

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

**Compactação e recalque superficial de um Latossolo
Vermelho em condição de campo e laboratório**

Ródney Ferreira Couto

Anápolis
2012

**COMPACTAÇÃO E RECALQUE SUPERFICIAL DE UM
LATOSSOLO VERMELHO EM CONDIÇÃO DE CAMPO E
LABORATÓRIO**

RÓDNEY FERREIRA COUTO

Orientador: Professor D.Sc. Elton Fialho dos Reis

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 em Engenharia Agrícola – Sistemas Agroindustriais, para obtenção do título de MESTRE

Anápolis
2012

Couto, Ródney Ferreira.

Compactação e recalque superficial de um Latossolo Vermelho em condição de campo e laboratório – 2012.

89 f. il.

Orientador: Prof. DSc. Elton Fialho dos Reis.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Goiás. Mestrado *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, 2012.

Bibliografia.

1. Trator agrícola. 2. Simulador de tráfego. 3. Grau de compactação. I. Título.

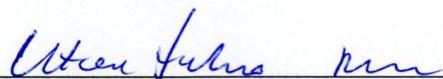
**COMPACTAÇÃO E RECALQUE SUPERFICIAL DE UM LATOSSOLO
VERMELHO EM CONDIÇÃO DE CAMPO E LABORATÓRIO**

Por

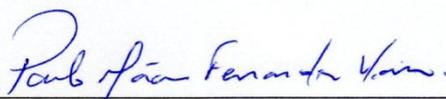
Ródney Ferreira Couto

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

Aprovada em: 09/08/2012



Prof. D.Sc. Elton Fialho dos Reis
Orientador
UEG / UNUCET



Prof. D.Sc. Paulo Márcio Fernandes Viana
Co-Orientador
UEG / UNUCET



Prof. D.Sc. Sueli Martins de Freitas Alves
Membro
UEG / UNUCET



Prof. D.Sc. Tairone Paiva Leão
Membro
FAV / UnB

Ao meu Deus
A meus queridos pais
A meus avós (*In memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Diversas pessoas participaram, direta e indiretamente, na conclusão deste trabalho. Relacionar todas é muito improvável, mas espero conseguir listar aquelas que lembro no momento e, caso esqueça alguém, que a pessoa compreenda com caridade, os vários fatores que influenciam a memória de um ser humano.

Ao meu orientador, professor Elton Fialho dos Reis, por toda orientação, confiança, amizade e conselhos nos momentos difíceis durante a graduação e mestrado.

Ao meu co-orientador, professor Paulo Viana, por ter proposto o tema da dissertação além das inúmeras contribuições, sugestões, motivação e amizade durante todo o curso. “Tenho certeza que vai dar certo. Vamos fazer, vamos fazer! Pode fazer que vai dar certo!”

A professora Sueli Freitas pela amizade, respaldo estatístico e sugestões na qualificação.

Ao professor Daniel Furtado Ferreira (UFLA) por dirimir dúvidas estatísticas.

A professora Roberta Passini pela amizade e participação na qualificação.

Ao coordenador do programa de mestrado, professor Itamar Teixeira, e aos demais professores do curso meu respeito.

Aos alunos da graduação que auxiliaram nas coletas de solo e em alguns ensaios de laboratório: Elson Júnior, Danilo Oliveira, Bethoveen, Neyber Cristiano, Gabriel Elias, Juvêncio Otávio, Ricardo Chaveiro, Pâmella Melo e Jéssica Andrade.

Aos amigos do mestrado, em especial: Lorena Oliveira, Vandoir Holtz, João Paulo, Pedro Henrique, Antônio Cruvinel, Eline Maria, Fabiana Cardoso e Poliana Gratão pela amizade e convivência harmoniosa durante esses anos.

A Lorena Oliveira por ter mostrado disposição em me ajudar desde o primeiro até o último dia dentro do mestrado.

Aos meus amigos Vandoir Holtz e Pedro Henrique que foram sensacionais durante os entraves encontrados no experimento de campo.

Aos funcionários da UEG: Tiago Dutra, Higor Natã, Eliete Fernandes e Waldeir Costa.

A UEG pela oportunidade de realização dos cursos de graduação em Engenharia Agrícola e mestrado em Engenharia Agrícola.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

A FAPEG pelo suporte financeiro indispensável para a compra do sistema de aquisição de dados e execução do simulador de tráfego.

LTEC – Laboratório Técnico e Engenharia Ltda pelo auxílio pesquisa.

A todos os membros da minha família que sempre me apoiaram e auxiliaram com meus estudos.

A Deus, pela vida, saúde e oportunidade de poder estudar e contribuir com o conhecimento científico.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Principais propriedades físicas do solo afetadas pelo tráfego de máquinas ..	2
2.2. Dinâmica do solo	5
2.3. Interface máquina-solo	9
2.3.1. Área de contato e pressão de inflagem dos pneus	9
2.3.2. Pressão média de contato com o solo	12
2.3.3. Intensidade de tráfego	14
2.3.4. Recalque	17
2.4. Opções para reduzir a compactação sob rodas	18
3. MATERIAL E MÉTODO	21
3.1. Experimento com trator agrícola em condição de campo	21
3.1.1. Caracterização da área	21
3.1.2. Delineamento estatístico	22
3.1.3. Área de contato com o solo	23
3.1.4. Pressão aplicada ao solo	24
3.1.5. Distribuição de tensões no solo	25
3.1.6. Níveis de tráfego e pressões de inflagem do pneu	26
3.1.7. Variáveis analisadas em laboratório	27
3.1.7.1. Densidade do solo (Massa específica aparente seca)	27
3.1.7.2. Grau de compactação	27
3.1.8. Análise estatística	28
3.2. Experimento com simulador linear de tráfego em condição laboratorial ...	29
3.2.1. Delineamento estatístico	30
3.2.2. Área de contato com o solo	30
3.2.3. Pressão aplicada ao solo	31
3.2.4. Distribuição de tensões no solo	32
3.2.5. Extração das amostras de solo indeformadas	32
3.2.6. Níveis de tráfego e pressões de inflagem do pneu	35
3.2.7. Variáveis analisadas	35
3.2.7.1. Sistema de leitura dos recalques do solo nas amostras	35
3.2.8. Análise estatística	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1. Experimento com trator agrícola em condição de campo	38
4.1.1. Área de contato e pressão de contato com o solo	38
4.1.2. Distribuição de tensões no solo	40
4.1.3. Densidade do solo depois do tráfego	41
4.1.4. Grau de compactação depois do tráfego	43
4.1.5. Recalque do solo	44
4.2. Experimento com simulador linear de tráfego em condição laboratorial ...	49
4.2.1. Pressão de contato com o solo	51
4.2.2. Distribuição de tensões no solo	51

4.2.3. Densidade do solo depois do tráfego	52
4.2.4. Grau de compactação depois do tráfego	53
4.2.5. Recalque do solo	55
5. CONCLUSÕES	60
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Caracterização física e mecânica do Latossolo Vermelho sob plantio direto	21
TABELA 2 - Resumo da análise de variância das variáveis: densidade do solo depois do tráfego (DSdT), grau de compactação depois do tráfego (GCdT) e recalque do solo (R)	38
TABELA 3 - Áreas de contato do pneu traseiro do trator e pressões médias de contato com o solo em função das pressões de inflagem do pneu	39
TABELA 4 - Valores médios de densidade do solo ($t\ m^{-3}$) no centro da linha de tráfego do pneu, em função da intensidade de tráfego e da pressão de inflagem do pneu	41
TABELA 5 - Valores médios de recalque do solo após aplicação dos níveis de tráfego	46
TABELA 6 - Resumo da análise de variância das variáveis: densidade do solo depois do tráfego (DSdT), grau de compactação depois do tráfego (GCdT) e recalque do solo (R)	49
TABELA 7 - Resumo da análise de variância do agrupamento das condições experimentais (campo e laboratório) para as variáveis: densidade do solo depois do tráfego (DSdT), grau de compactação depois do tráfego (GCdT) e recalque do solo (R)	50
TABELA 8 - Valores médios de densidade do solo após aplicação dos níveis de tráfego para cada condição experimental	53
TABELA 9 - Valores médios do grau de compactação do solo após aplicação dos níveis de tráfego para cada condição experimental	54
TABELA 10 - Média dos recalques do solo para os experimentos com trator agrícola e simulador de tráfego e erros relativos experimentais	56

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Pressões agindo em um volume infinitesimal de solo sob uma carga pontual Q	7
FIGURA 2. Linhas isobáricas de pressão (bulbos de pressão), em diferentes fatores de concentração no solo (KÉZDI, 1969).....	8
FIGURA 3. Distribuição das pressões de contato (kPa) sob um pneu liso inflado com 41 kPa na superfície rígida de um solo arenoso (VANDEN BERG e GILL, 1962).	12
FIGURA 4. Distribuição de pressões num plano vertical do solo sob uma pressão de 2060 kPa aplicada numa área de 0,2 m ² (VANDEN BERG et al., 1957).....	13
FIGURA 5. Distribuição dos aumentos na densidade do solo seco, após várias passadas de um conjunto mecanizado formado por um trator de pneus e pulverizador com dois vagões sobre rodas (RAGHAVAN et al., 1976).	15
FIGURA 6. Diagrama de opções para reduzir a compactação do solo (SOANE et al., 1979)	18
FIGURA 7. Área experimental: a) vista geral; e b) demarcação de uma parcela experimental.	22
FIGURA 8. Aplicação de gesso em pó ao redor do pneu traseiro direito do trator	23
FIGURA 9. Determinação das áreas de contato do pneu traseiro do trator por meio de software AutoCad 2007: a) pressão de inflagem de 96,5 kPa; e b) pressão de inflagem de 137,9 kPa.....	24
FIGURA 10. Determinação da força peso que age sobre a parte inferior do pneu traseiro do trator: a) nivelamento longitudinal; b) nivelamento transversal; e c) balança mecânica industrial.	25
FIGURA 11. Medição do recalque do solo: a) perfil do solo antes do tráfego; e b) após o tráfego.	26
FIGURA 12. Vistas do simulador linear de tráfego: (a) frontal; e (b) lateral direita.	29
FIGURA 13. Determinação das áreas de contato do pneu do simulador por meio do software AutoCad 2007: a) pressão de inflagem de 96,5 kPa, carregamento de 58,04 kgf e pressão de contato de 250,7 kPa; e b) pressão de inflagem de 137,9 kPa, carregamento de 31,08 kgf e pressão de contato de 157,9 kPa.	31
FIGURA 14. Gráfico de calibração da célula de carga utilizada para monitorar a carga aplicada pelo macaco hidráulico	31

FIGURA 15. Montagem dos sistemas: a) aquisição de dados; e b) aplicação de carregamentos.	32
FIGURA 16. Retirada de amostras indeformadas: a) escavação do bloco de solo; b) adição da primeira camada de parafina; c) envolvimento da amostra com tecido de malha fina e uma nova camada de parafina; d) desprendimento do bloco; e) tombamento da amostra; f) regularização da parte inferior da amostra; g) adição de parafina e tecido na parte inferior da amostra; e h) acondicionamento em câmara úmida.	34
FIGURA 17. Processo de talhamento do bloco de solo para determinação da densidade do solo.	35
FIGURA 18. Fotografias mostrando o perfil do solo: (a) antes; e (b) após o tráfego.	36
FIGURA 19. Bulbos de tensões obtidos para carregamentos exercidos pelo pneu traseiro do trator na superfície do solo: a) 252,5 kPa e b) 137,9 kPa.	40
FIGURA 20. Densidade do solo após o tráfego em função do número de passadas do pneu traseiro do trator.	41
FIGURA 21. Valores médios da densidade do solo após aplicação dos níveis de tráfego. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 5\%$).	42
FIGURA 22. Efeito do número de passadas do pneu traseiro do trator sobre o grau de compactação do solo.	43
FIGURA 23. Valores médios do grau de compactação após aplicação dos níveis de tráfego. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 10\%$).	43
FIGURA 24. Recalque do solo em função das intensidades de tráfego e das pressões de inflagem do pneu.	45
FIGURA 25. Recalque do solo em função das intensidades de tráfego.	45
FIGURA 26. Perfis do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal do trator com 96,5 kPa de pressão de inflagem, antes e após os tráfegos de uma, duas, quatro e oito passadas.	47
FIGURA 27. Perfis do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal do trator com 137,9 kPa de pressão de inflagem, antes e após os tráfegos de uma, duas, quatro e oito passadas.	48
FIGURA 28. Carregamentos e pressão média de contato com o solo: a) pneu inflado com 96,5 kPa; e b) pneu inflado com 137,9 kPa.	51
FIGURA 29. Bulbos de tensões obtidos para carregamentos exercidos pelo pneu do simulador na superfície do solo: a) 252,5 kPa e b) 137,9 kPa.	52

FIGURA 30. Densidade do solo após o tráfego em função do número de passadas, para as duas condições experimentais, e diferença percentual da densidade entre as duas condições experimentais, para cada nível de tráfego.	52
FIGURA 31. Grau de compactação do solo após o tráfego em função do número de passadas, para as duas condições experimentais, e diferença percentual do grau de compactação entre as duas condições experimentais, para cada nível de tráfego.	54
FIGURA 32. Recalque do solo em função das intensidades de tráfego e das pressões de inflagem do pneu. Sem correção de escala.	55
FIGURA 33. Recalque do solo em função do número de passadas para as duas condições experimentais.	55
FIGURA 34. Perfis do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal do simulador com 96,5 kPa de pressão de inflagem, antes e após os tráfegos de uma, duas, quatro e oito passadas.	57
FIGURA 35. Perfis do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal do simulador com 137,9 kPa de pressão de inflagem, antes e após os tráfegos de uma, duas, quatro e oito passadas.	58
FIGURA 36. Impressão em superfície rígida das marcas das garras dos pneus utilizados: a) pneu do trator agrícola (16,9-30); e b) pneu do simulador de tráfego (4,80-8).	59

COMPACTAÇÃO E RECALQUE SUPERFICIAL DE UM LATOSSOLO VERMELHO EM CONDIÇÃO DE CAMPO E LABORATÓRIO

RESUMO

O trator agrícola é considerado a principal fonte de potência para a realização das operações mecanizadas indispensáveis ao processo produtivo de uma cultura. Entretanto, a aplicação de cargas dinâmicas no solo, pelos rodados agrícolas, produz tensões na interface solo/pneu em superfície e profundidade. Essas tensões podem compactar diferentes camadas do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a compactação e o recalque superficial de um Latossolo Vermelho quando submetido a diferentes níveis de tráfego em condição de campo; e propor uma metodologia para ensaio de cargas dinâmicas, oriundas de tráfegos de rodados pneumáticos, aplicável em laboratório. No campo foi utilizado um trator agrícola e no laboratório um simulador de tráfego. Nos dois experimentos foi adotado o delineamento em blocos ao acaso no esquema de parcelas subdivididas, composto por dez tratamentos com quatro repetições por tratamento, totalizando quarenta unidades experimentais. As parcelas foram constituídas de duas pressões de inflagem dos pneus: 96,5 e 137,9 kPa; e as subparcelas, de cinco intensidades de tráfego: zero (testemunha), uma, duas, quatro e oito passadas do trator ou da roda do simulador, de acordo com o experimento. As variáveis mensuradas foram: densidade do solo, grau de compactação e recalque superficial. As duas primeiras variáveis foram analisadas na profundidade de 0-0,10m. Todas as variáveis foram obtidas após o tráfego nas duas condições: campo e laboratório. No simulador de tráfego foram utilizadas amostras de solo indeformadas coletadas no campo e em regiões onde não houve tráfego do trator. Essas amostras foram submetidas a valores de pressões de contato próximas as determinadas para o trator agrícola em condição de campo. Os resultados demonstraram que as variáveis utilizadas foram capazes de caracterizar mudanças no estado de compactação do solo em questão. Para ambas as condições experimentais não houve influência significativa da pressão de inflagem do pneu e nem da interação entre pressão e tráfego. As variáveis analisadas sofreram influência significativa somente do tráfego. A análise conjunta (agrupamento) dos experimentos demonstrou que não existe diferença significativa entre as condições experimentais. Dessa forma, o simulador de tráfego mostrou-se capaz de reproduzir a compactação induzida pelo trator.

Palavras-Chave: trator agrícola, simulador de tráfego, grau de compactação

COMPACTION AND SUPERFICIAL SETTLEMENT OF A OXISOL IN FIELD AND LABORATORY CONDITIONS

ABSTRACT

The agricultural tractor is considered the main source of power for the realization of the mechanized operations essential to the production process of a culture. However, the application of dynamic loads in the soil, produces stress in wheel/soil interface in surface and depth. These stresses can compress different soil layers. The aim of this study was to evaluate the compaction and superficial settlement of an Oxisol under different traffic levels in field conditions; and propose a methodology for dynamic loads test, from traffic of the pneumatic wheel, applicable in the laboratory. In the field we used an agricultural tractor and in laboratory a traffic simulator. In two experiments we adopted the design of randomized blocks in split plots consisted of ten treatments with four replicates per treatment, totaling forty experimental units. The plots consisted of two tire inflation pressure: 96.5 and 137.9 kPa, and the subplots were five traffic intensities: zero (control), one, two, four and eight passes of the tractor or wheel simulator, according to the experiment. The variables measured were soil dry density, degree of compaction and superficial settlement. The first two variables were analyzed at the depth of 0-0.10 m. All variables were obtained after the traffic on two conditions: field and laboratory. At traffic simulator were used undisturbed soil samples collected in the field and in regions where had no tractor traffic. These samples were subjected the values of contact pressure near to those determined for the tractor in field conditions. The results showed that the variables used were able to characterize changes in the state of compaction of the soil in question. For both experimental conditions there was no significant influence of tire inflation pressure nor the interaction between pressure and traffic. The variables studied suffered significant influence only the traffic. The joint analysis (grouping) of the experiments showed that no have significant difference between experimental conditions. Thus, the traffic simulator was capable of reproducing the compaction induced by the tractor.

Keywords: agricultural tractor, simulator of traffic, degree of compaction

1. INTRODUÇÃO

O trator agrícola pode ser considerado como a principal fonte de potência para realização das operações mecanizadas e é indispensável ao ciclo produtivo de uma cultura. Entretanto, o trator também é responsável por propagar tensões no solo, podendo causar degradação de sua estrutura, quando ocorre tráfego descontrolado associado a inadequadas pressões de inflagem dos pneus.

Grande parte dos estudos realizados para identificar o efeito do tráfego de máquinas agrícolas, nas propriedades físicas e mecânicas do solo, foram e ainda são realizados sob condição de tração admitindo-se que os pneus traseiros trafegam sobre o rastro dos pneus dianteiros. Essas práticas conduzem a resultados que não revelam isoladamente o impacto no solo de um único rodado trafegando sem estar submetido a um esforço de tração. Na prática é possível que haja trânsito de máquinas, dentro dos talhões, sem que essas estejam tracionando algum implemento.

Outro aspecto interessante e que deve ser ressaltado é que na maioria dos estudos de compactação do solo, em condição de laboratório, são realizados em escala reduzida utilizando-se carregamentos estáticos e os solos agrícolas estão sujeitos a carregamentos dinâmicos. Tais simplificações podem não ser adequadas para reprodução do estado de compactação do solo, devido ao efeito escala que modifica fatores que afastam os ensaios das condições existentes em escala real.

Visando dar um enfoque diferenciado na forma como os trabalhos são realizados surgiu a motivação para realizar um estudo que pudesse quantificar, desconsiderando a tração e analisando um único rodado, somente o efeito do tráfego e da pressão de inflagem do pneu nas propriedades físicas e mecânicas do solo.

A presente pesquisa teve como objetivos específicos: a) avaliar o efeito da interação entre nível de tráfego e pressão de inflagem do pneu sobre as propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Vermelho sob plantio direto; e b) propor uma metodologia de laboratório para estudo de compactação do solo sob condições de carregamentos dinâmicos utilizando um simulador de tráfego que testa seções de solo em escala real e com curto espaço de tempo.

As propriedades físicas e mecânicas consideradas foram: massa específica do solo; grau de compactação e recalque superficial.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Principais propriedades físicas do solo afetadas 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 degradação física do solo em superfície e subsuperfície (YAVUZCAN et al., 2005).

Na compactação do solo ocorre um processo de densificação em que a porosidade e a permeabilidade são reduzidas, a resistência é aumentada e várias alterações são induzidas na estrutura do solo (SOANE e OUWERKERK, 1994; BERTOL et al., 2000), limitando o crescimento vegetativo e comprometendo o rendimento das culturas (DIAS JÚNIOR, 2000). Pode também ser conceituada como um processo em que há redução da porosidade por forças compressivas aplicadas ao solo.

A compactação altera várias propriedades do solo, notadamente aquelas relacionadas à física do solo, como a densidade do solo, a porosidade e os parâmetros hídricos, provocando alterações indesejáveis no espaço poroso do solo.

Quando as tensões efetivas aplicadas pelo tráfego de máquinas agrícolas ultrapassam a capacidade de suporte de carga do solo, observa-se uma grande redução do volume de macroporos (TORMENA et al., 1998; KULLI et al., 2003; TARAWALLY et al., 2004; SERVADIO et al., 2005; SCHÄFFER et al., 2007), enquanto que o de microporos permanece inalterado (TORMENA et al., 1998) ou até mesmo aumentado (TARAWALLY et al., 2004; SCHÄFFER et al., 2007).

A diminuição da macroporosidade provocada pela compactação também prejudica a infiltração de água, afetando negativamente a condutividade hidráulica (K_{sat}) do solo. Blanco-Canqui et al. (2004) verificaram que a K_{sat} foi três vezes menor em solo com tráfego intenso de máquinas em comparação a sistemas que adotaram tráfego reduzido.

A resistência do solo à penetração (RP) tem sido utilizada, ao longo de muitos anos, com inúmeras aplicações em diversas áreas da pesquisa agrônômica, sendo várias já consolidadas, tais como: detecção de camadas compactadas, em estudo da ação de ferramentas de máquinas no solo, prevenção de impedimento mecânico ao desenvolvimento

do sistema radicular das plantas, predição da força de tração necessária para execução de trabalhos e para conhecimento de processos de umedecimento e de ressecamento (CUNHA et al., 2002).

Streck et al. (2004) avaliaram os efeitos da compactação adicional provocada pelo trânsito de máquinas sob plantio direto (PD), concluindo que os valores de resistência a penetração (RP) aumentaram de acordo com a intensidade do tráfego.

Pesquisadores como Tormena et al. (2002), Prado et al. (2002) e Pereira et al. (2002) citam como parâmetros avaliativos da resistência do solo a penetração valores restritivos ao crescimento normal do sistema radicular na faixa entre 1,0 e 2,0 MPa e valores impeditivos acima de 2,0 MPa. Porém, deve-se considerar a umidade do solo no momento da leitura, uma vez que solos com elevados teores de umidade apresentam menores valores de resistência a penetração de raízes (HAVEREN, 1983).

Collares et al. (2008) observaram que a compactação adicional exercida por quatro passadas de trator aumentou a RP nas camadas mais superficiais, e mesmo quando o solo apresentou alta umidade os valores de resistência permaneceram acima de 2 MPa, o qual é limitante para o crescimento das plantas, o que caracteriza um grave estado de compactação do solo.

Uma propriedade física comumente utilizada para caracterizar o estado de compactação é a densidade do solo (D_s), que é definida pela relação de massa de solo seca por unidade de volume. A D_s é capaz de detectar modificações de volume (LIPIEC e HATANO, 2003; LOGSDON e KARLEN, 2004; REICHERT et al., 2007), fornecendo uma visão geral do estado do espaço poroso do solo, além de ser capaz de caracterizar os efeitos do manejo do solo tão bem quanto propriedades intrínsecas do solo, como a matéria orgânica ou a textura (SILVA et al., 1997). A densidade do solo faz parte dos fatores que afetam indiretamente o crescimento das plantas (LETEY, 1985), sendo que os valores de densidade crítica, a partir do qual o crescimento das raízes das plantas é reduzido ou impedido, variam de acordo com a textura do solo.

Solos arenosos apresentam densidade do solo superior aos argilosos enquanto que solos siltosos apresentam densidade intermediária (BUENO e VILAR, 1998; LIBARDI, 2005). Solos argilosos apresentam agregação das partículas de argila, da qual resulta a porosidade intra-agregados, que aumenta o volume do espaço poroso, principalmente aqueles poros com diâmetro reduzido (BRADY e WEIL, 2008).

Segundo Reichert et al. (2003) a densidade crítica para solos franco-arenosos está entre 1,70 a 1,80 $t\ m^{-3}$, para solos franco-argilosos entre 1,40 a 1,50 $t\ m^{-3}$ e 1,30 a 1,40 $t\ m^{-3}$

para solos argilosos, enquanto que Reynolds et al. (2007) sugere uma faixa mais ampla para solos argilosos, de 0,9 a 1,20 t m⁻³.

A densidade do solo tem sido usada como medida da qualidade do solo devido às suas relações intrínsecas com outros atributos, como porosidade, umidade do solo, condutividade hidráulica e etc. (THIMÓTEO et al., 2001; DAM et al., 2005; COSTA et al., 2007; MARTINS et al., 2009).

O comportamento da densidade do solo é altamente influenciado pelo método de manejo adotado. Os resultados encontrados na literatura têm confirmado a tendência de maiores valores de Ds no sistema plantio direto em relação ao sistema convencional, devido à reduzida mobilização do solo no PD, onde a camada compactada se encontra principalmente na profundidade de 0 a 20 cm. Tormena et al. (2002) compararam a Ds em três sistemas de manejo, convencional, preparo mínimo e plantio direto, e observaram que a densidade do solo foi maior no PD, em virtude do efeito cumulativo do tráfego de máquinas e ausência de mobilização mecânica do solo.

A compactação é caracterizada pela redução de volume de solo, e sendo a densidade do solo uma propriedade expressa pela relação massa/volume, ela constitui um parâmetro prático para detectar a ocorrência da compactação. Entretanto, a densidade sofre grande influência da textura, o que gera a dificuldade de comparação entre solos com texturas contrastantes, pois um determinado valor de densidade que indique a existência de compactação em um solo pode variar entre as diferentes classes texturais (SILVA, S., 2011).

Pelo discutido anteriormente, a Ds não fornece informações suficientes para se quantificar o grau de compactação de um solo agrícola. Visando normalizar os limites de Ds, em função da textura e outras propriedades do solo, tem sido utilizado o conceito de densidade relativa do solo (DR) ou grau de compactação (GC) (TORRES e SARAIVA, 1999; HAKANSSON e LIPIEC, 2000; BEUTLER et al., 2005; SANTOS et al., 2005; KLEIN, 2006, 2008).

O grau de compactação foi criado com o objetivo de ser um parâmetro simples o suficiente para ser utilizado nos experimentos de campo, e para relacionar os resultados de estudos de resposta do solo ao tráfego de máquinas com os estudos de produtividade das culturas na presença de compactação.

O grau de compactação ou compactação relativa é o resultado da razão entre a densidade do solo e a densidade máxima do solo, obtido após a compactação, e tem sido utilizado para representar o grau de consolidação dos constituintes do solo (VARGAS, 1977).

A densidade máxima ($D_{s_{m\acute{a}x}}$) ou densidade refer\encia do solo \e o estado mais compactado encontrado ap\os a aplica\c\o de uma press\o de 200 kPa. Segundo H\akansson (1990), este valor representa a press\o exercida pela maioria dos maquin\rios empregados em opera\c\es agr\colas.

A D_s refer\encia pode ser determinada por meio do teste de compress\o uniaxial, submetido \a press\o de 200 kPa, conforme descrito por H\akansson (1990), ou pelo teste de Proctor Normal, descrito por Carter (1990). O teste de compress\o uniaxial apresenta \otima reprodutibilidade quando comparado ao teste de Proctor, que determina valores um pouco superiores (H\AKANSSON, 1990). Entretanto, o teste de Proctor \e de mais f\cil execu\c\o e tem menor custo comparado ao consolid\metro utilizado para realizar a compress\o uniaxial.

Diversos estudos comprovam a correla\c\o entre o grau de compacta\c\o e a produtividade das culturas. Suzuki (2005) estudando o grau de compacta\c\o em sistema plantio direto verificou que o maior rendimento da soja foi obtido quando o GC atingiu a m\edia de 82% em Argissolos e 85% para os Latossolos. Em um Argissolo de textura arenosa, Beutler et al. (2009) constataram decr\escimo na produtividade do milho a partir da densidade relativa de 0,89.

O processo de compacta\c\o promove altera\c\es nas propriedades f\isicas do solo, sendo que pesquisas t\em mostrado que o grau de compacta\c\o \e sens\vel a estas mudan\as. Suzuki et al. (2007) verificaram que o aumento do GC provocou uma redu\c\o linear da macroporosidade, da condutividade hidr\ulica saturada e aumento da resist\ncia mec\nica.

Silva et al. (1997) pesquisaram a influ\ncia da textura do solo, mat\ria org\nica e tipo de manejo na densidade do solo e na densidade relativa. Os autores verificaram que a densidade do solo foi fortemente influenciada pelos fatores mencionados, enquanto que o uso da densidade relativa praticamente eliminou os efeitos da textura e do teor de mat\ria org\nica, real\ando o efeito do tipo de manejo e intensidade do tr\fego de m\quinas sobre o solo.

2.2. Din\mica do solo

As for\as que s\o aplicadas aos solos em opera\c\es agr\colas s\o geralmente de curta dura\c\o, sendo aplicadas sobre uma pequena \rea de carregamento e as cargas s\o de pequena intensidade. Deve-se considerar que as caracterfsticas mec\nicas dos solos agr\colas variam entre as diferentes classes de solos e, para um mesmo solo, de acordo com a sua consist\ncia.

A distribuição e magnitude das pressões e tensões de cisalhamento sobre uma área de contato estabelecem a capacidade de um rodado para desenvolver máxima tração com mínima compactação do solo. Para melhor conhecimento dos fatores que afetam a distribuição de tensões são necessários os conceitos de Dinâmica do Solo (VANDERBERG e GILL, 1962).

A Dinâmica do Solo pode ser definida como a relação entre as forças que são aplicadas e a reação do solo. Essa reação é associada às tensões no solo e sua distribuição.

O início dos estudos de Dinâmica do Solo ocorreu com uma tese nos Estados Unidos de E.A.White em 1918 sobre a ação de um arado e a partir de 1920 começaram os trabalhos nesta área especificamente. Somente após 1930, e a partir da Segunda Guerra Mundial, é que os trabalhos tiveram maior ênfase e finalmente a partir de 1950, juntamente com os estudos sobre pneus, a Dinâmica do Solo se firmou como área de pesquisa e foram feitas as primeiras padronizações de metodologias entre os diversos centros de pesquisa (BALASTREIRE, 1987; VANDEN BERG e GILL,1962).

Os conceitos de tensão e deformação são fundamentais, juntamente com as teorias de elasticidade e plasticidade, originadas no campo da Resistência dos Materiais e utilizadas na Dinâmica do Solo, para se estabelecer bases teóricas dos fenômenos de reação do solo às pressões impostas, como no caso dos rodados das máquinas (MIALHE, 1993).

A tensão no solo sempre se distribui de forma tridimensional. A primeira aproximação do modelo de distribuição das tensões segundo VanderBerg e Gill (1962), foi feita com um sistema de equação diferencial descrito por Boussinesq em 1885, considerando uma carga pontual vertical o qual foi descrito para confirmar a distribuição vertical relacionada com a tensão (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

De acordo com essa teoria, uma carga vertical sobre a superfície do solo, atuando sobre um meio homogêneo, isotrópico e de elasticidade linear, tem efeito sobre a metade da área. Dessa forma, foi descrito que a pressão deve continuar sobre uma área de mesmo tamanho; assim, descreveu-se pela primeira vez o método da pressão em um ponto.

Neste método de carga vertical em um ponto, assume-se que o ponto de pressão entre o pneu e o solo é o que prevalece. Um desses casos é apresentado na Figura 1.

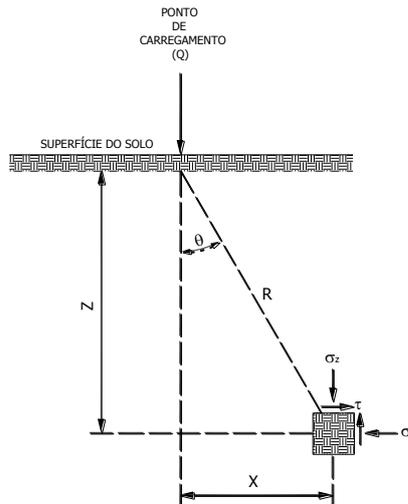


FIGURA 1. Pressões agindo em um volume infinitesimal de solo sob uma carga pontual Q .

Para essa situação as equações de Boussinesq são:

$$\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi Z^2} \cdot \cos^5 \theta \quad (1)$$

$$\sigma_x = \frac{Q}{2\pi R^2} \cdot 3\cos\theta \cdot \sin^2\theta - \frac{m-2}{m} \cdot \frac{1}{1+\cos\theta} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{3Q}{2\pi R^2} \cdot \cos^2\theta \cdot \sin\theta \quad (3)$$

Em que: m – coeficiente de Poisson ou coeficiente de compressibilidade, o qual depende do tipo de solo (BARATA, 1984), σ_z e σ_x são as pressões verticais e horizontais num elemento de volume, τ a tensão de cisalhamento, Q a força aplicada, R a distância entre o ponto de aplicação da força e o elemento de volume do solo. Todos esses parâmetros e ainda mais θ , X e Z são esquematizados na Figura 1.

Segundo Barata (1984), em geral, solos se afastam das condições ideais de validade da teoria de Boussinesq, pois não são materiais elásticos, homogêneos e isotrópicos. No entanto, a teoria é considerada razoável, observada as seguintes condições:

- Não pode haver rachaduras no interior do solo;
- A resistência ou módulo de deformação deve ser constante na profundidade. Este aspecto é mais real pra solos argilosos;
- Para solos muito heterogêneos, deve-se usar uma correção estabelecida por Burmister (BARROS, 1966);

- d) A solução de Boussinesq é válida para carga concentrada, o que equivale a dizer que a teoria só se aplica para profundidades razoavelmente grandes. Para profundidades menores deve-se utilizar cargas aplicadas numa área e não mais pontual.

Tendo em vista as limitações da teoria de Boussinesq, Fröhlich (1934) introduziu um fator de concentração ν , pois de observações experimentais, notou-se que haviam maiores concentrações de pressão em torno da vertical do eixo de aplicação da carga. Quanto maior o valor de ν , maior a concentração de pressões, no eixo vertical. Fröhlich (1934) obteve as seguintes expressões:

$$\sigma_Z = \frac{\nu Q}{2Z^2} \cdot (\cos\theta)^{\nu+2} \quad (4)$$

$$\sigma_X = \frac{\nu Q}{2\pi R^2} \cdot (\cos\theta)^{\nu-2} \cdot \text{sen}\theta \quad (5)$$

$$\tau = \frac{\nu Q}{2\pi R^2} \cdot (\cos\theta)^{\nu-1} \cdot \text{sen}\theta \quad (6)$$

Segundo Soehne (1958), $\nu = 3$ para solos homogêneos, isotrópicos, com comportamento elástico. Para solos não homogêneos e comportamento não só elástico, mas um tanto plástico, ν varia entre 4 e 6. O fator de concentração ideal deve ser obtido experimentalmente.

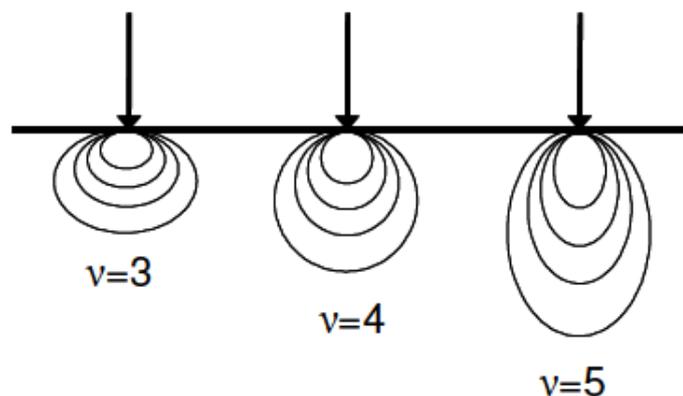


FIGURA 2. Linhas isobáricas de pressão (bulbos de pressão), em diferentes fatores de concentração no solo (KÉZDI, 1969).

Em amostras de solo com estrutura preservada parcialmente comprimida, Burger et al. (1988) identificaram fatores de concentração variando de 3 a 9 para um grande número de solos de uso agrícola. Quanto maior o fator de concentração, maior será a concentração das tensões no eixo principal e, conseqüentemente, maior a profundidade em que a tensão se propaga.

Horn et al. (1991), Hartge e Horn (1999) e Becher (2004) afirmam que o uso do solo na agricultura é intenso; com isso, o fator de concentração não é uma constante, pois a gênese do solo, a água armazenada ou a interferência de fatores antropogênicos (como a utilização de máquinas agrícolas) são alterados.

As máquinas agrícolas e florestais com pneus ou correntes não geram um único ponto de pressão, e sim inúmeros pontos, que são distribuídos sob a área de contato. Dessa forma, Söhne (1953) criou outra teoria em que toda a área de contato foi dividida em subsuperfícies e as pressões em subparcelas as quais foram adotadas como um ponto de carregamento. Devido aos bulbos de pressão (para uma mesma superfície específica de pressão), o aumento da carga total é maior e, conseqüentemente, vai atuar em maior profundidade.

Para prever a tensão em um ponto do solo utiliza-se o cubo de tensões. Isso acontece em seis direções independentes e em diferentes distribuições de pressão, as quais deverão ser determinadas (NICHOLS et al., 1987).

Em uma visão prática, Barbosa (2002) ressalta que o conhecimento das forças e momentos no solo causados pelas operações de preparo e tráfego de máquinas, pode ser aplicado na correta escolha de implementos, pneus e máquinas, de forma a racionalizar o consumo energético das operações agrícolas. No campo da pesquisa científica, especialmente nas áreas de Engenharia Agrícola e Ciência do Solo, tal conhecimento pode facilitar a avaliação do preparo e do tráfego em relação ao sistema de produção e às condições do solo; isso pode ser de especial importância na interpretação de experimentos de campo. Já no campo industrial, o conhecimento da dinâmica dos solos agrícolas pode ser aplicado ao projeto de equipamentos que interajam com os solos agrícolas, de forma a otimizar sua eficiência.

2.3. Interface máquina-solo

2.3.1. Área de contato e pressão de inflagem dos pneus

De acordo com Mialhe (1993), inflagem é o termo técnico para designar a pressão sob a qual o pneu é inflado, sendo o substituto para o termo “pressão de inflação” empregado por

alguns fabricantes a partir da tradução “inflation pressure”. Entretanto, a palavra “inflação” tem sentido técnico bastante específico em Economia e seu significado léxico não reflete adequadamente a qualificação que se queira dar a uma pressão.

O termo “pressão de insuflagem” foi utilizado por Seixas (1997) num guia para seleção correta da pressão de ar para pneus. Na avaliação de impactos da colheita de madeira ao solo, o mesmo autor utilizou o termo “pressão de inflagem”. Assim, Oliveira Júnior (1998) ressalta que ambos os termos estão corretos do ponto de vista técnico.

A norma S296.4 DEC95 (ASAE, 1999) padroniza a pressão interna para pneus inflados somente com ar, como sendo a pressão interna do pneu com a válvula colocada em qualquer posição.

A mais importante característica do pneu, segundo Rutherford e McAllister (1983) é o ar contido no seu interior. 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. (1988) 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).

Raper et al. (1995) afirmaram que a pressão interna e a carga dinâmica afetam significativamente a área de contato roda-solo. Além disso, Mialhe (1980) relatou que a área de contato do rodado com o solo constitui um dos mais importantes fatores para o estudo da tração. 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 (LEE e KIM, 1997).

A baixa pressão interna tende a concentrar as cargas nas extremidades do pneu, enquanto as maiores pressões internas concentram mais carga próximo ao centro do pneu. Aumentando a pressão interna decresce a largura do sulco, e tem menor efeito sobre deformação do solo na área da seção transversal. O aumento da carga dinâmica aumenta a largura do sulco e a deformação da área da seção. O aumento da pressão interna decresce o comprimento total de contato e a área de contato do pneu, enquanto que aumentando a carga dinâmica aumenta ambos os parâmetros. O aumento da pressão interna causa um nível de esforço na interface pneu-solo, aumentado e concentrado próximo ao centro do pneu. À mais baixa pressão interna o esforço entre pneu-solo tende a concentrar-se próximo as extremidades do pneu (RAPER et al., 1995).

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 (MÁRQUEZ, 1990).

A pressão interna dos pneus pode ser variada dentro de certos limites que são fixados pela pressão mínima para que o pneu não gire em relação ao aro, e/ou não provoque deflexão excessiva. Do mesmo modo pela pressão máxima, que pode ser função de dois fatores: a máxima pressão que a carcaça do pneu pode suportar e a que resulta numa pressão aplicada ao solo não superior à pressão de pré-consolidação, evitando assim a compactação adicional ao solo. Além disso, a pressão máxima sempre deve estar fixada em função do peso dinâmico máximo que o pneu pode suportar e a pressão mínima varia em função da carga, velocidade e das condições de superfície do terreno (KNOB, 2010).

A utilização do trator numa propriedade é variada, devendo-se considerar que tipos de pneus e pressões de inflagem inadequadas representam elementos negativos para a maior parte das operações culturais, induzindo a compactação do solo, a emissão de gases poluentes ao ambiente, bem como o aumento de consumo de energia durante a execução do trabalho (MAZETTO, 2004).

As características de desempenho de pneus agrícolas em diferentes condições de solo, com várias cargas dinâmicas e pressões de inflagem, são de grande interesse na adequação dos mesmos dentro da unidade de força motriz, tendo como objetivo a execução dos trabalhos de campo de forma mais eficiente (UPADHYAYA e WULFSOHN, 1990).

Lyne et al. (1984), verificaram que a eficiência tratória e de combustível pode ser aumentada se observada qual a carga dinâmica que será imposta ao equipamento, bem como a pressão de inflagem correta dos pneus.

Barger et al. (1963) concluíram, por meio de equações, que a tração de um pneu pode ser melhorada pela diminuição de sua pressão de inflagem, pois se obtém maior área de contato com o solo. O aumento da pressão proporcionou maior resistência ao rolamento do rodado, quando trafegando sobre areia solta, devido ao aumento do recalque no solo.

O efeito da pressão de inflagem do pneu também tem grande importância na compactação. Lanças et al. (1995) ensaiando pneus agrícolas na Universidade da Califórnia – EUA, concluíram que a utilização de pressão baixa, porém ideal, resultou em alta capacidade tratória, baixo consumo de combustível, alta produtividade operacional e baixo grau de compactação do solo.

2.3.2. Pressão média de contato com o solo

Segundo Mialhe (1993), o primeiro ensaio de pneu num trator agrícola foi realizado em 1932 pelo próprio fabricante, tendo o sucesso desse teste determinado sua produção em escala para tratores. De 1935 a 1946, muitos ensaios de pneus foram realizados nos Estados Unidos, principalmente no Laboratório de Máquinas de Mobilização de Solo, em Auburn, Alabama, mas o efeito dos rodados no solo só passou a ser objeto de estudo na década de 50.

Segundo Chancellor (1977), a pressão exercida na superfície do solo é igual ao peso total aplicado dividido pela área de contato entre o solo e o pneu. Cada tipo de rodado aplica uma dada carga de modo particular e com pressão de contato característica. Esta carga pode ser distribuída de diversas formas na superfície, como pneus simples estreitos, pneus duplos, pneus largos de baixa pressão e esteiras. A Figura 3 mostra como ocorre a distribuição de pressões numa superfície rígida de um solo arenoso, por pneus lisos, nos quais foram acoplados transdutores de pressão ("strain gage").

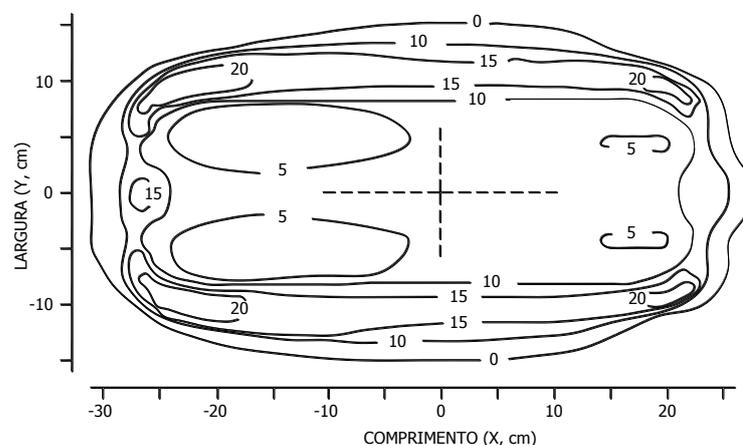


FIGURA 3. Distribuição das pressões de contato (kPa) sob um pneu liso inflado com 41 kPa na superfície rígida de um solo arenoso (VANDEN BERG e GILL, 1962).

De um modo geral essa distribuição mostrada, depende da carga aplicada, das características do rodado e do solo. Dessa forma, a distribuição da pressão na área de contato varia com a pressão de inflagem, tamanho do pneu, extensão da área de contato com o solo, teor de água e densidade do solo (VANDEN BERG e GILL,1962; CHANCELLOR,1977; FERNÁNDEZ e GALLOWAY, 1987).

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 distribuições de pressões no interior de um solo sob carga podem ser obtidas experimentalmente introduzindo transdutores de pressão no interior deste. Vários trabalhos como os de: Vanden Berg e Gill, 1962; Nichols et al., 1987; Harris e Bakker, 1994; Carrier et al.,1995 e Turner et al., 2001, utilizaram dessa técnica.

O lugar geométrico de pontos de igual pressão em qualquer profundidade é uma superfície de revolução. É possível traçar deste modo, uma superfície de mesmas pressões (isóbaras) projetada num plano vertical, a qual é chamada de bulbo de pressão. A Figura 4 mostra um conjunto de bulbos de pressões obtidos experimentalmente.

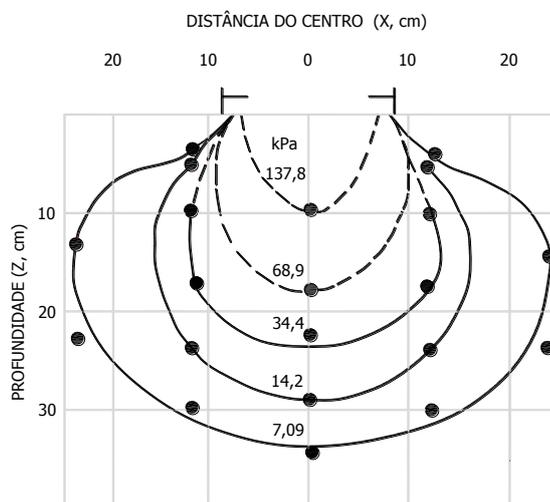


FIGURA 4. Distribuição de pressões num plano vertical do solo sob uma pressão de 2060 kPa aplicada numa área de $0,2 \text{ m}^2$ (VANDEN BERG et al., 1957).

As pressões normais à superfície de compressão têm uma tendência de se concentrarem ao redor do eixo vertical abaixo do centro da carga aplicada. Esta tendência é tanto maior quanto maior for a plasticidade do solo devido ao aumento do teor de água, e coesão dependente do teor de argila. Por causa desta tendência, os valores de pressão, por

exemplo, a 30 cm abaixo da superfície, podem ser 50% maiores para um solo fofo e plástico e 35% menor para um solo duro e resistente se comparado a um solo normal (SOEHNE,1958).

Os valores de pressão entre o solo e o pneu podem variar de 1 a 5 vezes a pressão com que o pneu se encontra inflado. Soehne (1958) afirma que, dependendo das características do solo e também do pneu, se for considerada apenas a face lisa do pneu, as forças que atuarão sobre o solo serão menores se comparadas à pressão que as garras exercem.

Wasterlund (1994) enfatiza que danos no solo ocorrem pela pressão exercida pelas máquinas e sua movimentação sobre o solo. De acordo com seus dados, os níveis de pressão de contato solo – pneu não devem ultrapassar valores entre 50 a 60 kPa, com uma profundidade máxima do sulco de 2,5 cm. Valores acima de 90 kPa são considerados altos pelo autor, que obteve esses valores de acordo com a fórmula:

$$Pc = \frac{W}{r \times l} \quad (7)$$

Em que:

Pc = pressão de contato (kPa);

W = peso por roda (N);

r = raio do pneu (m); e

l = largura do pneu (m).

A fórmula pode ser utilizada, segundo o autor, para fazer comparações entre diferentes configurações de pneus e analisar o potencial de dano que um determinado equipamento possa trazer ao solo. A pressão de contato é a carga distribuída sobre a área de contato solo – pneu, sendo a carga obtida pelos dados ponderais no catálogo da máquina, e a área de contato em função das dimensões do rodado e deflexão da carcaça.

Ainda segundo o autor, pneus mais largos têm como vantagem melhor distribuição das forças aplicadas ao solo, reduzindo a pressão por área e aumentando a capacidade de tração e de transpor obstáculos.

2.3.3. Intensidade de tráfego

A principal causa da compactação dos solos agrícolas é o tráfego de tratores e máquinas, em sua maioria montados sobre rodados pneumáticos (BARBOSA, 2002). As

pressões aplicadas sobre a superfície do solo são distribuídas ao longo do perfil em função das tensões e deformações em maior ou menor escala de acordo com as características físicas do solo (GILL e VANDEN BERG, 1968).

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.

Mudança na densidade do solo foi observada por Raghavan et al. (1976) em testes de campo, utilizando um trator com 4670 kg arrastando um pulverizador de 3424 kg com dois vagões sobre rodas. O trator tinha pneus traseiros com tamanho de 46.7x76.2 cm e os pneus do pulverizador eram de 28.6x61 cm. Os resultados da Figura 5 demonstram um aumento da densidade do solo seco em uma seção transversal sob os pneus, para diferentes números de passadas do conjunto mecanizado sempre repetidas nos mesmos rastros.

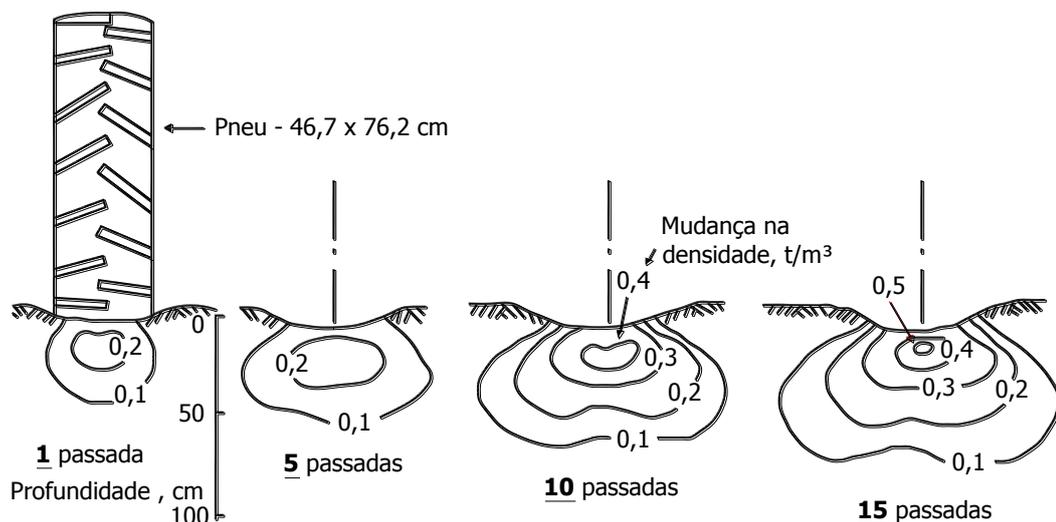


FIGURA 5. Distribuição dos aumentos na densidade do solo seco, após várias passadas de um conjunto mecanizado formado por um trator de pneus e pulverizador com dois vagões sobre rodas (RAGHAVAN et al., 1976).

É evidente na Figura 5 que o número de vezes que uma carga é repetida sobre um mesmo local afeta não só a magnitude da densidade do solo, mas também o volume de solo. A densidade inicial do solo variou de 1 para 1,3 t/m³ desde a superfície até uma profundidade de 30 cm, e a umidade média foi de 18%. Após dez e quinze passadas do conjunto trator-pulverizador, o volume de solo compactado foi progressivamente mais profundo e mais amplo do que depois de uma ou cinco passagens.

Silva et al. (2003) avaliou a influência do tráfego do rodado traseiro e da soleira de implementos agrícolas, sobre a compressibilidade de um Latossolo Vermelho. Os resultados obtidos demonstraram que a intensidade de tráfego do rodado e a ação da soleira dos implementos alteraram a compressibilidade, a densidade do solo, a porosidade e a

condutividade hidráulica do solo saturado nas profundidades: superficial, profundidade média de trabalho e profundidade de corte dos implementos.

É fato que o uso intensivo de máquinas e implementos na agricultura moderna pode modificar as propriedades do solo, em relação àsquelas de seu estado natural. Têm sido detectadas camadas compactadas subsuperficiais causadas pelo intenso tráfego de máquinas e implementos agrícolas, que provocam pressões na superfície do solo (MANTOVANI, 1987), afetando a sua densidade (MORAES e BENEZ, 1996), degradando a macroestrutura e reduzindo o grau de flocculação da argila do solo (PRADO e CENTURION, 2001).

O tráfego excessivo, sem o controle das diversas condições do solo, é o principal responsável pela compactação ocasionada por forças mecânicas, tanto pelo exagerado número de operações como pelo simples tráfego do trator sobre o solo (BELTRAME e TAYLOR, 1980), quando a carga aplicada for superior à capacidade de suporte do solo (SILVA et al., 2002; LIMA et al., 2006; VEIGA et al., 2007).

Coleti e Demattê (1982) verificaram que a tendência dos valores de densidade do solo é aumentar com a intensidade do tráfego, sendo que aproximadamente 50 a 60% da compactação do solo se manifestaram com as primeiras passadas. Portanto, deve-se evitar tráfego desnecessário dentro do talhão. Outros autores também verificaram este comportamento do tráfego e seus efeitos cumulativos na compactação, concluindo de modo geral que a maior parte da compactação total em uma trilha de roda ocorre nas primeiras passadas de uma máquina, (TROUSE JÚNIOR, 1978; FROEHLICH e McNABB, 1983; KOGER et al., 1985). À medida que o número de passadas no mesmo local aumenta, há aumento cada vez menos acentuado na compactação, seguindo uma escala logarítmica (JAKOBSEN e GREACEN, 1985).

Em condições de campo, as marcas dos rodados de tratores e veículos ficam encobertas por operações subseqüentes. Com isso, é necessário levar em conta que a área de um terreno que recebe a carga de máquinas e implementos é bem maior do que se suspeita ao observar a superfície do terreno. Comprovando essa hipótese, Soane (1975) verificou que o padrão de marcas deixadas pelos rodados de veículos num sistema de preparo convencional de solo para plantio de cevada (distribuição de fertilizantes + duas gradagens + semeadura), cobriu 91% da área.

Ainda segundo o autor, uma maneira de observar esse efeito é por fotos aéreas, registradas após cada operação procedendo-se à sobreposição dessas fotos. Tem-se observado que a quase totalidade da área tem, pelo menos, uma passada de trator com os implementos.

2.3.4. 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).

Segundo Mialhe (1993) 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.

Bekker (1960) desenvolveu a partir da equação proposta por Bernstein em 1913, um modelo relacionando a pressão aplicada e o conseqüente recalque. Mais recentemente alguns autores como Adam e Erbach (1995), têm utilizado este conceito para propor modelos de relação entre recalque e compactação. Esses autores desenvolveram uma equação para relacionar volume de recalque e profundidade de compactação em termos do aumento de densidade do solo e validaram a equação com testes em laboratório simulando cargas aplicadas pelas máquinas no campo.

Pneus de mesma largura podem formar diferentes profundidades de recalque se inflados a pressões diferentes, ou seja, pressões de enchimento maiores implicam em maiores profundidades de recalque. Nos estudos de McDonald et al. (1995), as configurações que mais causaram recalque do solo foram tanto pneus estreitos quanto largos.

Em solo firme o pneu deforma mais que em solo solto, enquanto que em solos soltos ambos deformam primeiramente o solo e depois o pneu (VANDEN BERG e GILL, 1962).

2.4. Opções para reduzir a compactação sob rodas

Segundo Plackett (1984), a compactação do solo é função principalmente da pressão

aplicada na superfície do solo. Além disso, Inns e Kilgour (1978) enfatizam que as operações de campo que ocorrem de forma concentrada, produzindo altas pressões no solo, devem ser realizadas no momento em que o solo estiver seco para minimizar os efeitos da compactação do solo.

Soane et al. (1982) cita que há três maneiras principais de reduzir a área total de compactação do solo por veículos agrícolas:

- ✓ redução do número de “passadas” das máquinas convencionais;
- ✓ redução da massa do veículo e da pressão de contato do sistema pneumático;
- ✓ limitação do tráfego nas faixas de deslocamento permanente ou faixas de deslocamento temporário (tráfego controlado).

A representação esquemática destas opções em relação aos tipos de veículos pode ser visualizada na Figura 6.

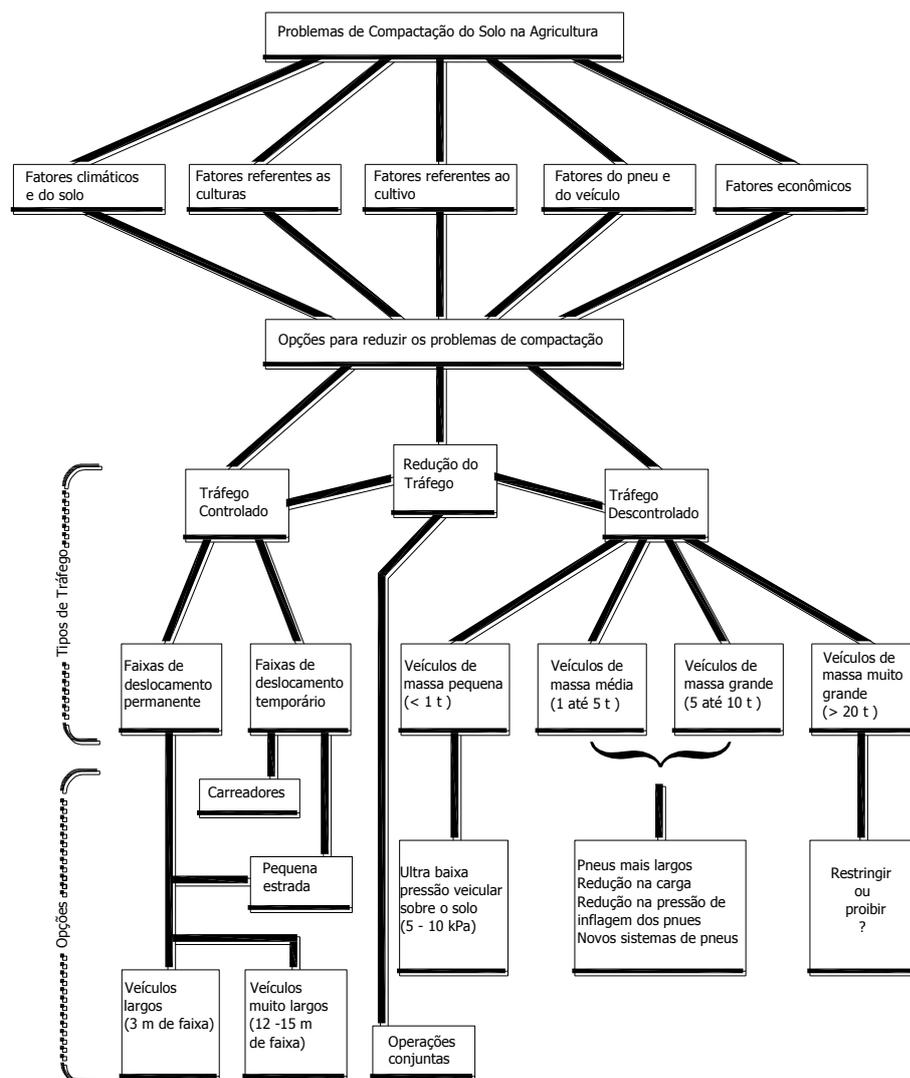


FIGURA 6. Diagrama de opções para reduzir a compactação do solo (SOANE et al., 1979).

A redução do tráfego pode ser realizada por meio da combinação das operações em uma única passagem, como cultivo e semeadura ou certos tipos de operações de colheita utilizando máquinas atualmente disponíveis e atitudes corretas no gerenciamento das máquinas. A pressão de contato com o solo pode ser minimizada através da redução da carga sobre os pneus e do aumento da área de contato. O peso pode ser diminuído por meio da remoção de lastro para um valor mínimo. Alternativamente, área de contato pode ser aumentada pela redução da pressão de inflagem para o valor mínimo permitido pelo fabricante do pneu; aumentando o tamanho dos pneus; e finalmente optando por pneus duplos (SOANE et al., 1979).

Segundo Trein et al. (2005), uma solução para diminuir ou evitar a compactação do solo pelo tráfego de máquinas seria a adoção de um sistema de tráfego controlado, ou seja, separar as zonas de tráfego das zonas em que há crescimento das plantas, concentrando a passagem de pneus em linhas delimitadas, assim, uma área menor seria atingida, embora mais intensamente. Os autores enfatizam que o sistema de tráfego controlado funciona bem com culturas que são estabelecidas em linha. Esta é uma prática recente no Brasil, mas bastante difundida na Austrália, que tem como objetivo reduzir o impacto da compactação do solo sobre a produtividade das culturas (TULLBERG, 1997).

Em uma avaliação do efeito da posição do tráfego na colheita de cana-de-açúcar, Braunack et al. (2006) verificaram redução da compactação e aumento da produtividade da cultura em áreas com controle de tráfego.

Trabalhos realizados na Austrália e nos Estados Unidos demonstraram que, enquanto culturas estabelecidas em preparo convencional têm até 86% da área trafegada, em semeadura direta, apenas 46% é atingida. Os estudos também revelaram que, caso for utilizado controle do tráfego, apenas 17% da área é atingida pelos pneus, resultando em aumentos de produtividade da ordem de 9 a 16%. Os pesquisadores chamam a atenção para um componente fundamental para que se tenha sucesso com a adoção deste sistema, que é o uso dos implementos com as mesmas larguras ou em larguras múltiplas. Portanto, deve-se tentar diminuir as áreas trafegadas pelo ajuste das bitolas de todas as máquinas empregadas na produção da cultura (TREIN et al., 2005).

Assim, os benefícios obtidos a partir da adoção do tráfego controlado passam pela redução no consumo de combustível, em razão da menor oposição ao avanço das máquinas, e pelo melhor rendimento da tração, em razão do tráfego do maquinário ocorrer em solo mais firme (linhas de tráfego).

Na tentativa de solucionar os problemas decorrentes do preparo convencional, surgiram os preparos conservacionistas, que proporcionam menor mobilização do solo e mantêm maior proteção da superfície do solo com os resíduos culturais. O plantio direto e o cultivo mínimo são tipos de manejo conservacionista que procuram minimizar a mobilização do solo. No entanto, mesmo com a ausência de revolvimento do solo, têm sido diagnosticados problemas de compactação superficial do solo (RICHART et al., 2005).

Hakansson e Medvedev (1995) e Klein e Boller (1995) afirmam que a compactação em sistema de plantio direto é provocada pelo efeito cumulativo do tráfego de máquinas e acomodação natural das partículas sólidas. No plantio direto a movimentação do solo é restrita à linha de semeadura, mas a ocorrência sistemática do tráfego causa compactação na camada superficial (TORMENA et al., 1998).

Essa compactação é considerada o principal aspecto negativo do sistema de plantio direto e tem motivado alguns agricultores, ainda que temporariamente, a retornar ao preparo convencional do solo, visando corrigir essa limitação (TORMENA e ROLOFF, 1996).

3. MATERIAL E MÉTODO

Para facilitar o entendimento desse estudo, que foi realizado em duas condições diferentes, descrições separadas de cada experimento tornam-se necessárias.

3.1. Experimento com trator agrícola em condição de campo

3.1.1. Caracterização da área

A área de estudo esteve sob o sistema plantio direto por quatro anos e está sobre um Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2006), localizada na estação experimental da EMATER de Anápolis, GO, cuja localização geográfica é definida pelas coordenadas 16° 19' S e 48° 18' W, com altitude média de 980 m.

Predomina na região de Anápolis o clima tropical de savana, megatérmico, do tipo Aw 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 1400 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.

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 1.

TABELA 1- Caracterização física e mecânica do Latossolo Vermelho sob plantio direto

Propriedades Analisadas	Valores Obtidos
Propriedades Físicas	
Análise Textural	
Teor de areia	450 ± 35 g kg ⁻¹
Teor de silte	110 ± 22 g kg ⁻¹
Teor de argila	440 ± 43 g kg ⁻¹
Índices Físicos	
Umidade - (w)	26,54 ± 1,13%
Peso específico real dos grãos ¹ - (δ)	2,54 ± 0,11 t m ⁻³
Massa específica aparente seca ² - (ρ)	1,14 ± 0,05 t m ⁻³
Porosidade Total ³ - (η)	55,12 ± 2,57%
	...continua...

TABELA 1, Cont.

Limites de Consistência

Limite de Liquidez - (LL)	39,22 ± 1,37%
Limite de Plasticidade - (LP)	27,13 ± 3,33%
Limite de Contração - (LC)	19,74 ± 1,88%

Propriedades Mecânicas

Massa específica aparente seca máxima – ($\rho_{dm\acute{a}x}$)	1,49 ± 0,05 t m ⁻³
Umidade ótima de compactação – (w_{ot})	27,74 ± 1,65%
Grau de compactação ⁴ - (GC)	76,57 ± 3,36%
Resistência à penetração - (RP)	
0 - 10 cm	1,45 ± 0,33 MPa
10 - 20 cm	2,07 ± 0,33 MPa
20 - 30 cm	1,70 ± 0,25 MPa
30 - 40 cm	1,32 ± 0,22 MPa

¹ Também designada de densidade de partículas.

² Também designada como densidade do solo.

³ Também conhecida como VTP.

⁴ Na área agrícola é mais conhecido como densidade relativa.

A área utilizada no experimento foi de 0,48 hectares, e as parcelas, com dimensões de 7 x 9 m, foram demarcadas em nível, com intervalos de 7 e 9 m para acesso e manobra do trator (Figura 7).



FIGURA 7. Área experimental: a) vista geral; e b) demarcação de uma parcela experimental.

3.1.2 Delineamento estatístico

Foi adotado o delineamento em blocos ao acaso no esquema de parcelas subdivididas, composto por dez tratamentos com quatro repetições por tratamento, totalizando 40 unidades experimentais. As parcelas foram constituídas de duas pressões de inflagem dos pneus: 96,5 e 137,9 kPa. As subparcelas foram as cinco intensidades de tráfego ou energias de compactação: zero (testemunha), uma, duas, quatro e oito passadas do trator.

3.1.3. Área de contato com o solo

Para o cálculo da pressão aplicada ao solo, pelo trator, foi necessário determinar a área de contato do pneu com o solo e a distribuição da força peso do trator.

Com a finalidade de obter uma área de contato uniforme, foi polvilhado gesso em pó em toda a área em torno do pneu traseiro direito do trator e em todos os espaços vazios entre as garras do pneu (Figura 8).



FIGURA 8. Aplicação de gesso em pó ao redor do pneu traseiro direito do trator.

Em seguida, o trator foi içado com auxílio de um macaco hidráulico, tomando o cuidado para não danificar a depressão produzida pelo contato do rodado com solo. Após a elevação do trator, a área de contato foi registrada por fotografia digital em alta resolução obtida perpendicularmente ao solo, utilizando uma câmera fotográfica SONY Cyber-Shot 14,1 Mega Pixels. O procedimento foi realizado para dois diferentes valores de pressões de inflagem dos pneus (96,5 e 137,9 kPa) e em vários locais da área experimental. As imagens resultantes foram analisadas utilizando-se o software AutoCad 2007, onde efetuou-se a correção da escala e a determinação das áreas de contato (Figura 9).

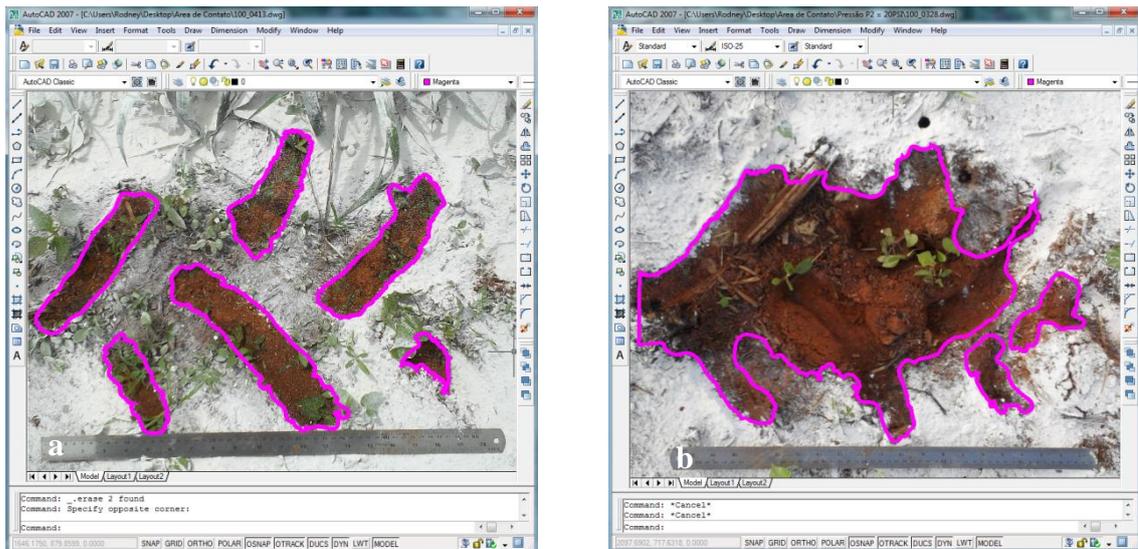


FIGURA 9. Determinação das áreas de contato do pneu traseiro do trator por meio do software AutoCad 2007: a) pressão de inflagem de 96,5 kPa; e b) pressão de inflagem de 137,9 kPa.

3.1.4. Pressão aplicada ao solo

A determinação do valor da força peso que age na parte inferior do pneu traseiro do trator foi realizada em uma balança mecânica industrial da marca Estrela, com capacidade para 19 kN e precisão de 2 N, pertencente ao laboratório de protótipos de máquinas do programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola da UEG, Figura 10. A pesagem foi realizada com o trator estando com o tanque com 50 litros de combustível, operador de 80 kg, com lastros metálicos na parte frontal e nos eixos dianteiro e traseiro e condição de lastragem líquida correspondente a 75% de água nos rodados traseiros. O peso obtido foi de 11,18 kN.

A magnitude da pressão média de contato, aplicada pelo rodado ao solo, foi calculada pela equação 8, proposta por Mialhe (1980):

$$P_m = \frac{W}{S} \quad (8)$$

Em que:

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

W = carga suportada pelo rodado (N); e

S = área de contato do rodado (m^2).



FIGURA 10. Determinação da força peso que age sobre a parte inferior do pneu traseiro do trator: a) nivelamento longitudinal; b) nivelamento transversal; e c) balança mecânica industrial.

3.1.5. Distribuição de tensões no solo

Inicialmente considerou-se que as áreas de contato do pneu com o solo são circulares. As tensões induzidas no solo pelo pneu, na vertical que passa pelo centro da área de contato, foram calculadas pela equação de Love (1929) que é o resultado da integração da equação de Boussinesq, para toda a área circular. O acréscimo de tensão efetiva vertical induzida em um ponto qualquer, situado a uma profundidade Z é dado pela expressão:

$$\sigma_z = p \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + (R/Z)^2} \right]^{3/2} \right\} \quad (9)$$

Em que:

σ_z = tensão vertical efetiva;

R = raio da área carregada;

Z = distância vertical; e

p = carregamento.

Para pontos situados fora da vertical que passa pelo centro da área de contato, o acréscimo de tensão efetiva vertical foi calculado por meio do ábaco de Love (1929), que forneceu as isóbaras de σ_z/p , em função do afastamento e da profundidade relativa X/R e Z/R , respectivamente. O ábaco pode ser visualizado no Anexo A da dissertação.

3.1.6. Níveis de tráfego e pressões de inflagem do pneu

Durante os ensaios de campo, para simular o efeito do tráfego, utilizou-se um trator New Holland TT 4030, com potência nominal do motor (na rotação nominal de 2500 rpm) de 55,1 kW (75 cv), pneu traseiro de construção diagonal com especificações técnicas 16,9x30R1, modelo Dyna torque II, cujas pressões de inflagem no momento dos ensaios foi de 96,5 e 137,9 kPa, de acordo com o tratamento.

A influência do tráfego foi avaliada logo após as passadas do pneu traseiro em uma área referenciada, de tal forma que o pneu dianteiro não trafegasse no interior desta. Os tráfegos constituíram de: zero (testemunha), uma, duas, quatro e oito passadas do trator, para cada pressão de inflagem do pneu. Foram realizadas coletas de amostras deformadas e indeformadas de solo, para determinação de propriedades físicas e mecânicas, em dois locais: a) na área referenciada e na profundidade de 0-0,10m após o nível de tráfego adotado em cada tratamento; e b) no espaço entre os rodados traseiros e na profundidade de 0-0,20m (esse segundo grupo de amostras foi utilizado na segunda condição experimental e sua extração será detalhada no item 3.2.5).

Também foi determinado o recalque causado na superfície do solo pelo tráfego utilizando-se um perfilômetro composto de 60 barras verticais distantes 10 mm umas das outras (Figura 11).

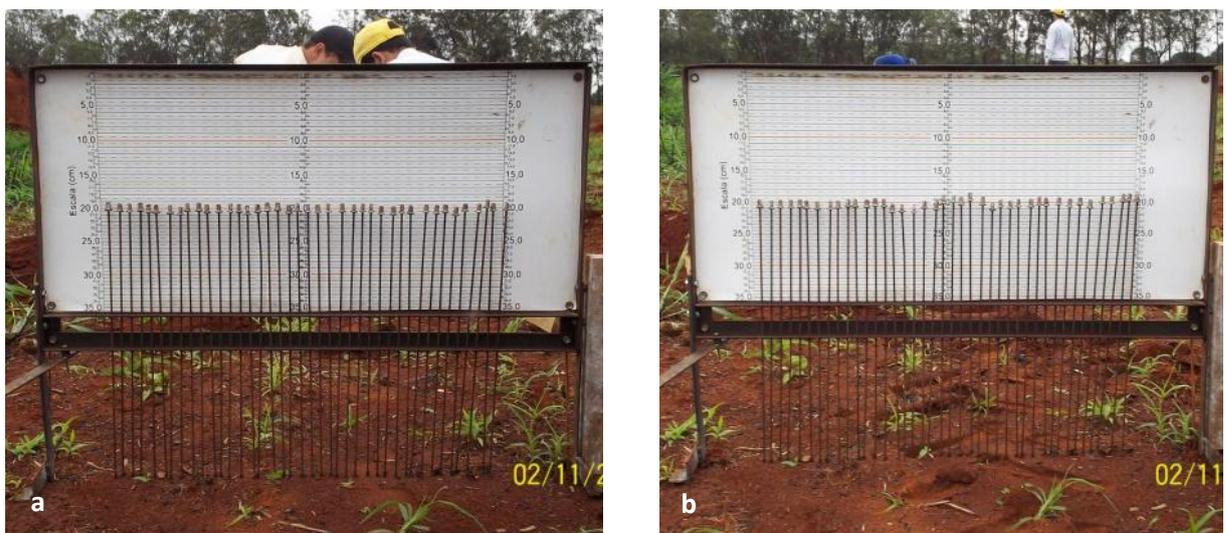


FIGURA 11. Medição do recalque do solo: a) perfil do solo antes do tráfego; e b) após o tráfego.

3.1.7. Variáveis analisadas em laboratório

3.1.7.1. Densidade do solo (Massa específica aparente seca)

A densidade do solo foi determinada após o tráfego do trator em cada parcela experimental. As amostras indeformadas foram coletadas na profundidade de 0-0,10m, utilizando um amostrador tipo Uhland e anel de aço de Kopecky de bordas cortantes com volume interno conhecido, colocadas em sacos plásticos e vedadas para o transporte. No laboratório, as amostras foram numeradas, pesadas em balança digital de precisão (0,01g), transferidas para cápsulas de alumínio e conduzidas a estufa com temperatura entre 105 e 110°C, onde permaneceram por um período de vinte e quatro horas. O valor da densidade do solo foi estabelecido pela relação entre a massa de solo seco em estufa e o seu volume (EMBRAPA, 1997).

3.1.7.2. Grau de compactação

O grau de compactação foi obtido pela seguinte expressão:

$$GC = \frac{\rho_{d \text{ campo}}}{\rho_{d \text{ referência}}} \times 100 \quad (10)$$

Em que:

GC = Grau de compactação do solo (%);

$\rho_{d \text{ campo}}$ = massa específica aparente seca obtida no campo; e

$\rho_{d \text{ referência}}$ = massa específica aparente seca máxima obtida no laboratório (Ensaio de Proctor Normal).

O ensaio de Proctor Normal seguiu a metodologia descrita na NBR 7182 (ABNT, 1986). Inicialmente as amostras de solo deformadas foram colocadas em bandejas de modo que adquiriram umidade higroscópica (secagem ao ar). Cada amostra foi destorroada e peneirada na peneira nº 4 (4,8mm).

A determinação da densidade máxima consistiu da adição de água a amostra, homogeneização, adição de solo até 1/3 do cilindro de 10 cm por 12,73 cm (1000 cm³) que foi submetido a 26 golpes de um soquete de 2,5 kg caindo à altura de 30,5 cm, equivalente a

uma pressão de 200 kPa. Em seguida, adicionou-se mais uma camada até atingir 2/3 e depois outra até atingir a superfície do cilindro, procedendo da mesma forma para compactação.

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. De cada corpo de prova assim obtido, determinou-se a massa específica do solo seco e o teor de umidade de compactação.

A curva de compactação foi obtida marcando-se, no eixo das ordenadas, os valores das massas específicas aparentes secas (ρ_d) e, no eixo das abscissas, os teores de umidade correspondentes (w).

Assim, a massa específica seca máxima ($\rho_{d \text{ referência}}$) é a ordenada máxima da curva de compactação e a umidade ótima (w_{ot}) é o teor de umidade correspondente a massa específica máxima.

3.1.8. Análise estatística

As variáveis obtidas foram submetidas à análise de variância pelo teste de F, a 5% de probabilidade e, quando houve diferença significativa entre os tratamentos, suas médias foram comparadas pelo teste de Tukey e também submetidas à análise de regressão. Em todos os procedimentos estatísticos descritos foi utilizado o programa SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2007).

3.2. Experimento com simulador linear de tráfego em condição laboratorial

Para avaliar o efeito dos diferentes níveis de tráfego e pressões de inflagem do pneu nas propriedades físicas e mecânicas do solo, em condição laboratorial, foi utilizado um simulador linear de tráfego¹ devidamente adaptado para a condição de solo agrícola.

O simulador possui um conjunto mecânico constituído basicamente por um braço articulado acoplado, em uma extremidade a um redutor e na outra ligado a um eixo que contém uma roda. O acionamento se dá por motor elétrico monofásico de $\frac{3}{4}$ CV (0,55 kW) e a transmissão de torque do motor para o redutor é feita por polia - correia.

O tráfego é simulado pela repetição da carga aplicada por uma roda submetida a esforço vertical e seu movimento longitudinal se dá sobre o corpo de prova. Na Figura 12 têm-se as vistas do simulador linear de tráfego utilizado.

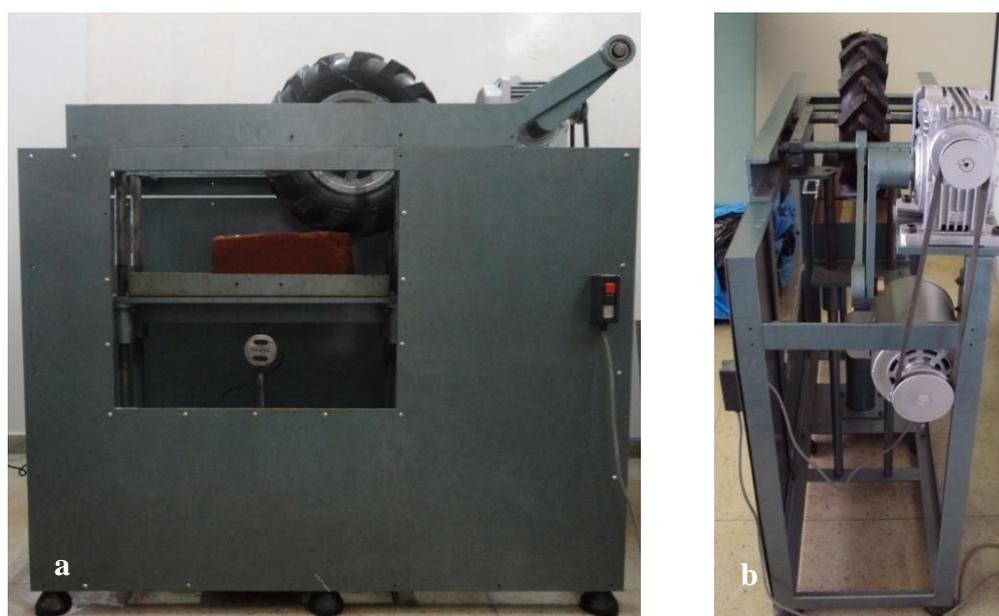


FIGURA 12. Vistas do simulador linear de tráfego: a) frontal; e b) lateral direita.

Na roda do simulador foi adaptado um pneu de motocultivador com as seguintes características: construção diagonal, medida 4,80-8, duas lonas, modelo PowerTrack fabricado pela Carlsisle.

¹ Simuladores de Tráfego LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) são utilizados pela engenharia civil e foram desenvolvidos para o estudo de afundamentos de trilha de roda em misturas betuminosas. Inicialmente as amostras são compactadas na mesa LCPC e submetidas aos tráfegos no simulador. Esses procedimentos seguem as especificações francesas NF-P-98-250-2 e NF-P-98-250-2. A primeira norma estabelece um método de compactação de placas de misturas asfálticas com uma carga rolante simulando a ação no campo de um rolo pneumático. A segunda norma estabelece critérios para as medições da trilha de roda.

3.2.1. Delineamento estatístico

O experimento em laboratório foi conduzido no delineamento em blocos casualizados no esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições por tratamento, totalizando 40 unidades experimentais. As parcelas foram constituídas de duas pressões de inflagem dos pneus: 96,5 e 137,9 kPa e as subparcelas por cinco intensidades de tráfego: zero (testemunha), uma, duas, quatro e oito passadas da roda do simulador de tráfego, de forma a proporcionar pressões médias de contato com valores próximos as aplicadas pelo trator em campo.

3.2.2. Área de contato com o solo

O simulador de tráfego diferencia-se de um trator agrícola basicamente na escala e na forma como a carga é aplicada ao solo. No caso do trator a carga é o próprio peso do eixo, e no simulador devido as características construtivas, ou seja, ausência de um valor fixo de carga no eixo, o carregamento é aplicado por um macaco hidráulico que comprime a superfície da amostra contra a banda de rodagem do pneu.

Tais distinções entre trator e simulador de tráfego influenciam na forma de obtenção das áreas de contato dos pneus. Para o trator agrícola, mantida uma determinada pressão de inflagem do pneu, carga no eixo e admitindo-se uma condição de solo homogênea tem-se possível somente um único valor de área de contato. No simulador de tráfego como a carga vertical é passível de alteração, pode-se obter n-valores de área de contato e consequentemente pressões de contato variadas.

Tendo em mente essas restrições foi realizado um procedimento iterativo de aplicação de carregamentos sobre amostras de teste e medições das áreas de contato até obter-se valores de pressão de contato do pneu próximas das condições de campo.

As áreas de contato foram obtidas seguindo a mesma metodologia utilizada no experimento em campo (Figura 13).

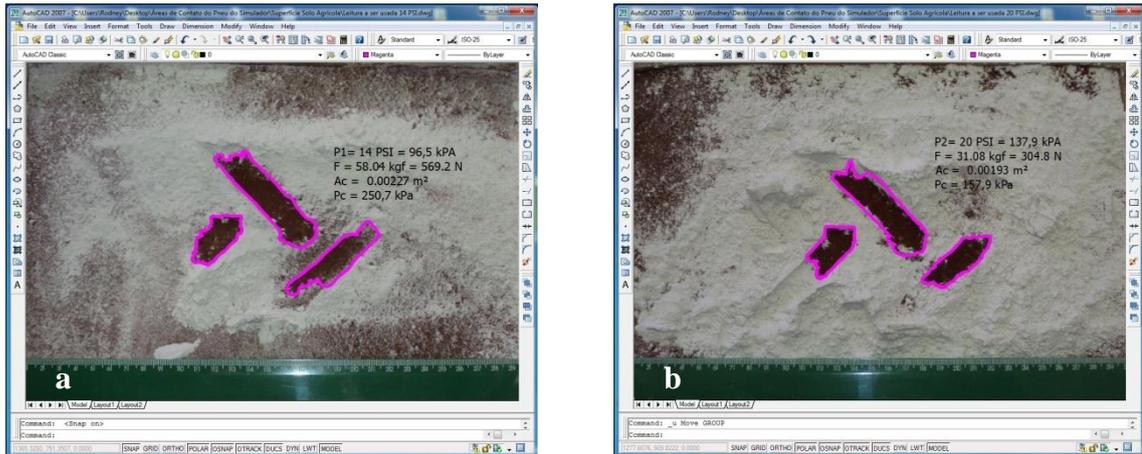


FIGURA 13. Determinação das áreas de contato do pneu do simulador por meio do software AutoCad 2007: a) pressão de inflagem de 96,5 kPa, carregamento de 58,04 kgf e pressão de contato de 250,7 kPa; e b) pressão de inflagem de 137,9 kPa, carregamento de 31,08 kgf e pressão de contato de 157,9 kPa.

3.2.3. Pressão aplicada ao solo

Para a aplicação do carregamento na superfície das amostras utilizou-se um macaco hidráulico com capacidade de duas toneladas força. A carga aplicada pelo macaco era monitorada por uma célula de carga de 200 kgf posicionada entre a placa de suporte das amostras e o macaco.

Para uma correta interpretação dos valores de tensões e, conseqüentemente carregamentos, fornecido pelo sensor, foi necessário primeiramente calibrá-lo. O resultado da calibração da célula de carga pode ser visto na Figura 14.

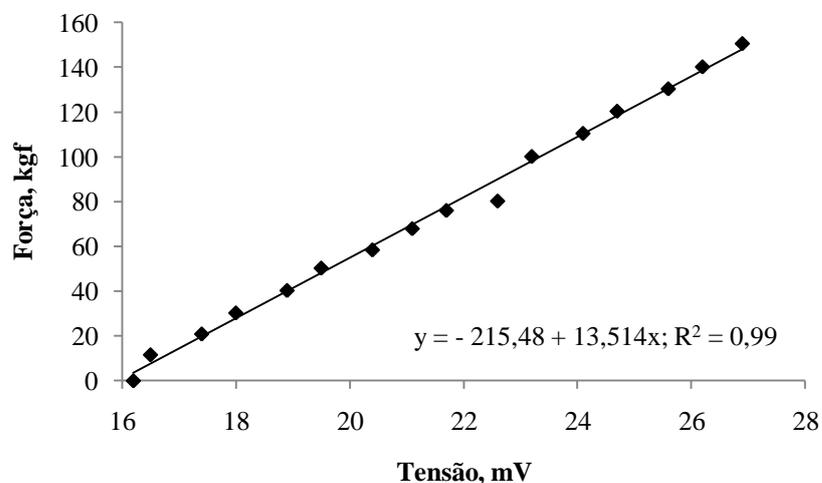


FIGURA 14. Gráfico de calibração da célula de carga utilizada para monitorar a carga aplicada pelo macaco hidráulico.

Antes de proceder aos ensaios no simulador de tráfego, a célula de carga foi devidamente conectada ao sistema de aquisição de dados, modelo ADS 2000, fabricado pela Lynx e as leituras foram visualizadas no Software AqDados 7.0 fornecido pelo fabricante do equipamento. A montagem dos sistemas de aquisição de dados e de aplicação dos carregamentos é mostrada na Figura 15.

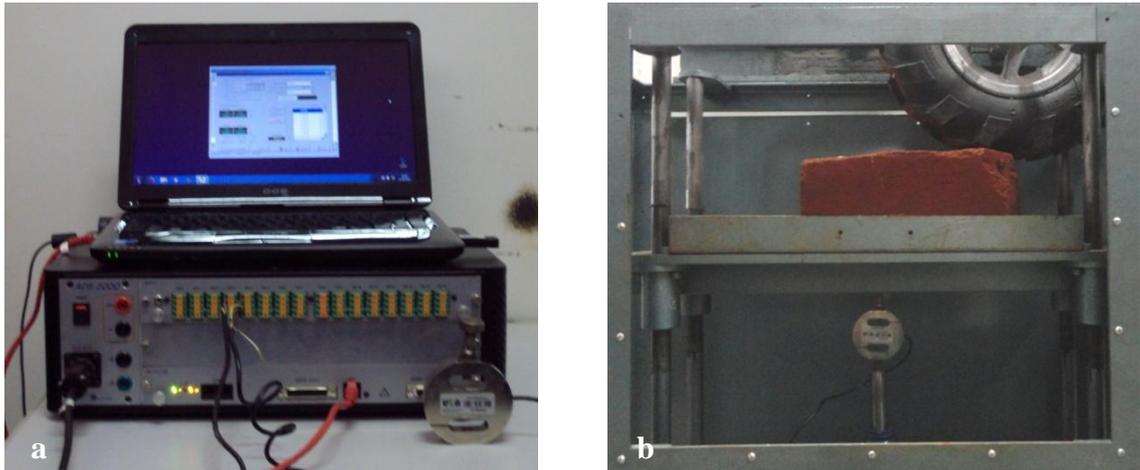


FIGURA 15. Montagem dos sistemas: a) aquisição de dados; e b) aplicação de carregamentos.

O carregamento foi aplicado até que as amostras de solo fossem submetidas a valores de pressão de contato próximos aos determinados na condição de campo, ou seja, pressões de aproximadamente 252,5 kPa (2,57 kgf cm⁻²) e 142,2 kPa (1,45 kgf cm⁻²) de acordo com o tratamento.

3.2.4. Distribuição de tensões no solo

As tensões induzidas no solo pelo pneu do simulador, na vertical que passa pelo centro da área de contato, foram calculadas pela equação de Love (1929) descrita no experimento de campo.

3.2.5. Extração das amostras de solo indeformadas

As amostras indeformadas de solo (corpos de prova) utilizados no simulador foram extraídas na área do primeiro experimento, após o término de cada tratamento, no espaço entre os rodados traseiros e na profundidade de 0-0,20m.

O procedimento de retirada das amostras indeformadas foi baseado na norma NBR 9604 (ABNT, 1986). As amostras possuíam dimensões de 20 x 24 x 40 cm (altura, largura e comprimento). A seqüência dos procedimentos pode ser vista na Figura 16, e é descrita, resumidamente nos seguintes passos: (a) retirada da camada superior do solo com vegetação e escavação, com enxadão e picareta, de um cubo com dimensões um pouco superior ao tamanho da amostra, até uma profundidade pouco maior que a altura do bloco; em seguida foi feito o desbaste do bloco com uma espátula até serem atingidas as dimensões finais do bloco; (b) depois de talhado, uma primeira camada de parafina (aquecida no campo em um fogareiro) foi despejada sobre a parte superior e nas laterais do bloco; (c) então, o bloco foi envolto com um tecido de malha fina, e novamente parafinado até que ficasse completamente revestido; (d) com o facão e o martelo de geólogo escavou-se o bloco por baixo até desprendê-lo; (e) cuidadosamente o bloco foi virado; (f) e o excesso de solo retirado até ficar com as dimensões desejadas; (g) a parafina e o tecido de malha fina foram adicionados e terminou-se de parafinar o bloco; e (h) após a identificação os blocos foram transportados para o laboratório e acondicionados em câmara úmida até a data de início dos testes.



FIGURA 16. Retirada de amostras indeformadas: a) escavação do bloco de solo; b) adição da primeira camada de parafina; c) envolvimento da amostra com tecido de malha fina e uma nova camada de parafina; d) desprendimento do bloco; e) tombamento da amostra; f) regularização da parte inferior da amostra; g) adição de parafina e tecido na parte inferior da amostra; e h) acondicionamento em câmara úmida.

O tecido de malha fina utilizado tinha a função de dar uma estrutura mais firme a parafina. A parafina estava na forma líquida e não muito quente, de tal forma que se agregou ao bloco de forma satisfatória. Sua função foi impermeabilizante, procurando manter a umidade de campo no bloco.

3.2.6. Níveis de tráfego e pressões de inflagem do pneu

Os tráfegos constituíram de uma, duas, quatro e oito passadas do pneu do simulador, para cada pressão de inflagem do pneu (96,5 e 137,9 kPa).

3.2.7. Variáveis analisadas

Foram analisadas as seguintes variáveis: densidade do solo, grau de compactação e recalque superficial do solo. A densidade do solo foi determinada de forma semelhante a descrita no primeiro experimento, mas utilizando um anel cilíndrico de menor diâmetro (0,05 m). O volume de solo não foi obtido por queda livre do soquete de cravação e sim talhando-se o maciço de solo até que o mesmo adquiri-se dimensões capaz de ser introduzido no interior do anel cilíndrico (Figura 17).



FIGURA 17. Processo de talhamento do bloco de solo para determinação da densidade do solo.

O grau de compactação também foi determinado como descrito no primeiro experimento. O recalque superficial foi mensurado utilizando o método fotográfico. Para essa última variável uma descrição detalhada encontra-se a seguir.

3.2.7.1. Sistema de leitura dos recalques do solo nas amostras

O método utilizado para a leitura dos recalques desenvolvidos na superfície do solo foi o fotográfico descrito por Bueno (1987) e utilizado com sucesso por Barras (2001), Costanzi (2003) e Costanzi et al. (2003). Esse método baseia-se no conhecimento da posição real de pontos que possam determinar um plano, chamado de plano de referência global que

circunscribe a amostra ensaiada. Com essas referências pode-se conhecer a posição real de qualquer ponto presente numa imagem a ser trabalhada, através 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 desenvolvido por Bueno (1987) utiliza duas equações básicas:

$$X = A + Bx + Cy + Dy + \dots \quad (11)$$

$$Y = A' + B'x + C'y + D'xy + \dots \quad (12)$$

Em que:

X e Y: as coordenadas globais ou reais do ponto em questão;

x e y: as coordenadas locais do ponto em questão; e

A, A', B, B', C, C', D, D',...: as constantes de transformação de coordenadas do sistema.

Desta forma, cada foto tem suas próprias constantes obtidas aplicando-se às equações 11 e 12 as coordenadas globais e locais dos pontos de referência. Após a obtenção destas constantes, têm-se as equações capazes de obter as posições reais de pontos na foto relativas ao sistema de coordenadas criados.

As fotografias antes e ao término dos ensaios foram registradas com uma máquina fotográfica digital da marca SONY Cyber-Shot 14,1 Mega Pixels, que permitiu verificar a trilha de roda (recalque) do solo. Na Figura 18 têm-se as fotos referentes a um ensaio.

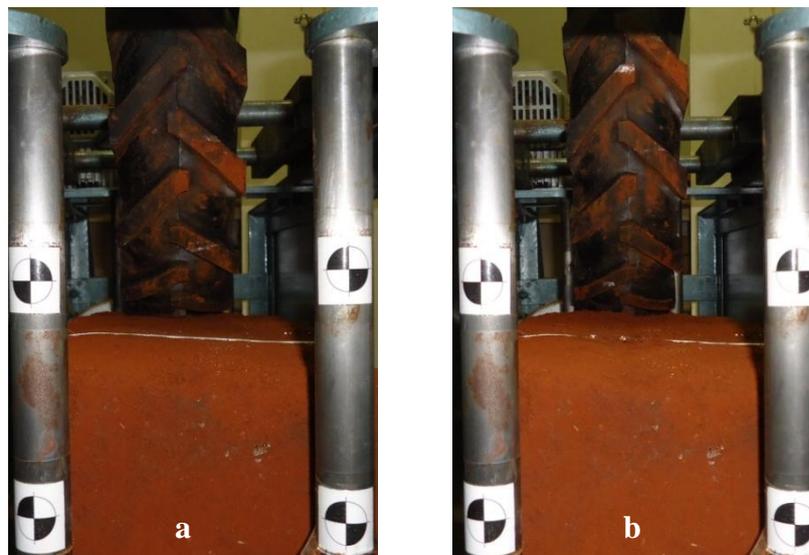


FIGURA 18. Fotografias mostrando o perfil do solo: a) antes; e b) após o tráfego.

Para facilitar o processo de obtenção dos recalques do solo foi desenvolvida uma planilha eletrônica no programa Excel 2010. A planilha realiza os cálculos dos recalques, sendo necessário que o usuário entre com os dados das coordenadas globais e que marque as posições das miras referentes aos pontos das coordenadas globais e as miras dos pontos aos quais se desejam serem calculados os deslocamentos. A tela principal desta planilha pode ser visualizada no Anexo B da dissertação.

3.2.8. Análise estatística

As variáveis obtidas foram submetidas à análise de variância pelo teste de F, a 5% de probabilidade e, quando houve diferença significativa entre os tratamentos, suas médias foram comparadas pelo teste de Tukey e também submetidas à análise de regressão. Posteriormente, realizou-se uma análise de agrupamento de experimentos (análise conjunta) a fim de verificar similaridade ou diferenças entre os experimentos, utilizando o teste de F a 5% de probabilidade. Em todos os procedimentos estatísticos descritos foi utilizado o programa SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2007).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimento com trator agrícola em condição de campo

A análise de variância das variáveis densidade do solo depois do tráfego (DSdT), grau de compactação depois do tráfego (GCdT) e recalque do solo (R), estão apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 - Resumo da análise de variância das variáveis: densidade do solo depois do tráfego (DSdT), grau de compactação depois do tráfego (GCdT) e recalque do solo (R)

FV	GL ⁽¹⁾	Quadrado Médio		
		DSdT	GCdT	R
Bloco	3	0,006735	25,268093	0,138110
Pressão (P)	1	0,009565	22,656948	0,013079
Resíduo 1	3	0,001325	27,171636	0,205525
Tráfego (T)	4 (3)	0,008956 *	38,190510 *	0,675735 *
Pressão x Tráfego (P) x (T)	4 (3)	0,008110	1,736925	0,155434
Resíduo 2	24 (18)	0,000489	12,641853	0,196330
Total	39 (31)			
	CV1 =	3,13	6,69	34,38
	CV2 =	3,93	4,56	33,60
	Média =	1,16	77,96	1,32

⁽¹⁾ Valores de GL entre parênteses referem-se ao recalque do solo pelo fato de não existir testemunha.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F.

CV1: Coeficiente de variação da parcela (%).

CV2: Coeficiente de variação da subparcela (%).

Observa-se que as variáveis: densidade do solo depois do tráfego, grau de compactação depois do tráfego e recalque do solo, sofreram alterações estatisticamente significativas, conforme foram alterados os níveis de tráfego dentro de cada parcela experimental. Todavia, não se constatou efeito da pressão de inflagem dos pneus na compactação do solo, de acordo com as variáveis analisadas, nem efeito da interação dos cinco níveis de tráfego com as duas condições de inflagem dos pneus.

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

Partindo do princípio que a pressão exercida no solo está diretamente ligada à relação força/área, e que um dos objetos de estudo deste trabalho foi a área de contato, o fator

força (peso do trator) foi mantida constante, pois não houve acréscimo de nenhuma carga vertical no eixo do trator. Na Tabela 3, têm-se os valores das áreas de contato e das pressões médias de contato com o solo em função das pressões de inflagem do pneu.

TABELA 3 - Áreas de contato do pneu traseiro do trator e pressões médias de contato com o solo em função das pressões de inflagem do pneu

Pressão de inflagem (Psi / kPa)	Área de contato (m ²)	Pressão média de contato (kPa)
14 / 96,5	44,27 x 10 ⁻³ a	252,5 a
20 / 137,9	78,62 x 10 ⁻³ b	142,2 b

Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey (P < 5%).

Pelos dados apresentados na Tabela 3, observou-se que a área de contato do pneu inflado com 137,9 kPa é 77,57% maior do que a área de contato do pneu inflado com 96,5 kPa. No momento da determinação das áreas de contato o solo encontrava-se com 26,4% de umidade.

A pressão de inflagem dos pneus é o fator que influencia na área de contato com o solo e conseqüentemente na pressão de contato. Quando a pressão é muito baixa tem-se concentradas as cargas nas extremidades do pneu de tal forma que o centro do pneu praticamente não fica em contato com a superfície do solo conforme pôde ser visto na Figura 9a. Isso explica o baixo valor de área de contato para a pressão de inflagem de 96,5 kPa.

Segundo Lanças (1996) os pneus diagonais em termos operacionais apresentam um problema crucial, a necessidade de inflagem com pressões relativamente altas (150 a 200 kPa) que produzem uma pequena área de contato com o solo, resultando em menor tração útil e maior compactação do solo. A necessidade de maiores pressões está relacionada com os flancos do pneu (região de flexão do pneu) que sofrem desgastes e avarias quando submetidos a grandes deformações impostas pela baixa pressão.

A escolha desse baixo valor de pressão de inflagem do pneu (96,5 kPa) foi com base na utilização no campo por parte dos agricultores, pois proporciona uma tração melhor em certas condições de solo, mas este não é o caso na maioria das situações, não compensando o risco de danos nos pneus utilizando dessa prática. Dessa forma esse estudo possibilita verificar as conseqüências dessa pratica comum, nas variáveis relacionadas a compactação do solo.

O comportamento da pressão de contato é inversamente proporcional ao comportamento da área de contato, pois é dependente da mesma, uma vez que, a pressão

aplicada ao solo é o peso incidente sobre o rodado dividido pela superfície de contato formada entre a roda e o solo.

A pressão média aplicada ao solo pelo rodado inflado com 96,5 kPa é de 252,5 kPa e para uma pressão de inflagem de 137,9 kPa é de 142,2 kPa o que significa um aumento de 77,5% na pressão incidente sobre o solo. Camargo e Alleoni (2006) afirmam que a pressão média que o pneu exerce sobre a superfície do solo é aproximadamente igual à pressão interna dos pneus. Uma menor pressão aplicada pelo rodado ao solo pode levar a uma diminuição da compactação do mesmo. Entretanto, mesmo tendo verificado uma diferença de 77,57% entre uma pressão de contato e outra, essa diferença proporcionada pela pressão de inflagem não implicou em compactação adicional como pôde ser visto na Tabela 2.

4.1.2 Distribuição de tensões no solo

A Figura 19 mostra a magnitude das tensões normais e as distribuições ao longo do perfil do solo. O carregamento exercido pelo pneu (16,9-30) na superfície do solo, 252,5 kPa (pneu inflado com 96,5 kPa) e 142,2 kPa (pneu inflado com 137,9 kPa), influenciaram as distribuições das tensões. Nota-se ainda que, com o aumento da profundidade e da distância do centro do pneu, as tensões normais (ou verticais) reduzem em grandeza, resultando possivelmente em menores deformações do solo em maiores profundidades, mas se estendem em áreas maiores (CRUZ e SAES, 1989; SMITH et al., 2000).

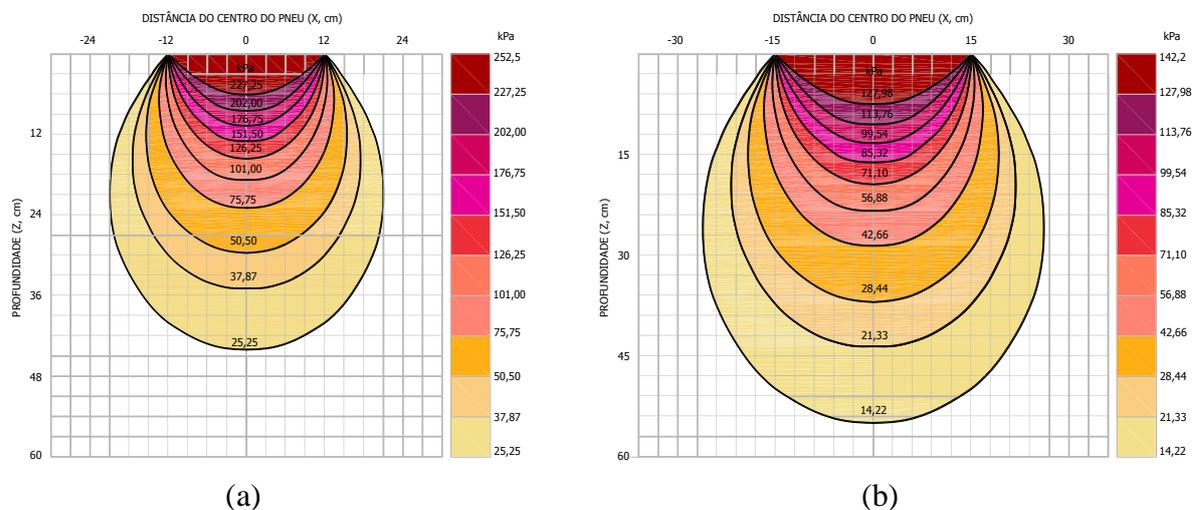


FIGURA 19. Bulbos de tensões obtidos para carregamentos exercidos pelo pneu traseiro do trator na superfície do solo: a) 252,5 kPa e b) 142,2 kPa.

4.1.3. Densidade do solo depois do tráfego

Verifica-se pela Tabela 2, que não houve efeito significativo da pressão do pneu e da interação entre pressão e nível de tráfego sobre a densidade do solo após o tráfego. Na tabela 4, apresentam-se os valores médios de densidade do solo após o tráfego. Embora não significativo para pressão, o menor valor de pressão do pneu proporcionou menores valores de densidade do solo, mesmo apresentando uma pressão de contato superior, o que foi devido ao fato da pressão estar mais concentrada nas extremidades do pneu de tal forma que no centro da linha de tráfego, onde foi feita a coleta das amostras, o contato era menor.

TABELA 4 - Valores médios de densidade do solo ($t\ m^{-3}$) no centro da linha de tráfego do pneu, em função da intensidade de tráfego e da pressão de inflagem do pneu

Tráfego (Passadas)	Pressão (Psi / kPa)		Média
	14 / 96,5	20 / 137,9	
0	1,13 ± 0,02	1,15 ± 0,03	1,14 ± 0,02
1	1,14 ± 0,03	1,17 ± 0,02	1,16 ± 0,03
2	1,14 ± 0,05	1,17 ± 0,08	1,16 ± 0,07
4	1,19 ± 0,05	1,25 ± 0,03	1,22 ± 0,04
8	1,13 ± 0,08	1,17 ± 0,07	1,15 ± 0,07
Média	1,15 ± 0,05	1,18 ± 0,04	1,16 ± 0,04

O tráfego foi o único fator que influenciou de forma significativa na densidade do solo após as passadas do pneu traseiro do trator. A análise de regressão indicou comportamento quadrático e a equação expressa na Figura 20 revela que 74% da variação de densidade do solo depois do tráfego é explicada pelo número de passadas.

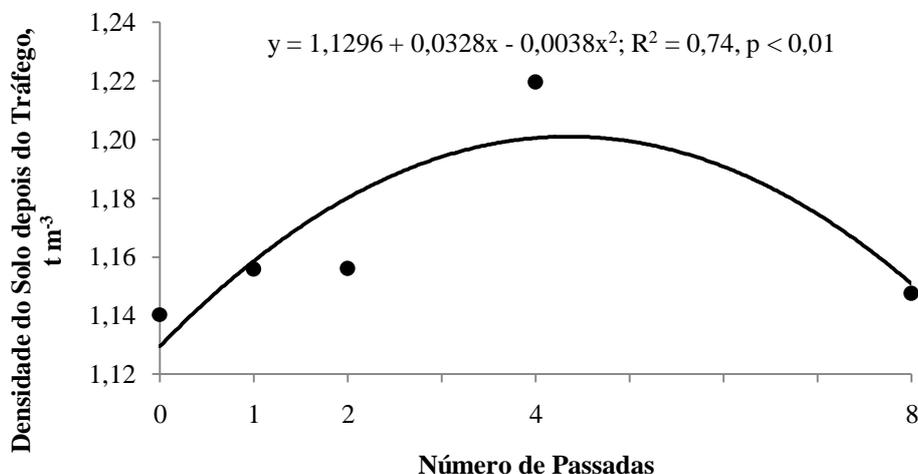


FIGURA 20. Densidade do solo após o tráfego em função do número de passadas do pneu traseiro do trator.

Os valores médios de densidade do solo representados pelas barras verticais na Figura 21 evidenciam que houve diferença estatisticamente significativa entre os valores obtidos para quatro, zero e oito passadas do trator.

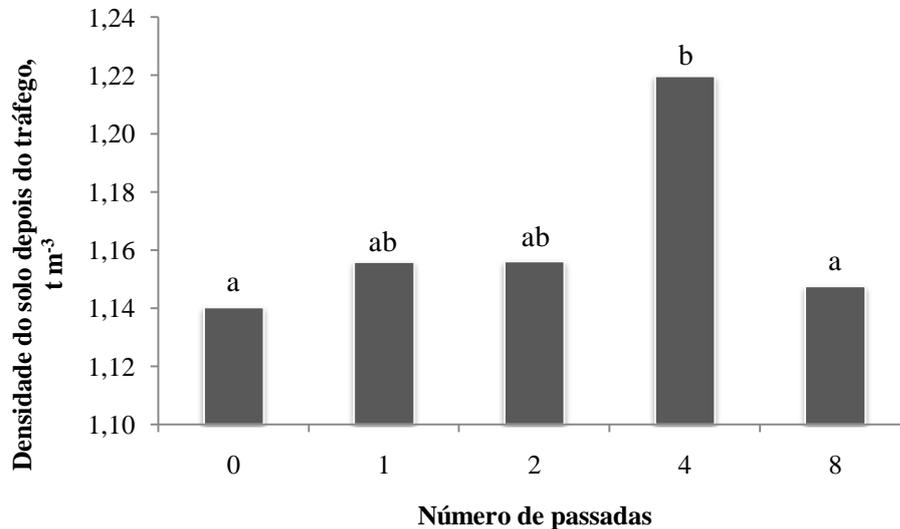


FIGURA 21. Valores médios da densidade do solo após aplicação dos níveis de tráfego. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 5\%$).

Com uma passada do trator houve um aumento médio na densidade do solo de 1.40% em relação a testemunha (ausência de tráfego). Com duas passadas não houve diferença significativa em relação ao tráfego anterior. O maior incremento na densidade média do solo ocorreu após quatro passadas. Com oito passadas do pneu traseiro do trator houve uma redução estatisticamente significativa da densidade do solo em relação ao tratamento com quatro passadas.

Esses resultados corroboram com os encontrados por Silva et al. (2011) que avaliando a intensidade do tráfego de duas, quatro e oito vezes de um Forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo, nas profundidades de (0-0,03m) e (0,10-0,13m), concluíram que todas as intensidades de tráfego causaram compactação no solo nas duas profundidades estudadas, sendo quatro passadas as que causaram maior compactação do solo. Já o número de passadas igual a oito causou menor compactação do que o número de passadas igual a quatro na profundidade de 0-0,03 cm.

Beutler et al. (2009) avaliando o efeito de vários níveis de tráfego de um trator de 8,0t, na compactação de um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico, evidenciada pela densidade do solo amostrada em duas profundidades (0,08-0,11m) e (0,22-0,25m), obtiveram maiores valores desse atributo após o tráfego de quatro passadas do trator não diferindo dos tráfegos de uma, duas e oito passadas em todas as profundidades analisadas.

4.1.4. Grau de compactação depois do tráfego

Na Tabela 2, verifica-se que houve efeito significativo do tráfego no grau de compactação, mas a pressão do pneu e a interação entre pressão e nível de tráfego não influenciaram de forma significativa o comportamento dessa variável.

A análise de regressão indicou comportamento quadrático para o grau de compactação depois do tráfego e a equação expressa na Figura 22 demonstra que 59% da variação do grau de compactação depois do tráfego é explicada pelo número de passadas.

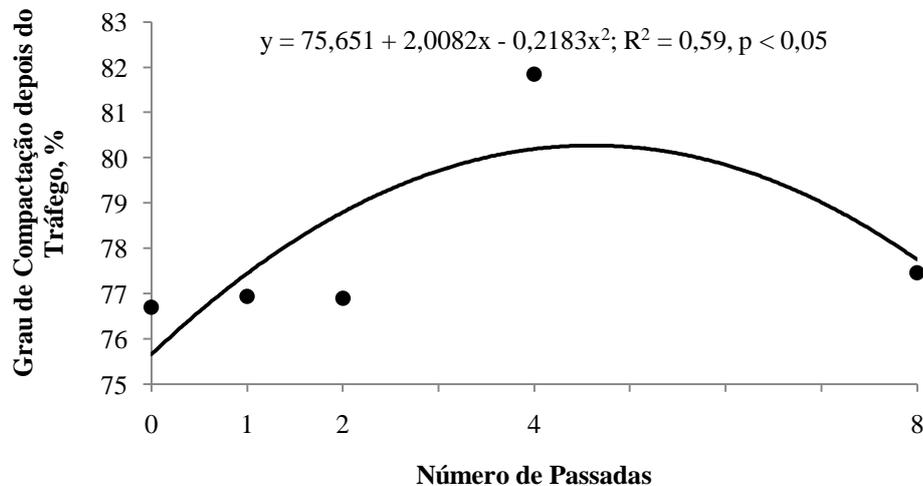


FIGURA 22. Efeito do número de passadas do pneu traseiro do trator sobre o grau de compactação do solo.

O grau de compactação de quatro passadas diferiu significativamente para zero, uma e duas passadas, mas não para oito passadas (Figura 23).

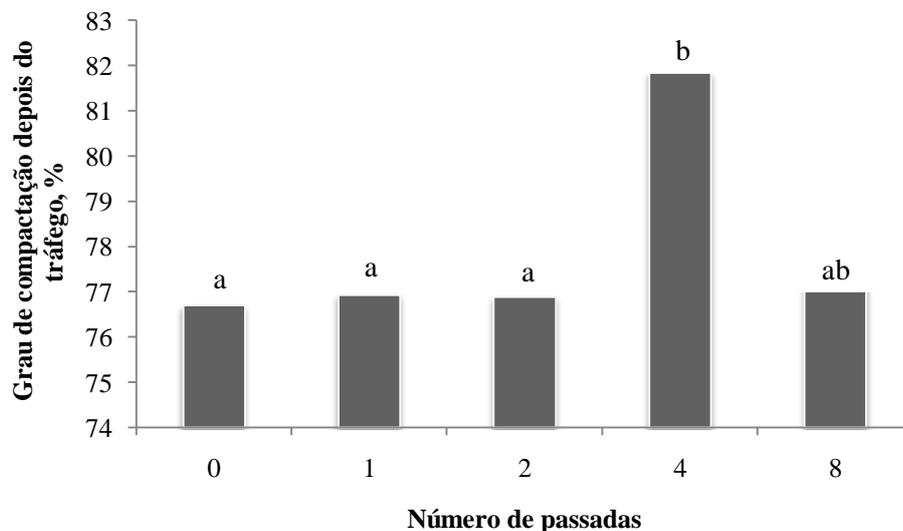


FIGURA 23. Valores médios do grau de compactação após aplicação dos níveis de tráfego. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 10\%$).

O maior grau de compactação ocorreu para um número de passadas igual a quatro, a exemplo do que ocorreu com a variável densidade. Esses resultados corroboram com os de Jorajuria e Draghi (1997), Hamza e Anderson (2003) e Botta (2005) os quais analisando o grau de compactação na superfície do solo obtiveram maiores incrementos logo após as primeiras passadas.

Beutler et al. (2008) quantificando a produtividade das culturas da soja e do milho, em Latossolo Vermelho de textura média, observaram que um grau de compactação de até 79 e 81%, respectivamente para a soja e o milho, favoreceram a obtenção de produtividades máximas, conforme também verificado na literatura (Al-Adawi e Reeder, 1996; Beutler et al. 2004, 2005). A partir desses níveis de compactação ocorreu decréscimo da produtividade, relacionado a dois fatores físicos do solo: impedimento mecânico e a falta de oxigênio para o crescimento das raízes, conforme também verificado por da Silva et al. (2004).

Freddi (2007) constatou que o grau de compactação a partir do qual ocorrem limitações severas ao desenvolvimento do milho, para Latossolo Vermelho de textura média e argilosa foi de 78 e 80 %, respectivamente.

Como o grau de compactação é uma razão entre duas densidades, ou seja, a densidade do solo pela densidade de referência obtida pelo ensaio de Proctor Normal e os valores da densidade de referência foram semelhantes em toda a área do experimento, o comportamento dessa variável foi condicionado quase exclusivamente pela densidade do solo.

Silva et al. (1997) pesquisaram a influência da textura do solo, matéria orgânica e tipo de manejo na densidade do solo e na densidade relativa. Os autores verificaram que a densidade do solo foi fortemente influenciada pelos fatores mencionados, enquanto que o uso da densidade relativa praticamente eliminou os efeitos da textura e do teor de matéria orgânica, realçando o efeito do tipo de manejo e intensidade do tráfego de máquinas sobre o solo.

4.1.5. Recalque do solo

Na Figura 24 tem-se o comportamento do recalque do solo em função da intensidade de tráfego para cada pressão de inflagem do pneu. Nota-se que o recalque do solo tende a se estabilizar com o aumento dos níveis de tráfego porque ocorre redução do índice de vazios do solo até um determinado valor a partir do qual não se tem mais volume de vazios para ser alterado.

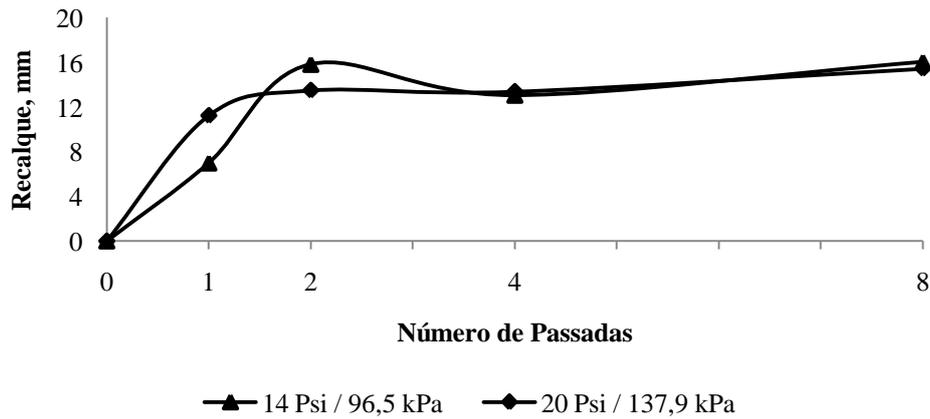


FIGURA 24. Recalque do solo em função das intensidades de tráfego e das pressões de inflagem do pneu.

Segundo Maziero (1993), somente em circunstâncias excepcionais, o solo agrícola apresenta resistência às cargas aplicadas por pneus sem exceder o limite elástico e deformar-se permanentemente.

Na Tabela 2, verifica-se que não houve efeito significativo da pressão de inflagem do pneu nem da interação entre pressão e nível de tráfego sobre o recalque do solo. O único fator que influenciou no recalque, de forma estatisticamente significativa, foi o nível de tráfego.

Na Figura 25 têm-se apresentado o efeito dos níveis de tráfego nos valores de recalque sofrido pelo solo. Com o aumento do tráfego houve tendência de ligeiro aumento no recalque do solo.

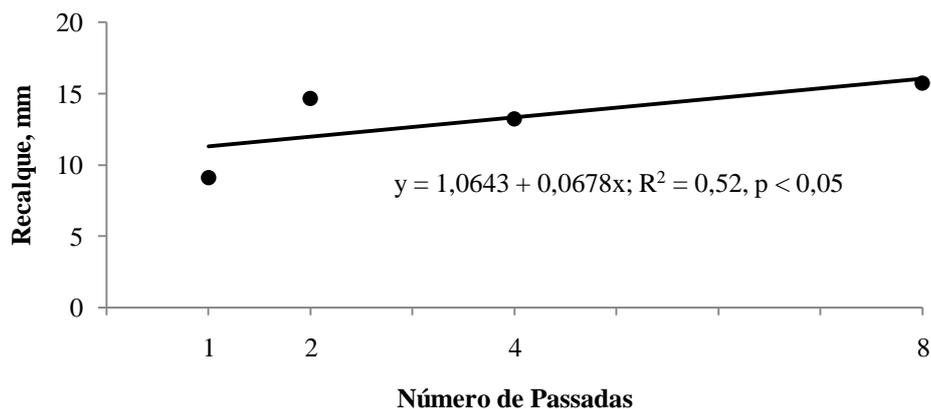


FIGURA 25. Recalque do solo em função das intensidades de tráfego.

A tensão aplicada no solo pelo tráfego de oito passadas do trator aumentou o recalque em relação ao tráfego de uma passada, mas similarmente aos tratamentos de duas e quatro passadas (Tabela 5).

TABELA 5 - Valores médios de recalque do solo após aplicação dos níveis de tráfego

Tráfego (Passadas)	Recalque (mm)
1	9,11 a
2	14,66 ab
4	13,23 ab
8	15,74 b

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

Wiermann et al. (1999) chegaram a conclusões parecidas, quando testaram a influência de rodados sob diferentes pressões de inflagem, cargas dinâmicas e passada do rodado em caixas de solo, utilizando transdutores para medir o deslocamento horizontal e vertical do solo. De acordo com esses autores, os valores de tensão no solo e o deslocamento vertical medidos para a primeira passada foram significativamente afetados pelo aumento das cargas dinâmicas e pressão de inflação dos rodados.

Nas Figuras 26 e 27 têm-se os perfis do solo, antes e após os níveis de tráfego, para as duas condições de inflagem dos pneus. Cada curva representa a média de quatro observações. O recalque é dado pela diferença entre as duas curvas.

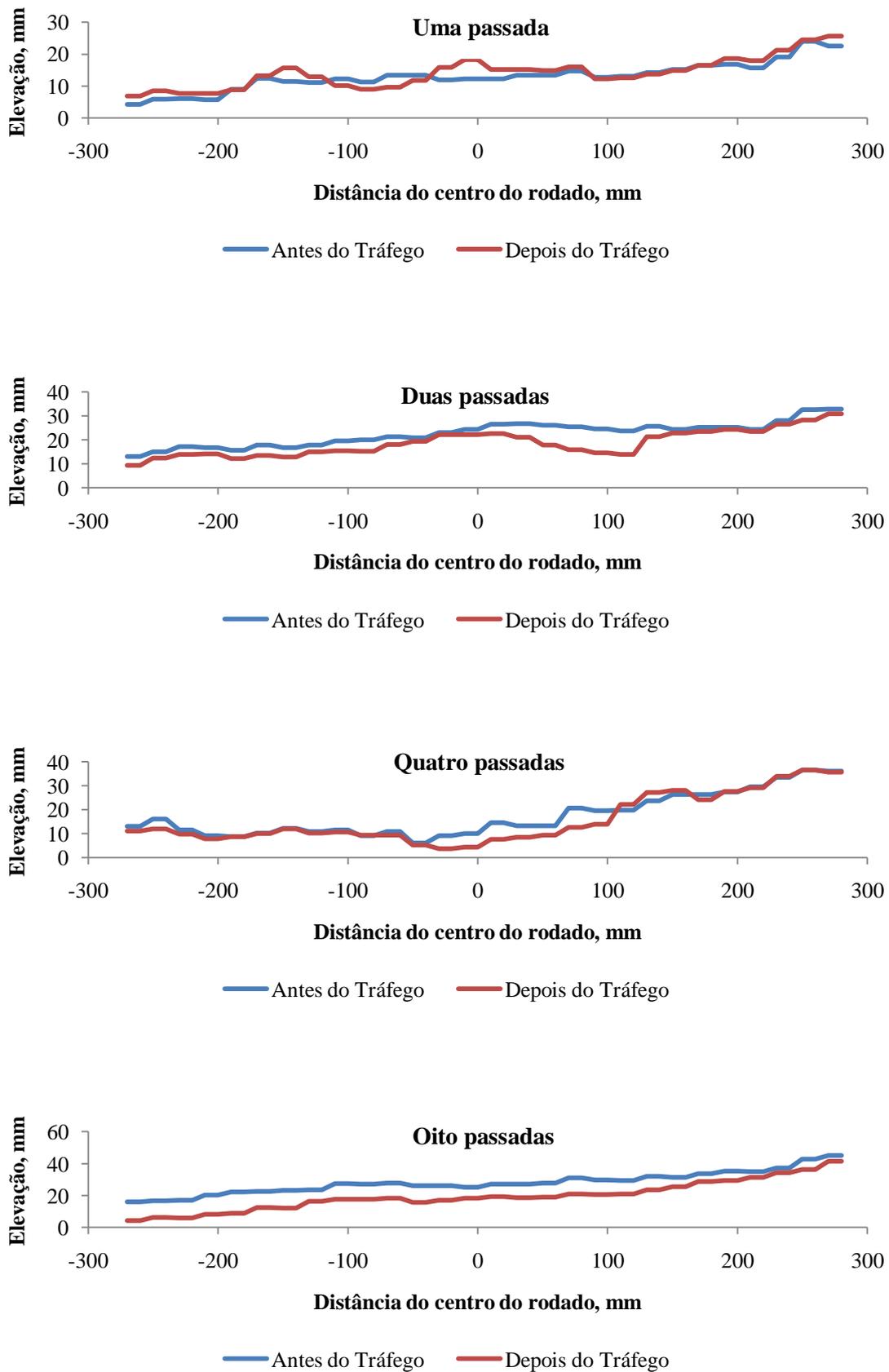


FIGURA 26. Perfis do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal do trator com 96,5 kPa de pressão de inflagem, antes e após os tráfegos de uma, duas, quatro e oito passadas.

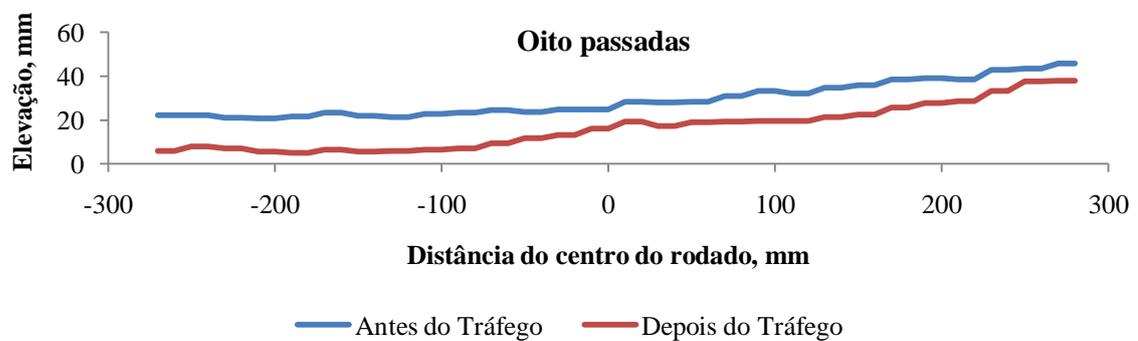
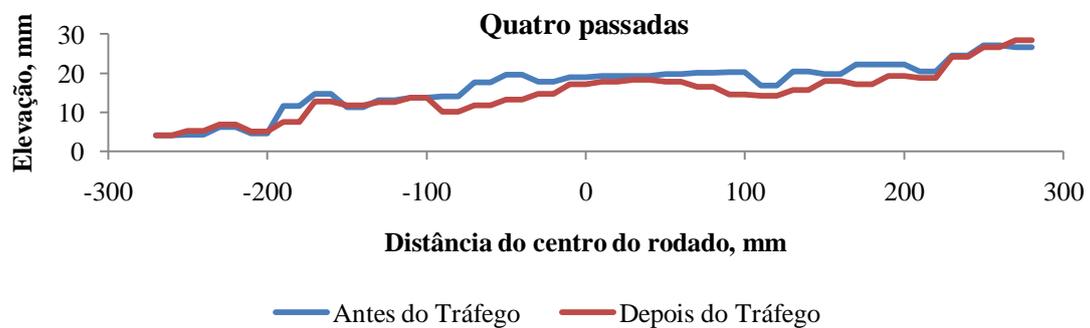
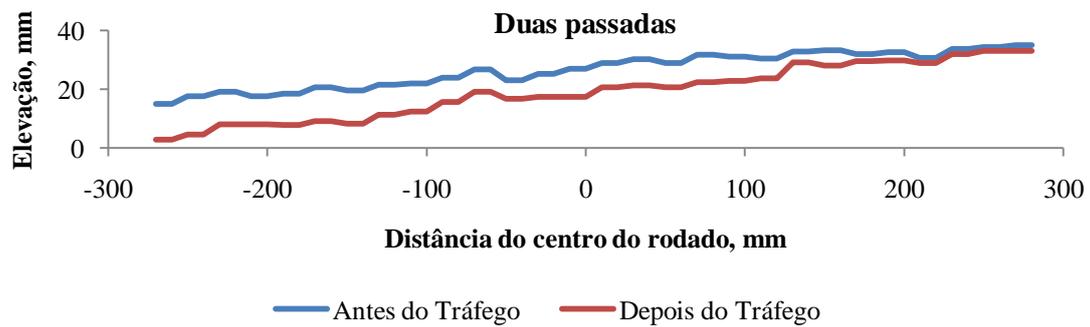
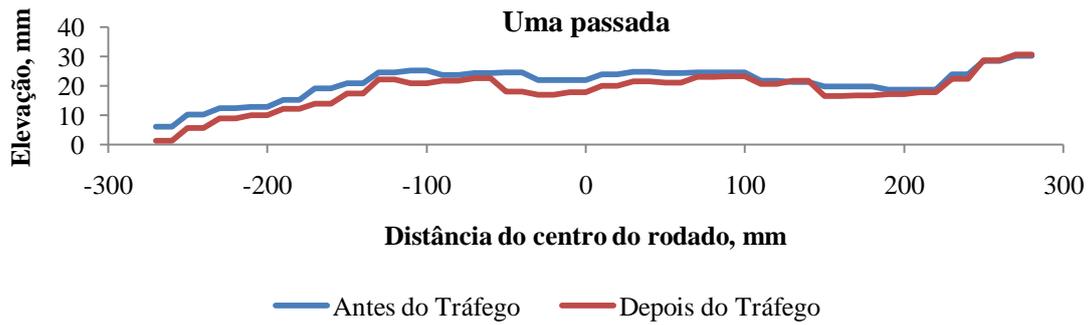


FIGURA 27. Perfis do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal do trator com 137,9 kPa de pressão de inflagem, antes e após os tráfegos de uma, duas, quatro e oito passadas.

4.2. Experimento com simulador linear de tráfego em condição laboratorial

Os resultados da análise de variância para as variáveis densidade do solo depois do tráfego (DSdT), grau de compactação depois do tráfego (GCdT) e recalque do solo (R), estão apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 - Resumo da análise de variância das variáveis: densidade do solo depois do tráfego (DSdT), grau de compactação depois do tráfego (GCdT) e recalque do solo (R)

FV	GL ⁽¹⁾	Quadrado Médio		
		DSdT	GCdT	R
Bloco	3	0,000975	6,339882	0,124668
Pressão (P)	1	0,000874	1,704038	0,515115
Resíduo 1	3	0,000211	5,529798	0,053115
Tráfego (T)	4 (3)	0,008538*	52,176263*	0,479196*
Pressão x Tráfego (P) x (T)	4 (3)	0,001297	2,396366	0,019432
Resíduo 2	24 (18)	0,001612	12,130121	0,069106
Total	39 (31)			
	CV1 =	1,25	3,02	33,20
	CV2 =	3,45	4,47	37,87
	Média =	1,16	77,83	0,69

⁽¹⁾ Valores de GL entre parênteses referem-se ao recalque do solo pelo fato de não existir testemunha.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F.

CV1: Coeficiente de variação da parcela (%).

CV2: Coeficiente de variação da subparcela (%).

Observa-se que as variáveis: densidade do solo depois do tráfego, grau de compactação depois do tráfego e recalque do solo, sofreram alterações estatisticamente significativas, conforme foram alterados os níveis de tráfego dentro de cada parcela experimental. Todavia, não se constatou efeito da pressão de inflagem dos pneus na compactação do solo, de acordo com as variáveis analisadas, nem efeito da interação dos cinco níveis de tráfego com as duas condições de inflagem dos pneus.

Conforme visualizado nas Tabelas 2 e 6 referentes a cada condição experimental, observa-se que somente o tráfego influenciou significativamente nas variáveis analisadas. Como o objetivo do experimento em condição laboratorial é verificar se a compactação induzida pelo simulador difere da compactação obtida em campo, pelo tráfego do trator, realizou-se uma análise conjunta das duas condições experimentais visando identificar diferenças (Tabela 7).

TABELA 7 - Resumo da análise de variância do agrupamento das condições experimentais (campo e laboratório) para as variáveis: densidade do solo depois do tráfego (DSdT), grau de compactação depois do tráfego (GCdT) e recalque do solo (R)

FV	GL ⁽¹⁾	Quadrado Médio		
		DSdT	GCdT	R ⁽²⁾
Bloco (Condição)	6	0,003855	15,803988	31,838950
Condição	1	0,000029	0,364942	7,783570
Pressão	1	0,008111 *	18,394052	87,260726
Condição x Pressão	1	0,002328	5,966935	120,092448
Resíduo (a)	6	0,000768	16,350717	20,899284
Tráfego	4 (3)	0,016266 *	85,648155 *	192,832834 *
Condição x Tráfego	4 (3)	0,000382	4,718618	66,418711
Pressão x Tráfego	4 (3)	0,000990	1,206996	9,428951
Condição x Pressão x Tráfego	4 (3)	0,000796	2,926294	13,887323
Resíduo (b)	48 (36)	0,001854	12,385987	23,637638
Total	79 (63)			
	CV 1 =	2,38	5,19	33,77
	CV 2 =	3,70	4,52	35,92
	Média =	1,16	77,90	13,54

⁽¹⁾ Valores de GL entre parênteses referem-se ao recalque do solo pelo fato de não existir testemunha.

⁽²⁾ Os valores de recalque oriundos do experimento de laboratório com simulador de tráfego foram corridos pelo fator escala (1:20) cuja descrição está pormenorizada no item 4.2.5.

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F.

CV1: Coeficiente de variação da parcela (%).

CV2: Coeficiente de variação da subparcela (%).

Nas Tabelas 2 e 6, a DSdT não foi influenciada pela pressão ao contrário do que pode ser visto na Tabela 7. Isso ocorre porque o agrupamento altera o valor da estatística do teste de F, diferindo do valor expresso quando se analisa os experimentos de forma isolada. Se o objetivo do agrupamento fosse obter uma única resposta, ou seja, uma conclusão generalista e que independesse da condição experimental, a pressão de inflagem do pneu teria exercido influência na compactação do solo expresso pela densidade do solo após o tráfego. Como o objetivo do agrupamento foi único e somente o de identificar se existe diferença entre as duas condições experimentais, a influencia da pressão na DSdT demonstrada na Tabela 7 não tem significado prático real.

O grau de compactação do solo e o recalque sofreram influencia significativa do tráfego (Tabelas 2, 6 e 7) e o comportamento dos níveis de tráfego é o mesmo nos dois experimentos. A discussão das variáveis obtidas no experimento de laboratório e as respectivas comparações de cada variável com as do experimento de campo será feita mais adiante.

4.2.1. Pressão de contato com o solo

O resultado do procedimento iterativo de aplicação de cargas sobre amostras teste e determinação dos valores de pressão média de contato, obtidos para as duas pressões de inflagem do pneu do simulador, podem ser visualizados na Figura 28.

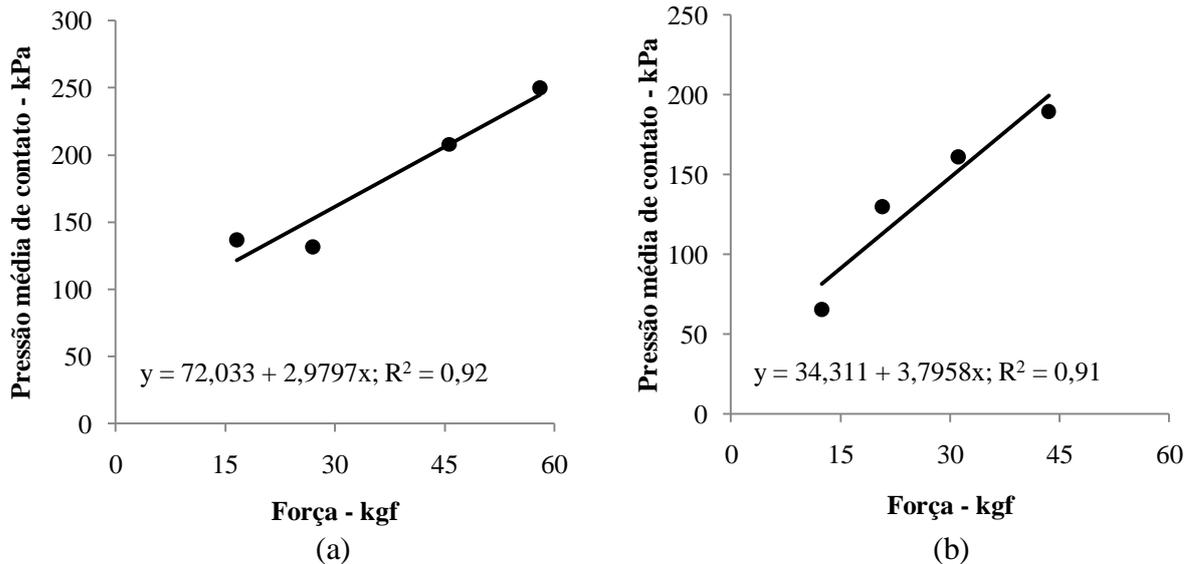


FIGURA 28. Carregamentos e pressão média de contato com o solo: a) pneu inflado com 96,5 kPa; e b) pneu inflado com 137,9 kPa.

Para obter valores de pressão de contato próximos aos obtidos em campo, 252 e 142 kPa, foi necessário que o sistema de aplicação de carga composto por macaco hidráulico e célula de carga aplicasse 60,0 e 28,5 kgf, respectivamente.

4.2.2. Distribuição de tensões no solo

Na Figura 29 tem-se representado os valores de tensões normais aplicados nas superfícies das amostras para as duas pressões de inflagem do pneu e conseqüentemente duas pressões/tensões de contato. As distribuições de tensões para o pneu do simulador seguem o mesmo comportamento apresentado para o pneu do trator, ou seja, com o aumento da profundidade e da distância do centro do pneu, as tensões normais reduzem em grandeza, proporcionando possivelmente menores deformações do solo em maiores profundidades, mas se estendem em áreas maiores. O que merece ser destacado entre as duas condições experimentais é profundidade crítica dos bulbos de tensões.

Para a tensão de 252,5 kPa as profundidades críticas são de 4,8 e 24 cm, respectivamente, para as tensões aplicadas pelo pneu do simulador e pelo pneu do trator. Para a tensão de 142,2 kPa as profundidades críticas são de 4,8 e 27 cm, respectivamente, para as tensões aplicadas pelo pneu do simulador e pelo pneu do trator.

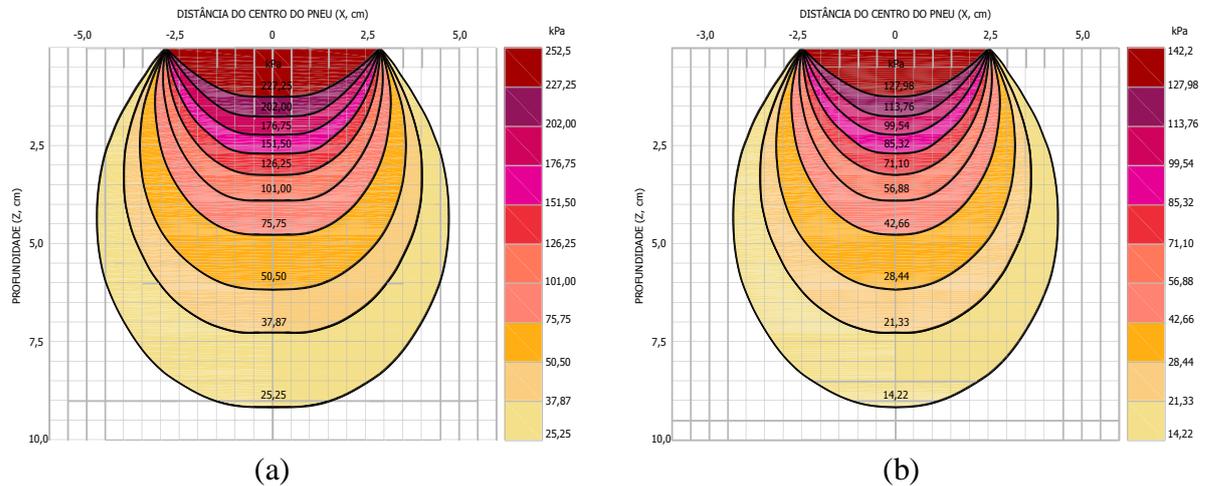


FIGURA 29. Bulbos de tensões obtidos para carregamentos exercidos pelo pneu do simulador na superfície do solo: a) 252,5 kPa e b) 142,2 kPa.

4.2.3. Densidade do solo depois do tráfego

Assim como no experimento de campo com trator agrícola, no experimento de laboratório o tráfego foi o único fator que influenciou na densidade do solo ($P < 0,05$), (Tabela 6). Os níveis de tráfego simulados em laboratório proporcionaram valores de densidade do solo semelhantes aos obtidos no campo (Figura 30 e Tabela 8).

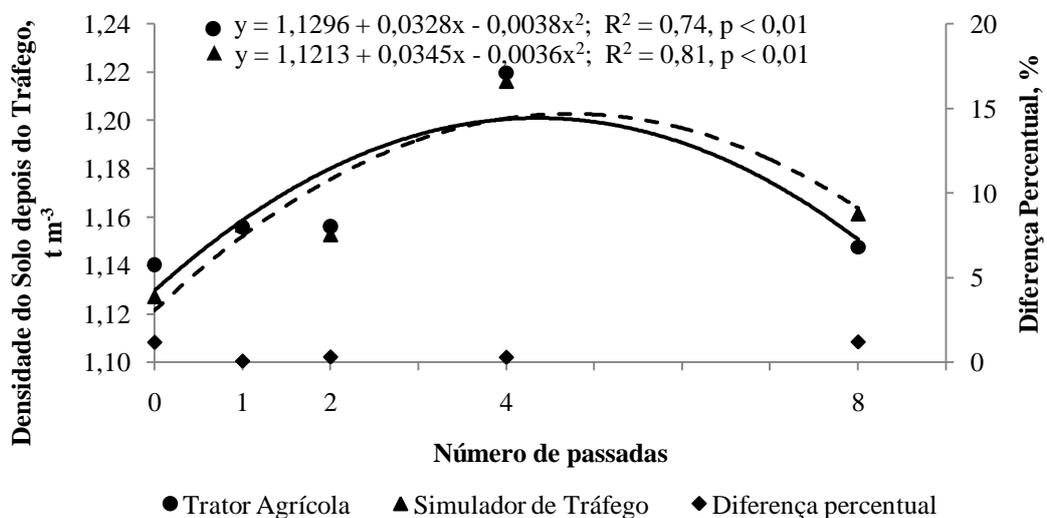


FIGURA 30. Densidade do solo após o tráfego em função do número de passadas, para as duas condições experimentais, e diferença percentual da densidade entre as duas condições experimentais, para cada nível de tráfego.

Ainda na mesma figura observa-se que a diferença percentual² entre os dois experimentos, para todos os níveis de tráfego aplicados, foi inferior a 2% indicando que o simulador é capaz de reproduzir com precisão de aproximadamente 98% a compactação induzida pelo trator em campo.

TABELA 8 - Valores médios de densidade do solo após aplicação dos níveis de tráfego para cada condição experimental

Intensidade de Tráfego (Passadas)	Condição Experimental	
	Campo (Trator Agrícola)	Laboratório (Simulador de Tráfego)
0	1,14 aA	1,13 aA
1	1,16 abA	1,16 aA
2	1,16 abA	1,15 aA
4	1,22 bA	1,22 bA
8	1,15 aA	1,16 abA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 5\%$). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de F do agrupamento de experimentos ($P > 5\%$).

O tráfego de quatro passadas foi o que mais alterou a densidade do solo em relação a testemunha, ausência de tráfego, corroborando com os dados obtidos no experimento de campo e com os de outros pesquisadores já citados, como: Silva et al. (2011) e Beutler et al. (2009).

4.2.4. Grau de compactação depois do tráfego

Na Tabela 6, verifica-se que houve efeito significativo do tráfego no grau de compactação, mas a pressão do pneu e a interação entre pressão e nível de tráfego não influenciaram de forma significativa no comportamento dessa variável.

Os valores do grau de compactação após aplicação das energias de compactação provenientes dos diferentes níveis de tráfego, para as duas condições experimentais, apresentaram comportamento quadrático evidenciado pelas análises de regressão (Figura 31).

² A diferença percentual (%) foi calculada como a diferença absoluta entre as duas condições (Simulador de Tráfego e Trator Agrícola) dividida pela referência, no caso os valores obtidos no experimento com Trator Agrícola em campo.

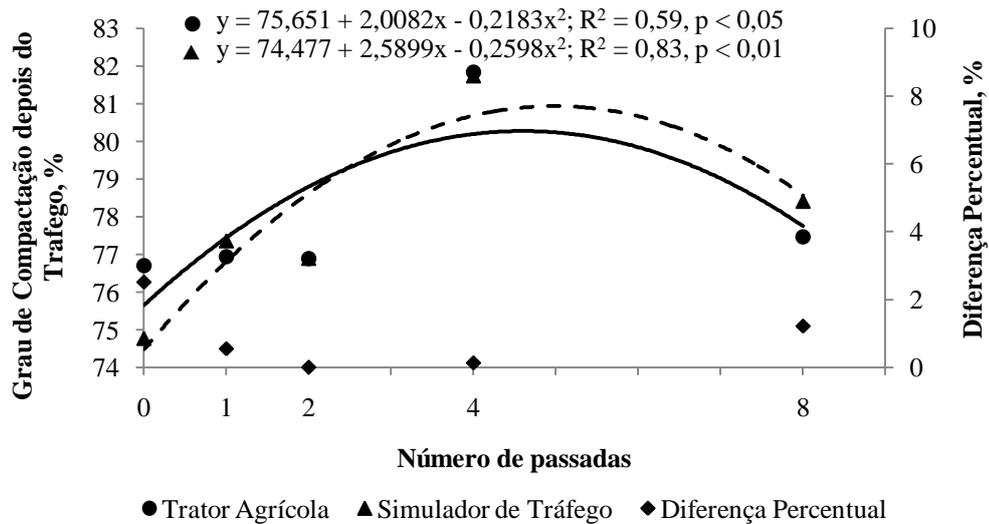


FIGURA 31. Grau de compactação do solo após o tráfego em função do número de passadas, para as duas condições experimentais, e diferença percentual do grau de compactação entre as duas condições experimentais, para cada nível de tráfego.

Pelo fato dos valores de densidade de referência serem os mesmos para ambas as condições experimentais e as densidades do solo após o tráfego foram próximas para os dois experimentos, os graus de compactação apresentaram valores semelhantes (Tabela 9).

TABELA 9 - Valores médios do grau de compactação do solo após aplicação dos níveis de tráfego para cada condição experimental

Intensidade de Tráfego (Passadas)	Condição Experimental	
	Campo (Trator Agrícola)	Laboratório (Simulador de Tráfego)
0	76,70 aA	74,76 aA
1	76,94 aA	77,36 abA
2	76,89 aA	76,89 aA
4	81,84 bA	81,74 bA
8	77,46 abA	78,40 abA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 10\%$). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de F do agrupamento de experimentos ($P > 5\%$).

Ainda na Tabela 9 é possível observar que o grau de compactação oriundo do tráfego de quatro passadas, nos dois experimentos, diferiu dos tráfegos de zero e duas passadas, mas não de oito. Assim como no experimento de campo o grau de compactação oriundo de quatro passadas foi superior a 80%. Freddi (2007) constatou que o grau de compactação a partir do qual ocorrem limitações severas ao desenvolvimento do milho, para Latossolo Vermelho de textura média e argilosa foi de 78 e 80 %, respectivamente.

4.2.5. Recalque do solo

Na Figura 32 tem-se o comportamento do recalque do solo em função da intensidade de tráfego para cada pressão de inflagem do pneu do simulador.

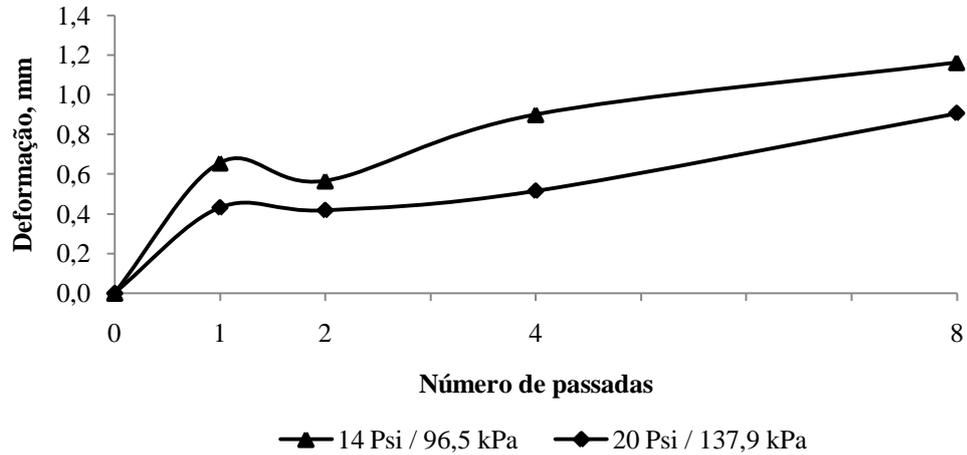


FIGURA 32. Recalque do solo em função das intensidades de tráfego e das pressões de inflagem do pneu. Sem correção de escala.

Assim como no experimento de campo com trator agrícola o tráfego foi o único fator que influenciou no recalque sofrido pelo solo ($P < 0,05$), (Tabela 6). As análises de regressão para o recalque do solo, nas duas condições experimentais, em função da intensidade de tráfego são mostradas na Figura 33.

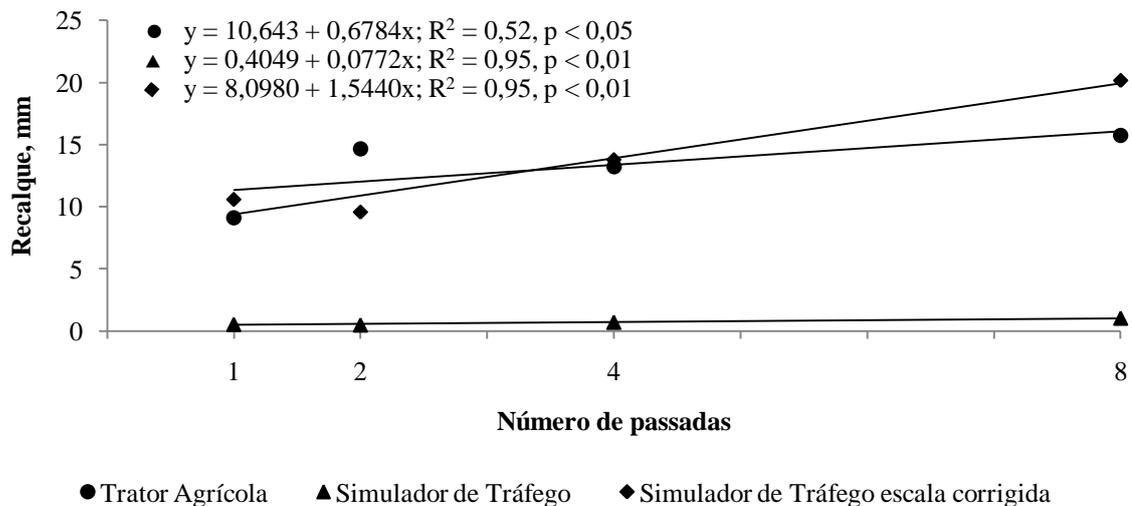


FIGURA 33. Recalque do solo em função do número de passadas para as duas condições experimentais.

Nessa figura também é possível verificar que os recalques do solo oriundos do tráfego do simulador tiveram de ser corrigidos devido ao efeito escala. O fator de correção ou fator de escala levou em consideração o somatório das áreas de contato de cada pneu e foi obtido dividindo-se a área de contato total do pneu do simulador pela área de contato total do pneu do trator, obtendo-se uma escala de 1:20, ou seja, a área total de contato do pneu do simulador é vinte vezes menor que a do trator³.

O teste de comparação de médias demonstrou que o recalque do solo oriundo do tráfego de oito passadas difere do recalque de uma passada, mas é similar ao de quatro passadas (Tabela 10).

TABELA 10 - Média dos recalques do solo para os experimentos com trator agrícola e simulador de tráfego e erros relativos experimentais

Tráfego (Passadas)	Condição Experimental		Diferença Percentual (%)
	Trator Agrícola	Simulador escala corrigida	
1	9,11 aA	10,60 aA	16,33
2	14,66 abA	9,58 aA	34,65
4	13,23 abA	13,80 abA	4,30
8	15,74 bA	20,17 bA	28,11
Média	13,1869A	13,53726A	2,66

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 5\%$). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de F do agrupamento de experimentos ($P > 5\%$).

Com relação as diferenças percentuais estas foram superiores as obtidas para a densidade do solo e para o grau de compactação. Uma explicação é que os recalques são medidas pontuais coletadas no sentido linear e a densidade e o grau de compactação são mensurados ao longo de uma área, ou seja, o recalque é uma variável passível de sofrer maiores erros durante sua medição, fato que pode ser notado pelos altos valores de coeficiente de variação (Tabela 6).

Nas Figuras 34 e 35 têm-se os perfis do solo, antes e após os níveis de tráfego, para as duas condições de inflagem do pneu do simulador. Cada curva representa a média de quatro observações. O recalque é dado pela diferença entre as duas curvas.

³ Como foi visto na Figura 13 as áreas de contato do pneu do simulador foram praticamente constantes, independente da pressão de inflagem do pneu, e em torno de $2,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Somente as garras tocaram efetivamente o solo e a pressão média de contato era condicionada a carga vertical. No campo a situação em que somente as garras tocavam a superfície do solo foi na pressão de 96,5 kPa (Figura 9a). Para essa condição foi obtido o valor médio de $44,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ (Tabela 3).

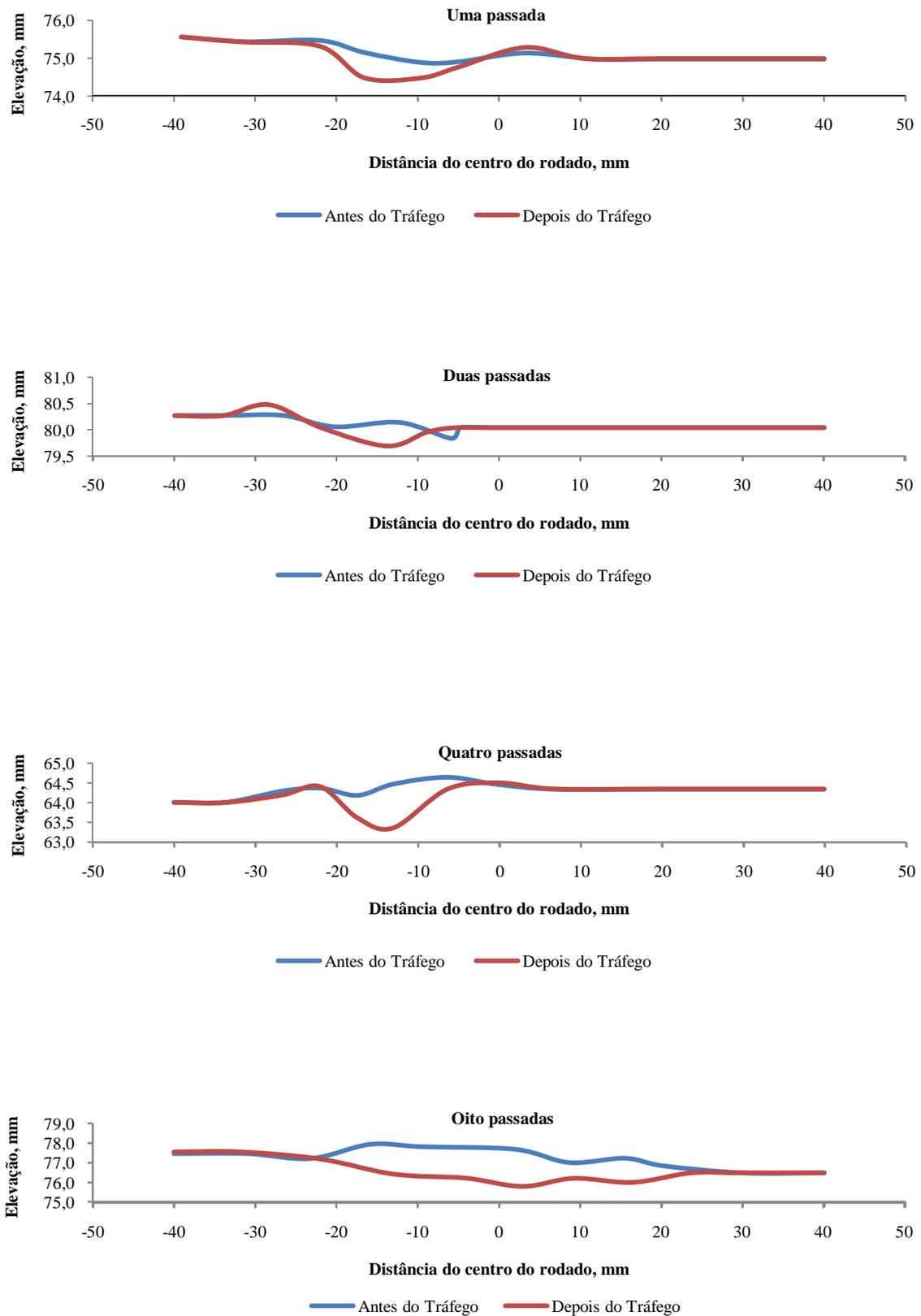


FIGURA 34. Perfis do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal do simulador com 96,5 kPa de pressão de inflagem, antes e após os tráfegos de uma, duas, quatro e oito passadas.

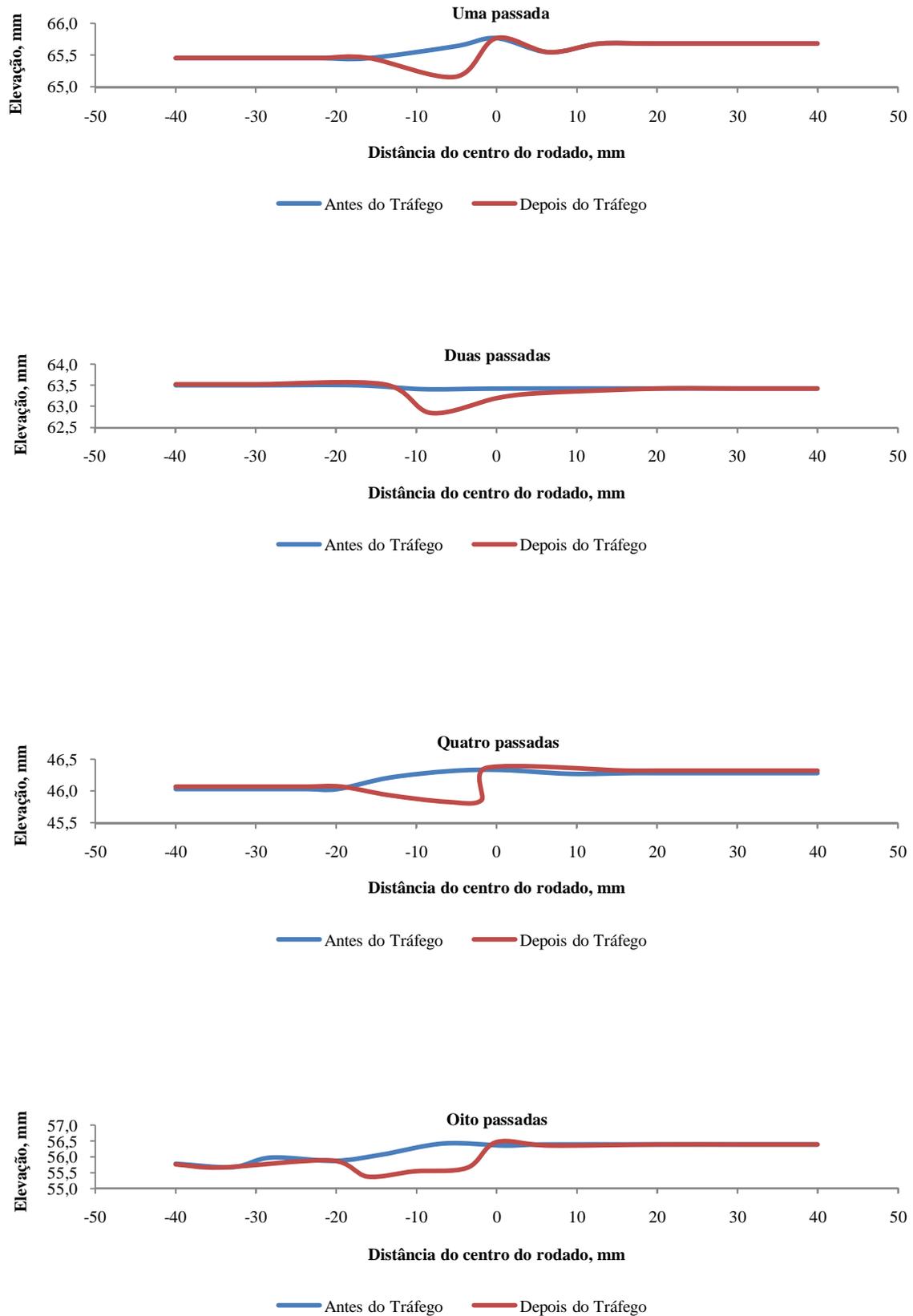


FIGURA 35. Perfis do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal do simulador com 137,9 kPa de pressão de inflagem, antes e após os tráfegos de uma, duas, quatro e oito passadas.

Conforme visto na Tabela 10 os recalques médios oriundos do experimento de campo não diferiram estatisticamente dos encontrados em laboratório. Entretanto, quando se compara os perfis do solo entre as duas condições experimentais, para cada combinação de pressão e tráfego, notam-se diferenças (Figuras 26 e 27; e Figuras 34 e 35). Uma primeira constatação é que no campo os perfis foram obtidos sobre uma condição de solo natural e no laboratório, como foram utilizadas amostras indeformadas, os blocos foram submetidos a uma leve regularização superficial devido a primeira camada de parafina ter aderido em todas as dimensões do bloco. Esse procedimento não prejudicou os propósitos do trabalho porque o interesse era medir o recalque e essa variável depende somente da diferença entre os perfis antes e após o tráfego. Outro fator que merece ser ressaltado é em relação a conformação do rastros de cada pneu utilizado (Figura 36).

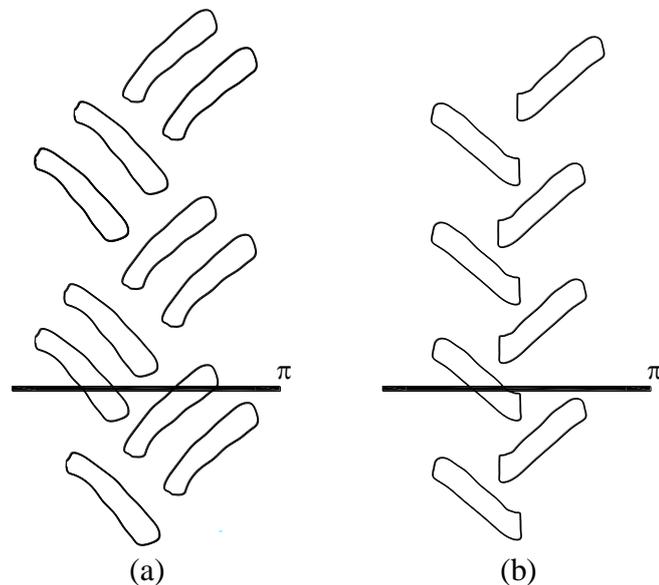


FIGURA 36. Impressão em superfície rígida das marcas das garras dos pneus utilizados: a) pneu do trator agrícola (16,9-30); e b) pneu do simulador de tráfego (4,80-8).

Para o pneu do trator (16,9-30) se escolhermos um plano π qualquer e esse for perpendicular ao plano que contém o rastro do pneu é bem provável que este plano “corte” no mínimo duas garras do pneu. Seguindo o mesmo raciocínio mas, aplicado ao pneu do simulador (4,80-8), qualquer plano π escolhido de forma arbitrária “corta” a impressão das garras em no máximo duas regiões, porém com a maior probabilidade de tocar apenas uma garra do pneu. Dessa forma na maioria dos perfis oriundos do experimento com trator agrícola tem-se mais de uma região de contato da garra com a superfície do solo ao contrário do que acontece com os perfis obtidos para as amostras ensaiadas em laboratório.

5. CONCLUSÕES

As pressões de inflagem do pneu e a interação entre pressões e níveis de tráfego adotados nesse estudo não afetaram de forma significativa na compactação do solo e no recalque superficial, para as duas condições experimentais.

A intensidade de tráfego foi o único fator que influenciou nas variáveis analisadas.

O tráfego de quatro passadas foi o que proporcionou maiores valores de densidade do solo e grau de compactação.

O maior recalque superficial do solo ocorre na primeira passada do pneu e após quatro passadas há tendência de estabilização dos recalques.

O resultado do presente estudo mostra a viabilidade técnica do uso do simulador de tráfego para reproduzir ou prever mudanças no estado de compactação do solo.

A metodologia proposta e validada mostra-se interessante para emprego em laboratórios de solo visando atender interesses de produtores rurais e agroindústrias, principalmente nas atividades agrícolas que demandam altas intensidades de tráfego.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, K.M.; ERBACH, D.C. Relationship of tire sinkage depth to depth of soil compaction. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.38, n.4, p.1011-1016, 1995.
- AL-ADAWI, S.S.; REEDER, R.C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.39, n.5, p.1641-49, 1996.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE S296.4 DEC95**: Uniform terminology for traction of agricultural tractors, self-propelled implements, and other traction and transport devices. St. Joseph: 1999. p.119-121.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 10p.
- 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, 1986. 9p.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF-P-98-250-2**: essais relatifs aux chaussées – préparation des mélanges hydrocarbonés – partie 2: compactage des plaques. France, 1991. 10p.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF-P-98-253-1**: essais relatifs aux chaussées – déformation permanente des mélanges hydrocarbonés – partie 1: essai d'orniérage. France, 1991. 11p.
- BALASTREIRE, L.A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987.310p.
- BARAS, L.C.S. **Estudo da fluência em geotêxteis através de ensaios não confinados convencionais e acelerados**. 2001. 112p. (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BARATA, F.E. **Propriedades mecânicas dos solos**: uma introdução ao projeto de fundações. Rio de Janeiro: LTC, 1984. 152p.
- BARBOSA, J.A. **Efeito do tráfego de rodados pneumáticos em propriedades mecânicas de um argissolo vermelho- amarelo**. 2002. 119p. (Doutorado em Engenharia Agrícola – Máquinas Agrícolas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- BARGER, E.L.; LILJEDAHL, J.B.; CARLETON, W.M.; McKIBBEN, E.G. **Tratores e seus motores**. São Paulo: Edgar Blucher, 1963. 398p.

BARROS, S.T. Deflection factor charts for two and three layer elastic system. **Highway Research Record**, Washington, v.145, p.83-108, 1966.

BECHER, H.H. Ist der Konzentrationsfaktor k eines aggregierten Bodens als steuernde Grösse der mechanischen Druckverteilung in Böden eine Konstante. **Journal Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v.167, n.1, p.525-531, 2004.

BEKKER, M.G. **Off-the-road locomotion, research and development in terramechanics**. Ann Arbor: University of Michigan, 1960.220p.

BELTRAME, L.F.S.; TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.33, p.59-62, 1980.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J. M.; REIS, E. F.; DILLY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.1, p.91-95, 2000.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois Latossolos. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.2, p.181-92, 2004.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produção de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.6, p.843-849, 2005.

BEUTLER, A.N.; FREDDI, O.S.; LEONE, C.L.; CENTURIO, J.F. Densidade do solo relativa e parâmetro “S” como indicadores da qualidade física para culturas anuais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v.8, n.2, p.27-36, 2008.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; MENGATTO, L.H.; ALVES, J.B.; WAGNER, G.P.C. Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n.2, p.359-364, 2009.

BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L.R.; SCHLEGEL, A.J.; LYON, D.J.; VIGIL, M.F.; MIKHA, M.M.; STAHLMAN, P.W.; RICE, C.W. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.73, p.1871-1879, 2009.

BOTTA, G.F. Compactación en suelos labrados de baja capacidad portante. In: JORAJORUÍA COLLAZO, D. (ed.). **Reología del suelo agrícola bajo tráfico: modificaciones físico-mecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida al tráfico agrario**. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2005. p.73-84.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008. 990p.

BRAUNACK, M.V.; ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research, Amsterdam**, v.89, n.1, p.103-121, 2006.

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

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: USP/EESC, 1998. 131p.

BURGER, N.; LEBERT, M.; HORN, R. Prediction of the compressibility of arable land. **Catena**, Reiskirchen, v.11, n.1, p.141-151, 1988.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. Causas da compactação do solo. **Infobibos**, 9 maio 2006. Disponível em: <<http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C3/Comp3.htm>>. Acesso em: 15 abr. 2012.

CARRIER, D.; TESSIER, S.; CHI, L.; McLAUGHLIN, N.B. **Soil Ground pressure distribution device**. Saskatoon: CSAE, 1995. p.1-9. (CSAE Paper, n. 95-401).

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.70, n.1, p.425-33, 1990.

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.

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

COLETI, J.T.; DEMATTÊ, J.L.I. Compactação artificial em solos experiência e dados informativos. **Álcool e Açúcar**, São Paulo, v.2, n.6, p.34-39, 1982.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.933-942, 2008.

COSTA, M. J.; ROSA JÚNIOR, E. J.; ROSA, Y.B.C.J.; SOUZA, L.C.F.; ROSA, C.B.J. Atributos químicos e físicos de um latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.29, n.5, p.701-708, 2007.

COSTANZI, M.A. **Emprego do método sim para obtenção das curvas isócronas e de ruptura por fluência**. 2003. 82p. (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

COSTANZI, M.A.; BUENO, B.S.B.; BARAS, L.C.S.; ZORNBERG, J.G. Avaliação da fluência de geotêxteis não tecidos com ensaios acelerados. **Solos e Rochas**, São Paulo, v.26, n.3, p.217-228, 2003.

CRUZ, P.T.; SAES, J.L. **Mecânica dos solos**. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1989. 192p.

CUNHA, J.P.A.R.; VIEIRA, L.B.; MAGALHÃES, A.C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, n.1, p.1-7, 2002.

DAM, R.F.; MEHDI, B.B.; BURGESS, M.S.E.; MADRAMOOTOO, C.A.; MEHUYS, G.R.; CALLUM, I.R. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.84, n.1, p.41-53, 2005.

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.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212p.

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

FERNÁNDEZ, B.; GALLOWAY, H.M. Efeito das rodas do trator em propriedades físicas de dois solos. **Revista Ceres**, Viçosa, v.34, n.196, p.562-568, 1987.

FERREIRA, D.F. **Sisvar - Sistema de análise de variância**. Versão 5.3. Lavras: UFLA, 2007.

FERREIRA, M.F.; NEUJAHN, 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.

FREDDI, O.S. **Avaliação do intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho cultivado com milho**. 2007. 105p. (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics of unsaturated soils**. New York: Wiley & Sons. 1993, 517p.

FROEHLICH, H.A.; McNABB, D.H. Minimizing soil compaction in pacific northwest forests. In: STONE, E.L. (Ed.) **Proceedings of the sixth north american forest soils conference on forest soils and treatment impacts**. Knoxville: University of Tennessee, 1983. p.159-192.

FRÖHLICH, O. K. **Druckausbreitung im Baugrund**. Wien: Springer Verlag, 1934.

GILL, W.R.; VANDEN BERG, G.E. **Soil dynamics in tillage and traction**. Washington: USDA, 1968. 511p.

HAKANSSON, I. A model for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, n.1-2, p.105-120, 1990.

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**, Amsterdam, v.53, n.2, p.71-85, 2000.

HAKANSSON, I.; MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.35, n.1/2, p.85-97, 1995.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n.2, p.121-145, 2005.

HARRIS, H.D.; BAKKER, D.M. A soil stress transducer for measuring in situ soil stresses. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.29, n.1, p.35-48, 1994.

HARTGE, K.H.; HORN, R. **Einführung in die Bodenphysik**. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1999. 304p.

HAVEREN, B.B. van. Soil Bulk density as influenced by grazing intensity and soil type on a shortgrass prairie site. **Journal of Range Management**, Denver, v.36, n.5, p.586-588, 1983.

HORN, R.; BAUMGARTL, T.; KÜHNER, S.; LEBERT, M.; KAYSER, R. Zur Bedeutung des Aggregierungsgrades für die Spannungsverteilung in strukturierten Böden. **Journal Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v.154, n.1, p.21-26, 1991.

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

JAKOBSEN, B.F.; GREACEN, E.L. Compaction of sandy forest soils by forwarder operations. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.5, n.1, p.55-70, 1985.

JORAJURÍA, D.; DRAGHI, L. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.66, n.4, p.261-265, 1997.

KÉZDI, A. **Handbuch der Bodenmechanik Band 1**. Budapest: Akademiai Kiadó. 1969, 259p.

KLEIN, V.A. Densidade relativa: um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciência Agroveterinária**, Lages, v.5, n.1, p.26-32, 2006.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo: EDIUPF, 2008. 212p.

KLEIN, V.A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.3, p.395-398, 1995.

KNOB, M. J. **Estudo de trafegabilidade aplicado a veículos de roda em transporte e tração**. 2010. 153p. (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

KOGER, J.L.; BURT, E.C.; TROUSE, A.C. Multiple pass effects of skidder tires on soil compaction in soil bins. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.28, n.1, p.11-16, 1985.

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

LANÇAS, K.P.; SANTOS FILHO, A.G.; UPADHYAYA, S.K. **Implications of using low/correct inflation pressure for radial ply tractor tires**. St. Joseph: ASAE, 1995. Paper n.95-056

LANÇAS, K.P. **Desempenho operacional de pneus radiais em função da pressão de inflação, da lastragem e do deslizamento das rodas de tratores agrícolas**. 1996, 170p. Tese (Livre Docência na disciplina de Mecânica Aplicada do Departamento de Engenharia Rural) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1996.

LEE, D.R.; KIM, K.U. Effect of inflation pressure on tractive performance of bias-ply tires. **Journal of Terramechanics**, Great Britain, v.34, n.3, p.187-208, 1997.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v.1, n.1, p.277-294, 1985.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005. 335p.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, n.1, p.107-136, 2003.

LIMA, C.L.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.6, p.1765-1772, 2006.

LOGSDON, S.D.; KARLEN, D.L. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.78, n.2, p.143-149, 2004.

LOVE, A.E.H. The stress produced in a semi-infinite solid by pressure on part of the boundary. **Philosophical Transaction of the Royal Society Serie A**, Londres, v.228, p.377-420, 1929.

LYNE, P.W.; BURT, E.C.; MEIRING, P. Effect of tire and engine parameters on efficiency. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.27, n.1, p.5-7, 1984.

MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.13, n.147, p.52-55, 1987.

MÁRQUEZ, L. **Solo tractor'90**. Madrid: Laboreo, 1990. 231p.

MARTINS, M.V.; PASSOS, E.; CARVALHO, M.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.31, n.1, p.147-154, 2009.

MAZETTO, F.R. **Avaliação das metodologias de determinação das áreas de contato e deformações elásticas de pneus agrícolas em função das pressões de inflação e cargas**

radiais. 2004. 100p. (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

MAZIERO, J.V.G. **Compactação do solo por patinagem da roda motriz de um trator agrícola**. 1993. 105p. (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.

McDONALD, T.P.; STOKES, B.J.; AUST, W.M. Soil physical property changes after skidder traffic with varying widths. **Journal of Forest Engineering**, v.6, n.2, p.41-50, 1995.

McLEOD, H.E.; REED, I.F.; JOHNSON, W.H.; GILL, W.R. Draft, power efficiency, and soil-compaction characteristics of single, dual and low-pressure tires. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.9, n.1, p.41-44, 1966.

MIALHE, L.G. **Máquinas Motoras na Agricultura**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1980. v.2, p.140-221.

MIALHE, L.G. O estado da arte e perspectivas da utilização de rodados pneumáticos de baixa pressão na área agrícola. In: ENCONTRO SOBRE PNEUS DE ALTA FLUTUAÇÃO E BAIXA PRESSÃO NAS ÁREAS AGRÍCOLA E FLORESTAL, 1993, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 1993. p.1-17.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma terra roxa estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.16, n.2, p.31-41, 1996.

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.

NICHOLS, T.A.; BAILEY, A.C.; JOHNSON, C.E.; GRISSO, R.D. A stress state transducer for soil. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.30, n.5, p.1237-1241, 1987.

OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. **Compactação do solo devido ao tráfego de carretas florestais com dois tipos de pneus inflados a duas pressões diferentes**. 1998. 68p. (Mestrado em Agronomia / Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

PEREIRA, J.O.; SIQUEIRA, J.A.C.; URIBE-OPAZO, M.A.; SILVA, S.L. Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.171-174, 2002.

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.

PLACKETT, C.W. The ground pressure of some agricultural tyres at low load and with zero sinkage. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.29, n.2, p.159-166, 1984. INNS, F.M.; KILGOUR, J. **Agricultural Tyres**. London: Dunlop Limited, 1978. 70p.

PRADO, R.M.; CENTURION, J.F. Alterações na cor e no grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.1, p.197-203, 2001.

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

RAGHAVAN, G.S.V.; McKYES, E.; CHASSÉ, M.; MÉRINEAU, F. Development of compaction patterns due to machinery operation in an orchard soil. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v.56, n.3, p.505-509, 1976.

RAPER, R.L.; BAILEY, A.C.; BURT, E.C.; WAY, T.R.; LIBERATI, P. Inflation Pressure and dynamic load effects on soil deformation and soil-tire interface stresses. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.38, n.3, p.685-689, 1995.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v.27, n.1, p.29-48, 2003.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.5, p.49-134.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; FOX, C.A.; TAN, C.S.; ZHANG, T.Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.96, n.1-2, p.316-330, 2007.

RICHART, A.; FILHO, J.T.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.26, n. 3, p.321-344, 2005.

RUTHERFORD, I; McALLISTER, M. **Tires and traction**. Silsoe: NIAE, 1983. 12p.

SANTOS, G.A.; DIAS JÚNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; FURTINI NETO, A.E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivado em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.29, n.4, p.740-750, 2005.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery — Soil physical and mechanical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.93, n.1, p.28-43, 2007.

SEIXAS, F. **Pneus**: Qual a adequada pressão de insuflagem? Piracicaba: IPEF, 1997. 4p. (IPEF. Circular Técnica, 185).

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**, Amsterdam, v.84, n.1, p.87-100, 2005.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.44, n.1, p.81-93, 1997.

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.; DIAS JÚNIOR, M.S.; PALHA LEITE, F.P. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um Forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.3, p.547-554, 2011.

SILVA, R.B.; DIAS JÚNIOR, M.S.; SILVA, F.A.M.; FOLE, S.M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.27, n.6, p.973-983, 2003.

SILVA, S.G.C. **Variação temporal da densidade do solo e do grau de compactação de um Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado**. 2011. 65p. (Mestrado em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SOARES, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I - Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.1, p.1-8, 2002.

SMITH, R.; ELLIES, A.; HORN, R. Modified Boussinesq's equations for nonuniform tire loading. **Journal of Terramechanics**, Great Britain, v.37, p.207-222, 2000.

SOANE, B.D. Studies on some soil physical properties in relation to cultivations and traffic. In: SOMANI, L.L. (Ed.) **Soil physical conditions and crop growth**. London: MAFF, 1975. p.160-183.

SOANE, B.D.; DICKSON, J.W.; BLACKWELL, P.S. Some options for reducing compaction under wheels on loose soil. In: Conference International Soil Tillage Research Organization, ISTRO, 8th, 1979, Stuttgart. **Anais...** Stuttgart: University of Hohenheim, 1979. v.2, p.347-352.

SOANE, B.D.; DICKSON, J.W.; CAMPBELL, D.J. Compaction by agriculture vehicles: A review. III - Incidence and control of compaction in crop production. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.2, n.1, p.3-36, 1982.

SOANE, B.D.; OUWERKERK, C.VAN. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE B.D.; OUWERKERK, C.VAN. (Ed.) **Soil compaction in crop production**. Netherlands: Elsevier, 1994. p.1-21.

SOEHNE, W. Fundamental of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. **Agricultural Engineering**, Michigan, v.39, n.5, p.276-281, 1958.

SÖHNE, W. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. **Landtechnik**, Grundl, v.5, n.3, p.49-63, 1953.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.755-760, 2004.

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 149p. (Mestrado em Ciência do Solo – Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.8, p.1159-1167, 2007.

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.

THIMÓTEO, C.M.S.; BENINNI, E.R.Y.; MURATA, I.N.; TAVARES FILHO, J. Alterações da porosidade e da densidade de um latossolo vermelho distrófico em dois sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.23, n.5, p.1299-1303, 2001.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.2, p.333-339, 1996.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.2, p.301-309, 1998.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GOLÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58p. (Circular Técnica, 23)

TREIN, C.R.; LEVIEN, R.; SOUZA, L.F.C. Tráfego controlado. **Revista Cultivar Máquinas**, Pelotas, v.3, n.41, p.22-25, 2005.

TROUSE JÚNIOR, A.C. Root tolerance to soil impediments. In: YOUNG, G. (Ed.) **Crop tolerance to subtropical land conditions**. Madison: American Society Agronomical Special Symposium, 1978. v.32, p.193-232.

TULLBERG, J.N. Tractor-based systems for traffic control in Australia. **Landwards**, Cranfield , v.52, p.12-15, 1997.

TURNER, R.; SCHMIDT, K.; FORNIER, M.; LEPAGE, K. **Development of a Simple System for Measuring Peak Soil Stresses**. St. Joseph: ASAE, 2001. (ASAE Paper, n. 01AETC03).

UPADHYAYA, S.K.; WULFSOHN, D. **Review of traction prediction equations**. St. Joseph: ASAE, 1990. (Paper n. 90-1573).

VANDEN BERG, G.E.; COOPER, A.W.; ERICKSON, A.E.; CARLTON, W.M. Soil pressure distribution under tractor and implement traffic. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.38, p.854-855, 1957.

VANDEN BERG, G.E.; GILL, W.R. Pressure distribution between a smooth tire and the soil. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.5, n.2, p.105-107, 1962.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.

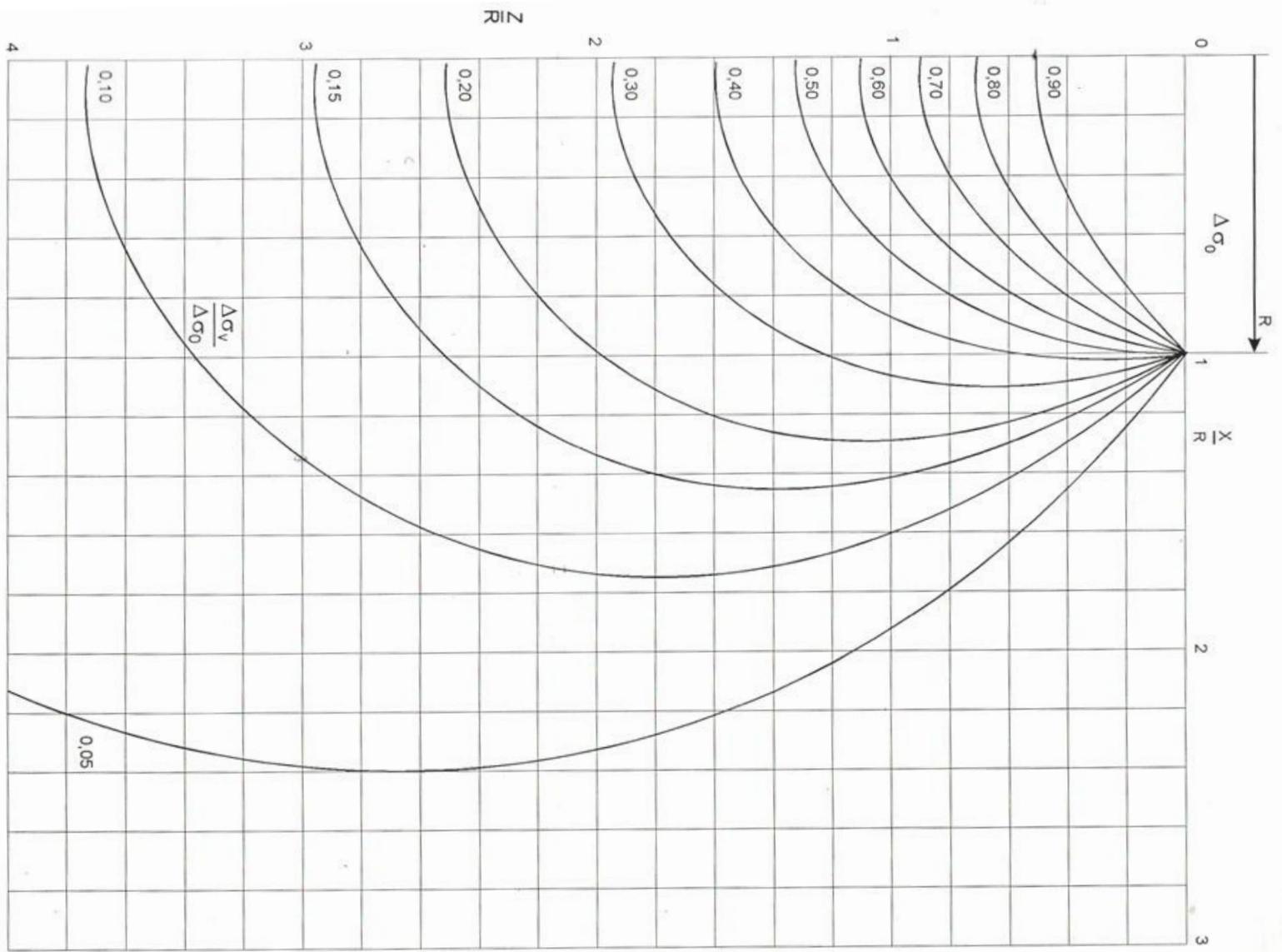
VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.92, n.1-2, p.104-113, 2007.

WASTERLUND, I. Environmentally soft machines. **Small Scale Forestry**, v.1, p.13-15, 1994.

WIERMANN, C.; WAY, T.R.; HORN, R.; BAILEY, A.C.; BURT, E.C. **Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam**. Soil and Tillage Research, Amsterdam, v.50, n.2, p.127-135, 1999.

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.

ANEXO A



Tensões verticais induzidas por carga uniformemente distribuída em área circular

