- RODRIGUES, S., SILVA, A.P., GIAROLA, N.F.B., ROSA, J.A. Permeabilidade ao ar em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 35, p. 105–114, 2011.
- SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W. & SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery - Soil physical and mechanical aspects. **Soil and Tillage Research**, 93:28-43, 2007
- SERVADIO, P.; MARSILIA, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. & PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. **Soil and Tillage Research**, 84:87-100, 2005.
- SEVERIANO, E. da C.; OLIVEIRA, G. C. de; DIAS JÚNIOR, M. de S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M. B. Pressão de preconsoidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob canade-

açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1419-1427, 2008.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.165-173, 2004.

SILVA, A.P.; IMNHOF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.61, n.4, p.451-456, 2004.

SILVA, A. R. et al. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 207-216, 2006.

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

SILVA, A. R.; JUNIOR, M. S. D; LEITE, F. P. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um forwarder sobre a compactação de um latossolo vermelho-amarelo. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 547 - 554, 2011.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v.16, p.179-201, 1990.

TAGHAVIFAR, H.; MARDANI, A. Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. **Journal of Terramechanics**, v. 50, n. 2, p. 99-106, 2013.

TAGHAVIFAR, H.; MARDANI, A. Contact área determination of agricultural tractor wheel with soil. **Cercetari Agronomice in Moldova**, Chisinau, v. 45, n. 2, p. 15-20, 2012.

TARAWALLY, M.A.; MEDINA, H.; FRÓMETA, M.E.; ITZA, C.A. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.76, n.2, p.95-103, 2004.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, p. 301-309, 1998.

VEIGA, M., HORN, R., REINERT, D.J., REICHERT, J.M., 2007. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**. 92, 104–113.

ZHANG, H. et al. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society American Journal**, v.61, p.239- 245, 1997.

ZOZ, F.; GRISSO, R.D. **Traction and tractor performance**. St Joseph: ASAE. 2003. 46 p.

YAVUZCAN, H.G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.84, n.2, p.200-215, 2005.