



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

COMPACTAÇÃO DO SOLO GERADA POR PNEUS DE ALTA FLUTUAÇÃO DE EIXO LIVRE E TRATIVO

LUÍS ALFREDO PIRES BARBOSA

CAMPINAS

MAIO DE 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**COMPACTAÇÃO DO SOLO GERADA POR PNEUS DE ALTA
FLUTUAÇÃO DE EIXO LIVRE E TRATIVO**

Dissertação de Mestrado submetida à
banca examinadora para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Agrícola, na área
de concentração em Máquinas Agrícolas.

LUÍS ALFREDO PIRES BARBOSA
Orientador: Prof. Dr. Paulo S. G. Magalhães

CAMPINAS

MAIO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B234c	<p>Barbosa, Luís Alfredo Pires Compactação do solo gerada por pneus de alta flutuação de eixo livre e trativo / Luís Alfredo Pires Barbosa. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.</p> <p>Orientador: Paulo Sérgio Graziano Magalhães. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.</p> <p>1. Solos - Deformação. I. Magalhães, Paulo Sérgio Graziano. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.</p>
-------	---

Título em Inglês: Soil compaction generated by high flotation tires of free and tractive axle

Palavras-chave em Inglês: Soils - Strain

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Kléber Pereira Lanças, Oscar Antonio Braunbeck

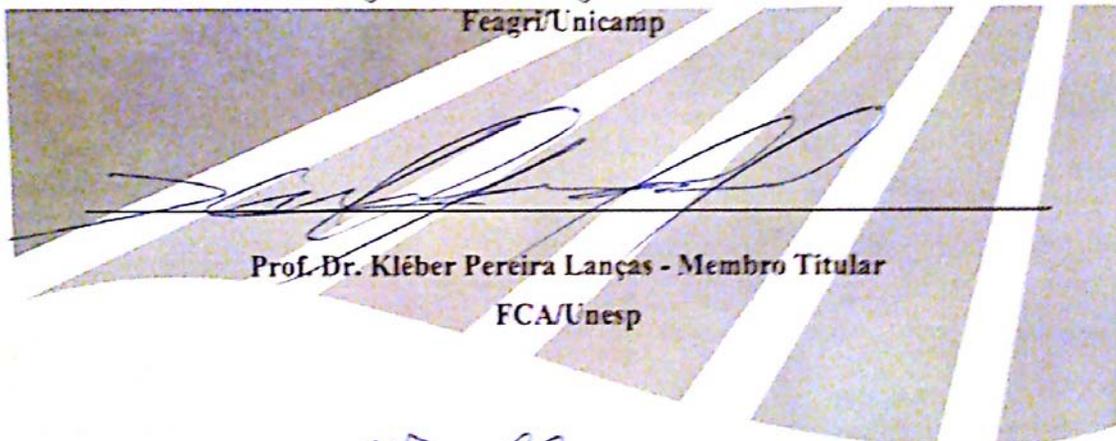
Data da defesa: 18-05-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Luis Alfredo Pires Barbosa**, aprovado pela Comissão Julgadora em 18 de maio de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças - Membro Titular
FCA/Unesp

Faculdade de Engenharia Agrícola
Unicamp

Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck – Membro Titular
CIBE

DEDICATÓRIA

*Agradeço a Deus pela força
que me faz buscar desafios.*

*Trabalho dedicado a toda minha família,
especialmente aos meus pais, Maria e José Luiz,
pelos valores e caráter de fundamental
importância em minha formação.*

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Engenharia Agrícola, em especial ao Laboratório de Máquinas Agrícolas, que auxiliaram no desenvolvimento de todo o trabalho.

Ao Professor Paulo S. Graziano Magalhães, pela oportunidade e pelos ensinamentos técnico e pessoal, admirável não somente como profissional, mas como amigo.

À Pirelli Pneus, que desde a idealização do trabalho até a execução sempre se mostrou presente, em especial ao amigo Argemiro Costa, pelo entusiasmo e incentivo à pesquisa.

Aos amigos do Laboratório de Projetos de Máquinas, Thiago, Henrique, Francelino, Chico, Luis e José, que sempre ajudaram na execução de todo o trabalho.

À Agricef, por ceder alguns equipamentos mecânicos, essenciais à realização dos ensaios dos pneus em caixa de solo.

À secretaria de Graduação e de Pós Graduação pela competência no trabalho e por toda assistência prestada.

Aos Professores da faculdade por toda a experiência e empenho em agregar conhecimento ao trabalho, com críticas e sugestões.

À toda equipe do Laboratório de Solos, em especial ao Professor Zigomar e ao Júnior, que acompanharam toda a coleta de amostras e todas as análises realizadas.

Aos meus amigos que estão presentes em todos os momentos da minha vida, Ricardo, Bruno, Reynaldo e minha namorada Mayara.

Agradeço à todos que de certa forma em algum momento agregou conhecimento e incentivou ao desenvolvimento da pesquisa.

EPÍGRAFE

“Felicidade é quando o que você pensa,
o que você diz e o que você faz
estão em harmonia”

M. Gandhi

RESUMO

O aumento da mecanização das lavouras gera o emprego de máquinas cada vez mais potentes e, a potência possui relação direta com o peso. Aumentando-se o tráfego de máquinas pesadas sobre o solo o emprego do pneu correto é de suma importância para se minimizar os efeitos da compactação. Com as diferenças entre os modelos de pneus de alta flutuação para eixos livres e trativos (com garras) e o comum emprego de pneus trativos em eixos livres devido ao seu custo de imposto ser reduzido, questionou-se a possibilidade de o emprego do pneu mais barato estar prejudicando a produtividade, pelo fato de apresentar uma área de contato possivelmente menor. Objetivou-se ao estudo comparativo entre dois modelos de pneus de alta flutuação da mesma medida, porém um para eixos livres e outro para eixos trativos. Os experimentos foram conduzidos em caixa de solos e também em superfície rígida, sob condições controladas, realizando-se ensaios estáticos para duas cargas radiais (16 e 29 kN), medindo-se deformações, áreas de contato e compactação do solo, sendo feita uma análise estatística fatorial, com os fatores pneu e carga, sendo realizados 8 ensaios, totalizando 32 observações. Obteve-se como resultados, deformações maiores para o pneu trativo, bem como área de contato maior e compactações menores, que o pneu de eixo livre, isso porque a área de contato do pneu trativo envolve não somente as garras, mas também o fundo íncavo (região entre garras), para o solo estudado, e o fato do pneu possuir uma quantidade de composto de borracha menor em sua banda de rodagem, quando comparado com o pneu de eixo livre, aumenta a flexibilidade da rodagem, melhorando sua capacidade de deformação e conseqüentemente aumentando sua área de contato com o solo.

Palavras chave:

Alta flutuação; compactação do solo; área de contato; caixa de solo; ensaios estáticos.

ABSTRACT

The increased mechanization in farming generates employment of ever more powerful machines, and power has direct relationship with the weight. Increasing traffic of heavy machinery on the ground the use of correct tire is of paramount importance to minimize the effects of compaction. With the differences between models of high-flotation tires for free and tractive axes, especially regarding the presence of claws, and the common use of tires tractive on free axes because of the cost of tax be reduced, questioned the possibility of employment tire cheaply be hindering productivity, because this has a contact area possibly lower. The objective is then to the comparative study between two models of high-flotation tires the same size, but one for free axes and another for tractive axes. The experiments were conducted in soil bin and also in rigid surface, under controlled conditions, performing static tests for two radial loads (16 and 29 kN), by measuring deformation, contact areas and soil compaction, and made a factorial statistical analysis with the tire and load factors, was conducted 8 tests, totaling 32 observations. Was obtained as result, larger deformations for the tractive tire as well as larger contact area and less compaction of the soil that tire of free axis, that because the contact area of the tire tractive involves not just the claws, but also the region between them and the fact that the tire has a much lower rubber compound in its tread, when compared with tire of free axis, increases flexibility, enhancing their ability to deformation and consequently increasing its contact area with the ground, reducing the compaction of soil.

Keywords:

High flotation; soil compaction; contact area; soil bin; static tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arado pré histórico, possuía somente a função de sulcar o solo, somente um cavalo era suficiente para o trabalho.	3
Figura 2. Versão aprimorada do arado para tração animal, corte e inversão da leiva, com potência requerida de 2 cavalos.	4
Figura 3. O motor a vapor iniciou o processo de mecanização da agricultura, a figura mostra uma máquina a vapor tracionando um arado de 7 aivecas.	5
Figura 4. Primeiro trator incorporado pela John Deere, “Waterloo Boy”, era um trator a querosene, ainda com rodas de aço, que obteve sucesso em vendas.	6
Figura 5. Esquema do pneumático, desenvolvido por Robert Thomson.	7
Figura 6. Carro dos irmãos Michelin, dando início a utilização de pneumáticos em automóveis.	8
Figura 7. Ilustração dos esforços laterais em curva suportados pelo pneu.	11
Figura 8. Imagens que mostram a área de contato do pneu em piso molhado em três velocidades, 30, 70 e 100 km.h ⁻¹ , da esquerda para a direita.	11
Figura 9. Pneu diagonal, detalhe das lonas cruzadas, ancoradas nos frisos.	13
Figura 10. Pneu diagonal com cintura, a região central do pneu permanece mais plana que os diagonais, quando inflado.	14
Figura 11. Pneu radial, sentido de 90 graus das lonas e as cintas dispostas em ângulos positivos e negativos.	14
Figura 12. Esquema do ciclo formado pela compactação do solo e a necessidade do aumento da potência para cultivo.	18
Figura 13. Deformação do solo provocada por pneus de alta flutuação (esquerda) e pneus convencionais (direita).	20
Figura 14. Medida da propagação de tensão no solo devido à carga de 86 kN em um pneu com 100 kPa (triângulos brancos), 150 kPa (quadrados cinzas) e 250 kPa (círculos pretos) de pressão interna (KELLER e ARVIDSSON, 2004).	20
Figura 15. Estudo desenvolvido pela DAVCO em cana-de-açúcar.	21
Figura 16. Ilustração da área de tráfego no ciclo da cana de açúcar (Fonte: CORTEZ (2010)).	22
Figura 17. Tensão em um elemento devido à carga pontual P.	24
Figura 18. Curvas isobáricas sob uma carga pontual de 8kN, em três fatores de concentração $\xi = 4, 5$ e 6	25
Figura 19. Tensões agindo sobre um elemento de solo devido à pressão aplicada pelo pneu sobre o solo na interface de contato (SOHNE, 1953).	26
Figura 20. Método FE-DE, mostrando a deformação do solo causada pela carga radial do pneu, onde os elementos mais discretizados são MED e pneu e subsolo MEF.	28
Figura 21. Simulação pelo MEF, realizada com um pneu indeformável.	28
Figura 22. Modelo simulado comparado com a medição experimental, para caixa de cisalhamento (OIDA, <i>et al.</i> , 2005).	29
Figura 23. Relação da largura do pneu com a profundidade da compactação máxima.	31
Figura 24. Caixa de solos da Universidade de Cranfield, ensaios com esteira (esquerda) e pneu (direita).	33

Figura 25. Comportamento da área de contato com o aumento da carga radial, para os três modelos de pneus agrícolas (MAZETTO, <i>et al.</i> , 2004).	34
Figura 26. Modelos de pneus ensaiados, Pirelli HF-75 (CG) e Pirelli RA-28 (SG).	36
Figura 27. Montagem virtual do equipamento, com a roda na parte inferior e fixação ao carro porta ferramentas.	37
Figura 28. Equipamento para realização dos ensaios estáticos de pneus em caixa de solos, A – Lastros e B – cilindros hidráulicos e células de carga.	38
Figura 29. Parâmetros medidos durante os ensaios do pneu, ds – deformação do solo e dt – deformação total.	39
Figura 30. Dispositivos para determinar a deformação total e lateral do pneu.	39
Figura 31. Perfilômetro utilizado para medir a deformação do solo.	40
Figura 32. Penetrômetro automático SOLOTRACK da FALKER.	40
Figura 33. Anéis amostradores de densidade.	41
Figura 34. Determinação da área de contato pneu-solo, a área do retângulo é de 0,39 m ²	42
Figura 35. Divisão da caixa de solos para realização dos ensaios.	43
Figura 36. Pontos de amostras de IC, na área de contato e entre os ensaios.	44
Figura 37. Amostras de densidade, na área de contato e na região entre os ensaios.	45
Figura 38. Deformações totais dos pneus SG e CG sobre superfície rígida para a carga de 29 kN.	46
Figura 39. Estudo do incremento da área de contato efetiva devido o incremento da carga radial de 0 a 31 kN.	47
Figura 40. Imagem da área de contato e pressões para a carga de 29 kN em superfície rígida, pneu CG acima e pneu SG abaixo.	48
Figura 41. Pressão média ao longo do perfil da área de contato para os pneus SG e CG com carga radial de 29 kN.	49
Figura 42. Deformações totais e deformação do solo.	50
Figura 43. Diferença estatística entre os valores de deformação do solo.	51
Figura 44. Diferença estatística entre as interações de deformação total.	52
Figura 45. Áreas efetivas e áreas totais.	53
Figura 46. Interações entre pneu e carga para área efetiva.	54
Figura 47. Diferença estatística entre os valores de área total.	55
Figura 48. Incremento do índice de cone em 2 níveis de profundidade.	56
Figura 49. Incremento do IC para camada de 0 - 0,1 m em função da carga aplicada e tipo de pneu.	57
Figura 50. Incremento do IC para camada de 0,1 - 0,2 m em função da carga aplicada e tipo de pneu.	58
Figura 51. Incremento de densidade em 2 níveis de profundidade.	59
Figura 52. Incremento da densidade do solo na camada de 0 - 0,1 m em função da carga aplicada e tipo de pneu.	60
Figura 53. Incremento da densidade do solo na camada de 0,1 - 0,2 m em função da carga aplicada e tipo de pneu.	61
Figura 54. Diferenças entre as seções dos pneus CG e SG.	62
Figura 55. Incremento na Deformação total com o incremento da carga de 16 para 29 kN.	63
Figura 56. Incremento da área de contato total com a variação da carga de 16 kN para 29 kN.	64
Figura 57. Sobreposição das áreas, cinza com carga de 16 kN e preto 29 kN e a dimensão longitudinal (mm), na qual ocorre o aumento da área.	65

Figura 58. Variação do IC com o incremento da área de contato em relação a profundidade e tipo de pneu.	66
Figura 59. Profundidade do ponto onde ocorre a máxima compactação, 200 mm, calculada pelo triângulo retângulo.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Participação das faixas de potência nas vendas totais de tratores agrícolas no Brasil, para 1990, 2006 e 2010.....	17
Tabela 2. Níveis de resistência à penetração para cada tipo de solo.	30
Tabela 3. Características dos pneus ensaiados, especificado pelo fabricante.	35
Tabela 4. Resultados da análise granulométrica do solo empregado no laboratório de Projeto de Máquinas Agrícolas.	36
Tabela 5. Análise da variância (ANOVA) para deformação do solo em função da carga aplicada e tipo de pneu.	51
Tabela 6. Análise da variância (ANOVA) para deformação total.....	52
Tabela 7. Análise da variância (ANOVA) para área efetiva.	54
Tabela 8. Análise da variância (ANOVA) para área total.	55
Tabela 9. Análise da variância (ANOVA) para o incremento IC de 0 a 0,1 m.	57
Tabela 10. Análise da variância para incremento do IC de 0,1 a 0,2 m.	58
Tabela 11. ANOVA do incremento de densidade na primeira camada.....	60
Tabela 12. Análise da variância do incremento de densidade na segunda camada.....	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2. HIPÓTESE.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.3.1. <i>Objetivos Gerais</i>	2
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. MÁQUINAS AGRÍCOLAS E SUA EVOLUÇÃO.....	3
2.1.1. <i>Os Primeiros Passos</i>	3
2.1.2. <i>Revolução Industrial</i>	4
2.1.3. <i>A Criação dos Pneumáticos</i>	6
2.1.3.1. <i>Pneus Agrícolas</i>	9
2.2. TECNOLOGIA DOS PNEUS	10
2.2.1. <i>Funções</i>	10
2.2.1.1. <i>Interface Veículo e Solo</i>	10
2.2.1.2. <i>Suporte de Carga</i>	12
2.2.1.3. <i>Absorver Irregularidades do Terreno</i>	12
2.2.2. <i>Tipos de Pneus</i>	12
2.2.2.1. <i>Pneus Diagonais</i>	12
2.2.2.2. <i>Pneus Diagonais Cinturados</i>	13
2.2.2.3. <i>Pneus Radiais</i>	14
2.3. MECANIZAÇÃO E IMPACTOS NO SOLO.....	15
2.3.1. <i>Conservação do Solo</i>	18
2.3.1.1. <i>Adequação dos Pneus</i>	19
2.3.1.2. <i>Controle de Tráfego</i>	21
2.4. ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO	23
2.4.1. <i>Métodos Analíticos</i>	23
2.4.1.1. <i>Propagação de Tensões no Solo</i>	24
2.4.2. <i>Métodos Numéricos</i>	27
2.4.3. <i>Métodos Empíricos</i>	29
3. MATERIAL E MÉTODO	35
3.1. PNEUS.....	35
3.2. SOLO.....	36
3.3. EQUIPAMENTOS PARA ENSAIO E AQUISIÇÃO DE DADOS	37
3.4. METODOLOGIA DOS ENSAIOS	41
3.4.1. <i>Ensaio em Superfície Rígida</i>	41
3.4.2. <i>Preparo do Solo</i>	41
3.4.3. <i>Cargas de Ensaio</i>	42
3.4.4. <i>Áreas de Contato</i>	42
3.4.5. <i>Determinação da Resistência à Penetração (RP)</i>	42
3.4.6. <i>Densidade</i>	44

3.4.7. <i>Delineamento Estatístico</i>	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1. ENSAIOS EM SUPERFÍCIE RÍGIDA.....	46
4.1.1. <i>Deformações</i>	46
4.1.2. <i>Área de Contato</i>	47
4.2. ENSAIOS EM SUPERFÍCIE DEFORMÁVEL	49
4.2.1. <i>Deformações</i>	49
4.2.2. <i>Área de Contato</i>	53
4.2.3. <i>Compactação do Solo</i>	56
4.2.3.1. Incremento do Índice de Cone (IC)	56
4.2.3.2. Incremento da Densidade	58
4.3. CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	62
5. CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS	78

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A evolução da agricultura está relacionada com a mecanização dos seus sistemas seja no plantio, nos tratos culturais ou na colheita. Com o aumento da utilização de máquinas no campo aumenta-se, conseqüentemente, o tráfego de veículos pesados sobre solos, que possuem baixa tolerância à compactação principalmente em solos com teor de argila elevado, como os solos encontrados na região central do estado de São Paulo, onde é cultivada cana-de-açúcar, diminuindo sua capacidade produtiva.

Devido a essa interação entre as máquinas utilizadas nas diferentes etapas da produção e o solo ser de extrema importância para a cultura, o estudo da interface pneu-solo, torna-se indispensável.

Conhecer os valores, a distribuição e a propagação das tensões no solo e então relacioná-los com seus atributos físicos é importante para determinar o comportamento do pneu a ser utilizado, selecionando o mais adequado, para que as tensões aplicadas ao solo causem o menor dano possível.

O objetivo dos pneus agrícolas, além de proporcionar bom desempenho trativo, é de suportar cargas radiais de forma que as pressões exercidas no solo sejam as menores possíveis.

Para esse fim são empregados pneus de alta flutuação, sendo divididos em duas categorias, pneus de alta flutuação de eixo trativo e pneus de eixo livre, sendo a diferença notada na banda de rodagem.

Pneus trativos possuem garras ou cravos dispostos em ângulo para efetuarem o cisalhamento do solo e conseqüentemente transformarem o torque em força de tração já os pneus de eixo livre não possuem garras, pois não são utilizados para tração.

É comum pneus trativos serem utilizados em eixo livre, pois hoje no Brasil pneus com garras (espinha de peixe) possuem valor de imposto menor que pneus de eixo livre, por serem classificados como pneu agricultura, com isso grande parte de implementos utilizados na agricultura brasileira, estão equipados com pneus trativos em seus eixos livres.

A compactação superficial do solo esta diretamente relacionada com a área de contato, que para os pneus de eixo livre considera-se a área cheia.

Em pneus trativos acredita-se que o contato com o solo se dê somente no topo das garras e a região entre elas (vazio), não entre em contato com o solo.

Dessa forma a compactação gerada pelos pneus de eixo livre seria menor que a gerada pelos pneus trativos.

Em solos muito compactados ou solos indeformáveis o fundo íncavo do pneu (região entre as garras) pode não tocar o solo, fazendo com que toda a carga seja distribuída somente na área de contato das garras; porém, em solos agrícolas, onde se verifica deformações do solo maiores, o fundo íncavo pode tocar o solo, aumentando a área de contato em relação ao solo indeformável, embora não se sabe se a carga suportada por essa região do pneu é significativa.

1.2. Hipótese

A distribuição da carga radial aplicada em pneus de eixo livre se dá numa área de contato entre pneu e solo maior que em pneus de eixo trativo, propiciando, portanto, uma compactação menor no solo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos Gerais

O objetivo geral da pesquisa é comparar a compactação do solo gerada por dois tipos de pneus de alta flutuação existentes no mercado brasileiro, um com classificação “espinha de peixe” (eixo trativo), utilizados em maior escala e outro classificado como eixo livre.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Levantamento das deformações (do solo e dos pneus), definindo-se o comportamento influenciado pela rigidez de cada pneu;
- Determinação da área de contato dos pneus trativos e de eixo livre;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Máquinas Agrícolas e sua Evolução

2.1.1. Os Primeiros Passos

O início das atividades agrícolas data da pré história, no período neolítico, sendo que as principais áreas agrícolas estavam localizadas nos vales dos rios Nilo no Egito, Tigre e Eufrates na Mesopotâmia e nos rios Amarelo e Azul na China.

Dentre várias ferramentas utilizadas na agricultura, como a enxada, destaca-se a utilização dos arados, por volta de 3000 A.C., pelos Sumérios, localizados em terrenos férteis entre os rios Tigre e Eufrates, pelo fato de se iniciar com esse instrumento, ainda rústico, a utilização da tração animal (Figura 1).

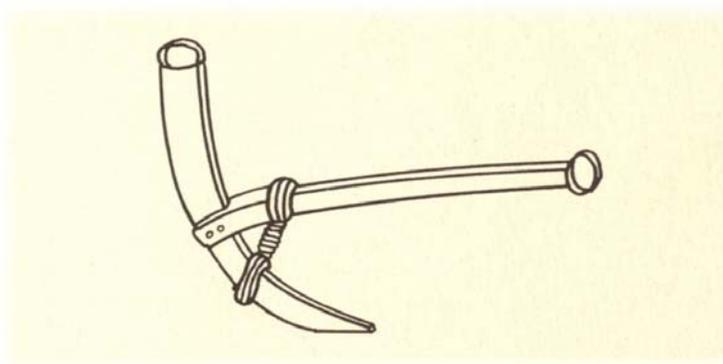


Figura 1. Arado pré histórico, possuía somente a função de sulcar o solo, somente um cavalo era suficiente para o trabalho.

Até então o homem utilizava-se de sua própria força para criar sulcos no solo para o plantio, contudo, com a necessidade de se aumentar as áreas de produção, iniciou-se o emprego da força animal, dando a possibilidade de melhorar a qualidade do trabalho e trabalhar áreas maiores em menos tempo (ENCYCLOPEDIA BRITANICA, 1979).

Com a introdução dos arados de disco e aiveca na Europa, por volta de 1500 D.C. (MCKEYS, 1985), o trabalho do arado passou de simples riscos no solo, para corte e inversão

da leiva, exigindo um número maior de animais por arado, dessa forma acrescentava-se ao solo a compactação gerada pelos animais, observa-se que com o aumento da potência exigido pelo implemento tem-se o aumento do peso (Figura 2).

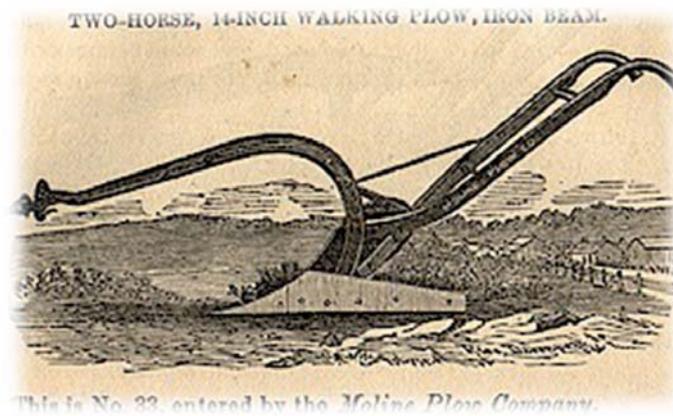


Figura 2. Versão aprimorada do arado para tração animal, corte e inversão da leiva, com potência requerida de 2 cavalos.

O projeto do arado que é muito parecido com o atual foi concebido em 1730, pelo holandês Joseph Foljambe, dando início a sua industrialização. Após isso o arado sofreu adaptações de acordo com as necessidades dos produtores, como a invenção de John Deere em 1837, de um arado auto limpante (MCKEYS, 1985).

Com o objetivo de aumentar a eficiência do trabalho, o homem incorpora mais de uma atividade à mesma ferramenta, isso faz com que a potência exigida para tracioná-la seja maior, ou seja, no caso da tração animal aumenta-se o número de animais e, por conseguinte, o peso sobre o solo.

2.1.2. Revolução Industrial

Em 1769 James Watt patentou um motor a vapor com melhor desempenho e transformou o projeto dos motores a vapor, sendo a principal inovação que trouxe a revolução industrial (MILLAR, 1996).

Com a revolução industrial em meados do século XVIII, as máquinas a vapor foram bastante difundidas, nas fábricas têxteis, nos trens, em navios e em 1868, unidades motrizes

com rodas de aço foram criadas, com o objetivo de exercer força trativa, substituindo a força animal (Figura 3).



Figura 3. O motor a vapor iniciou o processo de mecanização da agricultura, a figura mostra uma máquina a vapor tracionando um arado de 7 aivecas.

Em 1892 John Froelich construiu o primeiro trator de sucesso a gasolina montando um motor fabricado pela Van Duzen Gás e Gasolina Motor Company em um chassi de tração do motor a vapor feito por Robinson and Company.

No ano seguinte, 1893, Froelich incorporou a Waterloo Gasoline Traction Engine Company de Waterloo, Iowa (ANTIQUFARMING, 2010).

Em 1895, a Waterloo Gasoline Traction Engine Co. foi reorganizada, tornando-se a Waterloo Gasoline Engine Co. Tendo alcançado um sucesso considerável na construção de motores a gasolina, mas continuou com as pesquisas em tratores experimentais, sendo criados os tratores de queima de querosene conhecido como "Waterloo Boy" (Figura 4). Em 1918 a empresa de Waterloo foi absorvida pela Deere & Company (MACMILLAN, 2003).

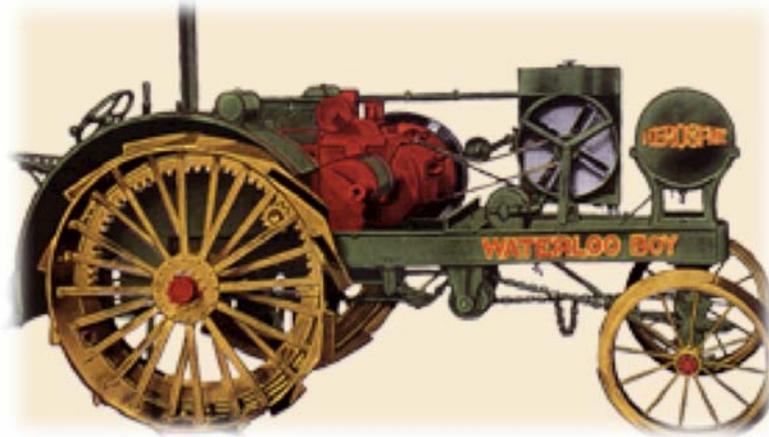


Figura 4. Primeiro trator incorporado pela John Deere, “Waterloo Boy”, era um trator a querosene, ainda com rodas de aço, que obteve sucesso em vendas.

Com Henry Ford (tratores Fordson), o trator absorvia certas características dos automotivos, princípios como a direção e o tipo de transmissão, motor de alta velocidade, e uma unidade de tração muito mais leve e eficiente.

Assim o emprego dos tratores agrícolas tornou-se muito viável e sua produção entrou em crescimento, aprimorando as tecnologias dos motores e também de outros componentes, como os rodados, que até então eram de aço.

2.1.3. A Criação dos Pneumáticos

A borracha natural pura não é um material muito resistente, nem apresenta grande estabilidade perante variações de temperatura, isso fez com que as experiências com pneus falhassem, até que em 1839, Charles Goodyear, que trabalhava com borracha natural importada do Brasil, descobriu acidentalmente a vulcanização.

Goodyear verificou que uma mistura de borracha com enxofre, cozida a altas temperaturas, resultava num composto mais estável, mantendo suas características perante variações significativas de temperatura (GOODYEAR, 2011).

Em 1846, Robert W. Thomson, que havia feito estudos sobre pneumáticos, acabou desenvolvendo um tubo de borracha inflado de ar revestido por um forte couro preso ao aro, sendo então patenteado (Figura 5).

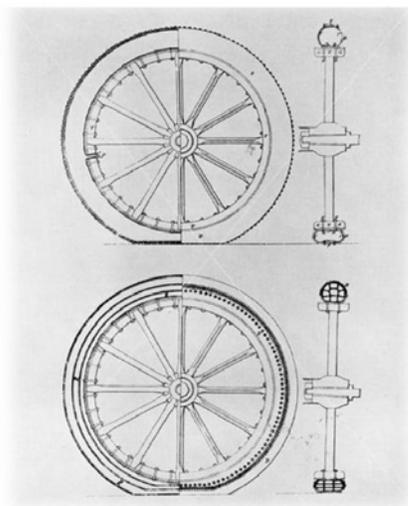


Figura 5. Esquema do pneumático, desenvolvido por Robert Thomson.

Porém, como os estudos de Thomson não continuaram, em 1888, John Boyd Dunlop, ao tentar desenvolver um triciclo mais confortável, cortou pedaços de uma velha mangueira de borracha e adaptou-os as rodas do triciclo enchendo-os com ar.

Com a sua idéia patenteada contactou uma firma local, a W. Edlin and Co, que iniciou o fabrico dos primeiros aros adaptados a pneus infláveis de bicicleta, ou pneumáticos, como constava da sua patente. Contudo em 1891 a patente do primeiro pneumático foi reconhecida a Thomson.

Edouard Michelin construiu diversos protótipos de rodas, desenvolvendo então um pneu desmontável para bicicletas (MICHELIN, 2011).

Em 1895 os irmãos Michelin fabricaram um automóvel com rodas pneumáticas (Figura 6) que conseguiu percorrer a extensão da prova Paris-Bordeaux-Paris, abrindo o caminho para os pneumáticos na indústria do automóvel (MICHELIN, 2011).



Figura 6. Carro dos irmãos Michelin, dando início a utilização de pneumáticos em automóveis.

A partir de então as pesquisas em pneumáticos foram acentuadas e feitas melhorias como o lançamento do pneu diagonal em 1904 pela Goodyear e Firestone, utilizando tecido de algodão dispostos em ângulos cruzados e a adição de negro de fumo ou negro de carbono, derivado de petróleo, à borracha, em 1908 pela BF Goodrich, resultando num composto mais resistente e durável.

A evolução dos materiais tornou viável a substituição do algodão por fibras sintéticas, como o rayon e o nylon, que suportam maiores cargas com uma quantidade menor de material, tornando o pneu mais leve e ajudando na perda de calor.

Os pneus seguiam então a tendência do mercado automobilístico, aumento de potência, gerando maiores velocidades e aumento do peso dos veículos, dessa forma a estrutura dos pneus começa a sofrer alterações, como o surgimento do pneu balão introduzido pela Firestone, em 1923, que possuía uma seção mais larga, perfil mais baixo e pressão de inflação menor, isso resultava em um conforto maior e garantia ao pneu uma vida também superior.

As malhas metálicas surgiram em 1925, sendo utilizadas inicialmente no talão do pneu, garantindo um melhor assentamento do pneu no aro, isso fez com que os pneus pudessem trabalhar a pressões de inflação ainda menores, aumentando sua durabilidade.

Em 1934 a Michelin vulcanizou fios de aço na carcaça, gerando pneus extremamente resistentes, sendo então fabricados pneus para caminhões de estrada, pois suportavam bem o aquecimento e as cargas pesadas.

Essa descoberta de fios de aço na carcaça possibilitou o desenvolvimento pela Michelin de pneus radiais, em 1946, implementando no mercado um novo conceito de pneumático, separando as funções entre banda de rodagem e os flancos do pneu, esse projeto foi denominado “projeto x” (MICHELIN, 2011).

Nesta altura os pneus já apresentavam uma estrutura semelhante aos pneus atuais, sendo aprimorado o desenvolvimento de materiais e desenho.

2.1.3.1. Pneus Agrícolas

Os tratores com rodas e garras de metal, empregados nas lavouras não podiam ser transportados em vias públicas e em terrenos úmidos as rodas rígidas não proporcionam tração, essas rodas também eram inadequadas para fins de cultivo, uma vez que causavam muitos danos às raízes das culturas.

Em 1930 os engenheiros da Allis Chalmers começaram os experimentos com pneumáticos, em 1932, um par de Firestone 48 x 12, pneus de avião, foram montados em um trator AC modelo U, obtendo um grande sucesso (ANTIQUFARMING, 2010).

Os primeiros pneumáticos de tratores agrícolas eram pneus de baixa pressão, capazes de satisfazer os requisitos dos variados tipos de emprego dos tratores agrícolas, iniciando uma das mudanças mais rápidas e marcantes na história dos equipamentos agrícolas.

Em 1933 a Allis Chalmers apresentou um trator montado com pneumáticos no Wisconsin State Fair. O trator foi mostrado trabalhando em um arado, em seguida, um piloto local, Frank Brisco, levou-o para 57 km/h, mostrando a melhora no desempenho da máquina com a utilização de pneus. Essa publicidade gerada foi extremamente importante para a difusão e conseqüente aumento das vendas dos pneumáticos (ANTIQUFARMING, 2010).

Em 1935, quase 20.000 tratores (14% da produção de tratores de rodas dos EUA) foram equipados com pneus de borracha na fábrica. Em 1936, 31%, em 1937, 42%, em 1938, 65% e em 1939, 83%. Em 1940, mais de 90% de todos os tratores de rodas foram vendidos com pneumáticos (ANTIQUFARMING, 2010).

Os ensaios com pneumáticos feitos em lavouras, revelaram que ao longo da temporada de trabalho, os pneumáticos economizavam em média mais de 14% no combustível e aumentavam a potência na barra de 15 a 21% (ANTIQUFARMING, 2010).

Ensaio da Universidade de Ohio revelaram que os tratores equipados com pneus de borracha podiam arar uma área 27% maior, com 23% menos combustível que os tratores de rodas de aço (ANTIQUFARMING, 2010).

Ensaio da Universidade de Nebraska feitos em cultivo de milho, trigo, aveia e em suas respectivas colheitas, os tratores com pneus de borracha diminuiram 13% no tempo das atividades e 17,9% no consumo de combustível em relação às rodas de aço.

2.2. Tecnologia dos Pneus

Há muitos critérios a serem determinados para o projeto de um pneumático, desde os compostos de borracha que serão empregados, para satisfazer as necessidades de um determinado emprego, os tipos de tecidos utilizados e seu emborrachamento, até o desenho da banda de rodagem, para garantir um melhor desempenho ao usuário.

Os itens 2.2.1 e 2.2.2 apresentam uma breve explicação das principais funções dos pneus e a caracterização das suas estruturas, mostrada no trabalho de GENT e WALTER (2005).

2.2.1. Funções

2.2.1.1. Interface Veículo e Solo

O pneu é o responsável pela transformação da potência do motor em força de tração e consequente movimento do veículo. O atrito entre a banda de rodagem e o solo é responsável por contrabalancear os esforços sofridos pelo veículo nas curvas e em frenagens, garantindo a sua estabilidade (Figura 7).



Figura 7. Ilustração dos esforços laterais em curva suportados pelo pneu.

Como o atrito está diretamente relacionado à área de contato do pneu com o solo, todo o desenvolvimento do pneu, tanto sua estrutura interna, como suas dimensões, levam em consideração a área de contato e seu formato.

Assim é fundamental o desenho da banda de rodagem para que o veículo seja seguro em qualquer condição do solo, seja molhado, seco, em neve ou solos agrícolas (Figura 8).



Figura 8. Imagens que mostram a área de contato do pneu em piso molhado em três velocidades, 30, 70 e 100 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, da esquerda para a direita.

2.2.1.2. Suporte de Carga

A carga radial aplicada ao pneu pelo veículo é suportada pela pressão de ar interna, ou seja, ocorre a deflexão do pneumático até o ponto que se tenha o equilíbrio da pressão na área de contato com a sua pressão interna.

Para uma mesma carga, um pneu estreito necessita de uma pressão interna maior que um pneu largo, pois em uma área de contato pequena a pressão de contato é grande, consequentemente a pressão interna também deve ser.

2.2.1.3. Absorver Irregularidades do Terreno

Essa característica é extremamente importante, principalmente para veículos agrícolas que não possuem sistema de suspensão.

Com rodas de aço, qualquer excitação dada ao veículo pelas irregularidades do terreno, era transmitida diretamente a todos os componentes da máquina e, principalmente, ao operador, tornando o trabalho bastante árduo, além de danificar a máquina.

Os pneumáticos, por possuírem uma característica viscoelástica, funcionam como mola e sua estrutura interna como amortecedor, em veículos sem sistema de suspensão, como os tratores comercializados no Brasil, essa função é atribuída ao pneu.

2.2.2. Tipos de Pneus

A vulcanização da borracha foi um passo fundamental na evolução dos pneumáticos, porém a incorporação de tecido têxtil e mais tarde metálico, para compor a carcaça e demais estruturas, é responsável pelo aumento da capacidade de carga dos pneus assim como de sua durabilidade. Os tecidos são dispostos basicamente de três formas na estrutura dos pneus, sendo o pneu diagonal, diagonal com cinturas e o radial.

2.2.2.1. Pneus Diagonais

Pneus diagonais ainda são muito utilizados, tanto em caminhões como em máquinas e implementos agrícolas, sua principal característica é a disposição do tecido na carcaça em

ângulos menores que 90 graus, em relação a linha central da banda de rodagem. A quantidade de lonas de tecidos que compõem a carcaça geralmente é par, pois se intercala ângulos positivos e negativos, anulando-se as forças (Figura 9).

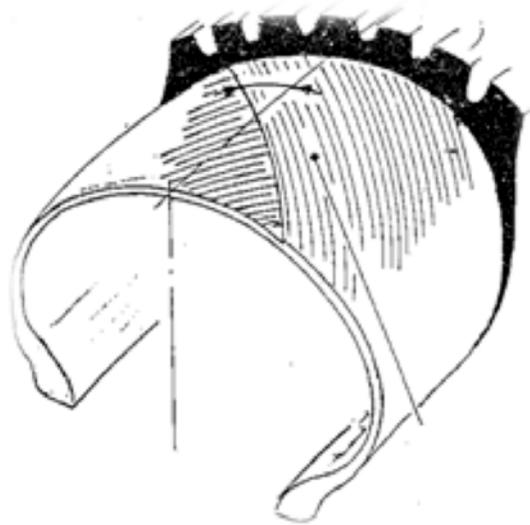


Figura 9. Pneu diagonal, detalhe das lonas cruzadas, ancoradas nos frisos.

Como vantagem desses pneus pode-se evidenciar maior robustez, construção simples e fácil confecção, porém a banda de rodagem e o flanco sofrem deformações, gerando calor e conseqüentemente fadiga da estrutura e também a pressão de contato com o solo é maior na região central da rodagem, provocando um desgaste maior que nos ombros.

2.2.2.2. *Pneus Diagonais Cinturados*

Esses pneus tornaram-se populares em meados dos anos 60, são pneus diagonais que se adicionou cintura na região da rodagem, essa cinta de tecido é também disposta em ângulos cruzados como a carcaça, porém os ângulos são menores, isso faz aumentar a rigidez da região da rodagem e quando o pneu é inflado tem-se uma restrição da expansão da carcaça na região da rodagem, mantendo-a mais plana. A área de contato fica mais plana, com formato mais retangular, que os pneus diagonais, melhorando a dirigibilidade e tratividade (Figura 10).

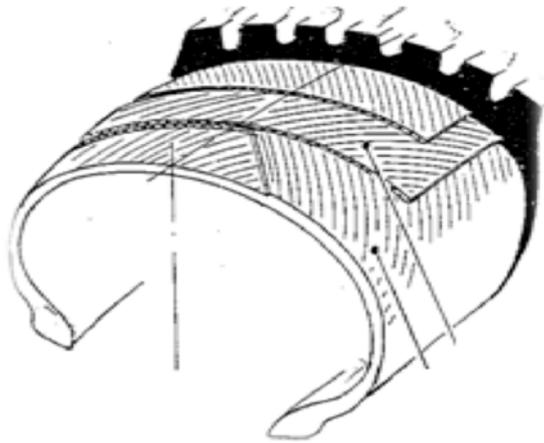


Figura 10. Pneu diagonal com cintura, a região central do pneu permanece mais plana que os diagonais, quando inflado.

2.2.2.3. Pneus Radiais

Apresentam ângulos da carcaça de 90 graus em relação à linha central da rodagem, também ancoradas no friso. Na região central, na rodagem, há cintas, com ângulos menores que 90 graus, como nos pneus diagonais cinturados, para estabilizar a estrutura (Figura 11).

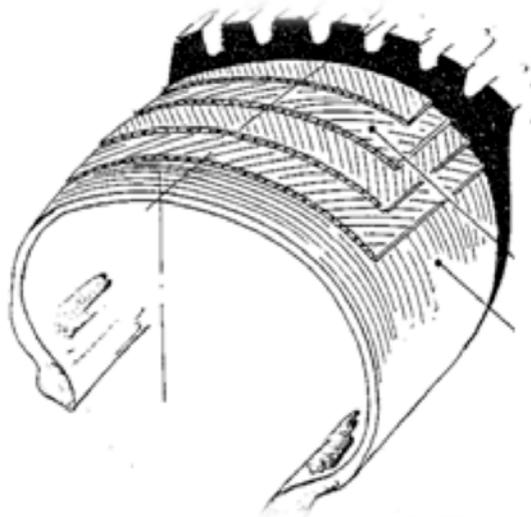


Figura 11. Pneu radial, sentido de 90 graus das lonas e as cintas dispostas em ângulos positivos e negativos.

Com o ângulo de 90 graus o flanco deforma mais facilmente sob carga, gerando menos calor na estrutura, diminui a resistência ao rolamento e melhora o desempenho em altas velocidades. A banda de rodagem, bastante plana, possui um desgaste bastante homogêneo e boa dirigibilidade, porém sua construção é bastante complexa e seu custo mais elevado.

2.3. Mecanização e Impactos no Solo

A produção agrícola está diretamente relacionada ao tráfego de veículos. Sem a eficiência da mecanização no plantio, tratos culturais e colheita das culturas agrícolas através de tratores e colhedoras, as práticas modernas de produção não poderiam existir.

No entanto, como os veículos tornaram-se progressivamente maiores, com aumento de peso, geram maiores deformações do solo e aumento da compactação.

Estes danos podem ser visíveis devido a deformação na superfície do solo, ou podem ser completamente subterrâneos e invisíveis em subsuperfície (RAPER, 2005).

A composição do solo, apresenta minerais, matéria orgânica, ar e água. Quando um veículo trafega sobre sua superfície ocorre uma redução no volume dos poros e os componentes minerais e orgânicos são rearranjados, causando a compactação (PAGLIAI e VIGNOZZI, 2002).

Porém, a pressão no solo que não provoca compactação adicional é chamada de pressão de preconsolidação do solo e deve ser a pressão máxima aplicada para que a compactação adicional seja evitada (LANÇAS, 2005).

A redução do volume dos poros e o rearranjo das partículas sólidas ocorre devido a efeitos internos ou externos no solo. Caracterizam efeitos externos a compactação gerada pelos animais ou veículos e os efeitos internos devido a movimentação de água e ar (percolação, evaporação, congelamento) (ARAÚJO, 2004).

Os materiais que compõem o solo, partículas sólidas, formam sua estrutura em agregados, que dependem de agentes cimentantes, como argila, matéria orgânica e os óxidos de Ferro e Alumínio, sendo que solos bem estruturados são mais estáveis quanto a variação de umidade (CAMARGO e ALLEONI, 1997).

O tamanho desses agregados determinam a susceptibilidade do solo a compactação devido a ações externas. O solo com partículas de variadas formas e tamanhos sofre menos

compactação, quando comparado com um solo com uma distribuição uniforme de tamanhos e formas de partículas (CRAUL, 1994).

A umidade do solo também é um fator que reflete na compactação, quando seco, o solo é bastante coeso e apresenta grande resistência à compactação, mas, à medida que vai umidecendo ocorre a formação de um pequeno filme de água entre os agregados, o qual facilita o deslocamento e o rearranjo das partículas do solo, diminuindo sua resistência à compactação (HILLEL, 1980).

A mudança no tamanho dos poros faz com que a capacidade de retenção de água pelo solo também seja alterada (DEXTER, 2004).

O comprometimento da condutividade hidráulica do solo resulta no aumento do escoamento superficial, causando perda de solo por erosão (HORN, 1995) e (FLEIGE e HORN, 2000).

As raízes das plantas forçadas a crescer em solo compactado sofrem por causa do aumento da resistência mecânica e diminuição da disponibilidade de oxigênio (UNGER e KASPAR, 1994). Perda de produtividade são comumente vistas em áreas severamente compactadas por tráfego.

GAMEDA, *et al.* (1994) relataram que o aumento das cargas por eixo de 100 para 180 kN incrementou a densidade em 179 kg.m^{-3} , nas profundidades entre 0,20 a 0,30 m em solo argiloso no Canadá. Eles descobriram reduções na produção de grãos de 18 a 27% com índices pluviométricos normais para a região e 55 a 86% com baixo índice pluviométrico.

Outra consequência da compactação do solo é o aumento da exigência tratória das operações agrícolas, o que provoca uma elevação nos custos operacionais para implantação e condução de uma cultura comercial (LANÇAS, 2005).

A Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2012), mostra a estatística do comércio de tratores no Brasil, para 1990, 2006 e 2010, dividindo o percentual de vendas pelas faixas de potência, apresentado na Tabela 1, ficando evidente o aumento do emprego de tratores de alta potência na agricultura brasileira.

Tabela 1. Participação das faixas de potência nas vendas totais de tratores agrícolas no Brasil, para 1990, 2006 e 2010.

Ano	Até 49 CV	Entre 50 e 99 CV	Entre 100 e 199 CV	Acima 200 CV
1990	8,9%	70,5%	20,5%	0,1%
2006	6,2%	57,9%	35,1%	0,8%
2010	2,2%	67,1%	29,0%	1,7%

O peso do trator correlaciona-se diretamente com seu desempenho em campo, sendo importante sua definição para realização das tarefas (BILLER e OLFE, 1986), (MÁRQUEZ, 1990), (RENIUS, 1994), (BIONDI, 1996) e (LINEARES, 1996).

Com essas referências, os tratores para atividades que não requerem alta potência trabalham com 50 kg.cv⁻¹ e atividades mais pesadas tratores de alta potência com uma lastragem de 60 kg.cv⁻¹, ou seja, o aumento da potência implica, por conseguinte, no peso do equipamento sobre o solo, que irá acarretar no aumento da compactação (Figura 12).



Figura 12. Esquema do ciclo formado pela compactação do solo e a necessidade do aumento da potência para cultivo.

Esse processo reduz o crescimento, o desenvolvimento radicular e aumenta as perdas de nitrogênio por desnitrificação, o consumo de combustível para preparar solos compactados e a erosão do solo pela menor infiltração de água (SOANE e OUWERKERK, 1994). Solos compactados podem contribuir também para o aquecimento global, por aumentarem a emissão de CO_2 , CH_4 e N_2O do solo (HORN, 1995).

2.3.1. Conservação do Solo

Todo esforço de preservação ou recuperação pode ser insuficiente se no processo de produção atual (que tende a se ampliar e intensificar) não forem incorporadas tecnologias,

processos ou práticas de conservação de solo e água que tenham aplicação ampla no processo produtivo, de pequenos, médios e de grandes produtores (ANA, 2010).

2.3.1.1. Adequação dos Pneus

A compactação do solo pode ser minimizada utilizando-se pressão baixa dos pneus (HAKANSSON, 2005) ou com a utilização de esteiras (ANSORGE e GODWIN, 2007).

Com o objetivo de se aumentar a área de contato com o solo pela qual será distribuída a carga suportada pelo pneumático, também faz-se o uso de pneus duplados.

TAYLOR, *et al.* (1980) mostraram em seu trabalho um comparativo da distribuição da pressão no solo nas profundidades de 0,18, 0,30 e 0,5 m, para pneus duplados e simples, com a mesma carga radial e concluíram que houve redução significativa da pressão quando utilizado pneus duplados.

Um aspecto negativo em se usar pneus duplos, ou mais largos, em relação a pneus simples, é que gera-se uma compactação do solo próximo à superfície em uma região que antes não era compactada, devendo-se atentar ao espaçamento das culturas, para evitar o tráfego sobre as linhas de plantio.

KOGER, *et al.* (1984) examinaram a dimensão do pneu em um experimento em caixa de solos no NSDL USDA-ARS em Auburn, AL. Eles encontraram que aumentando o tamanho dos pneus aumentava-se também a densidade e o índice de cone em vários de seus ensaios. Eles concluíram que o tamanho dos pneus não foi responsável pelo aumento da compactação porque junto com o tamanho do pneu aumentou-se também a rigidez, devido ao aumento da capacidade de carga.

MUROSKY e HASSAN (1991) descobriram que a largura dos pneus faz reduzir a deformação do solo, o índice de cone e a densidade devido à capacidade do pneu para distribuir a carga na superfície do solo.

CHI e TESSIER (1994) ensaiaram várias configurações de pneus em um caminhão com tanque de adubo líquido em solo agrícola. Eles descobriram que os pneus de alta flutuação produziram sulcos mais rasos e uma compactação do solo mais uniforme próximo à superfície do que os pneus com alta pressão (Figura 13)



Figura 13. Deformação do solo provocada por pneus de alta flutuação (esquerda) e pneus convencionais (direita).

O princípio dos pneus de alta flutuação é aumentar a largura do pneu para que a pressão interna do pneu possa ser mais baixa. No trabalho desenvolvido por KELLER e ARVIDSSON (2004) é mostrado a influência da pressão do pneu na distribuição da pressão no solo (Figura 14).

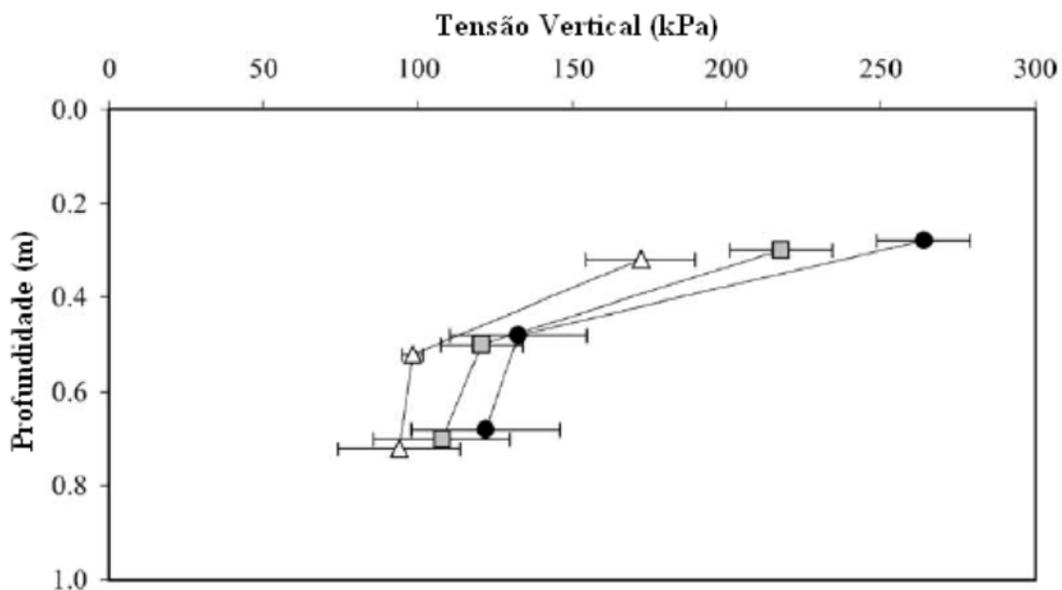


Figura 14. Medida da propagação de tensão no solo devido à carga de 86 kN em um pneu com 100 kPa (triângulos brancos), 150 kPa (quadrados cinzas) e 250 kPa (círculos pretos) de pressão interna (KELLER e ARVIDSSON, 2004).

Para um mesmo pneu o aumento da pressão interna significa redução da área de contato e com isso o aumento da compactação do solo em superfície.

A compactação em profundidade é referente a carga radial, como a carga nesse caso é a mesma, a pressão no solo tende a se igualar.

Os resultados confirmam os trabalhos de RAPER, *et al.* (1994) e BOTTA, *et al.* (2002), mostrando que a compactação superficial relaciona-se com a área de contato, que está diretamente relacionada com a pressão interna do pneu e a compactação em profundidade está diretamente relacionada com a carga radial.

2.3.1.2. Controle de Tráfego

Outra opção é a redução do tráfego de veículos na área, considerando uma forma de tráfego controlado. Definido como um sistema de produção agrícola em que a zona da cultura e as pistas de tráfego são permanentemente separadas (TAYLOR, 1983). Os corredores de trânsito são compactados e são capazes de suportar tráfego adicional sem deformar ou compactar. A eficiência trativa das máquinas também aumenta em solos bem estruturados, contribuindo, portanto, com a redução do consumo de combustível.

A zonas de produção agrícola no centro das pistas só podem ser utilizadas para o crescimento da planta e não pelo tráfego de veículos.

Várias tentativas foram feitas para diminuir a área de tráfego, como, por exemplo, a australiana DAVCO Farming, que em seu estudo definiu uma bitola de 3m para máquinas canavieiras (Figura 15), reduzindo a área trafegada de 60%, do sistema convencional, para 18% (DAVCO Farming, 2010).

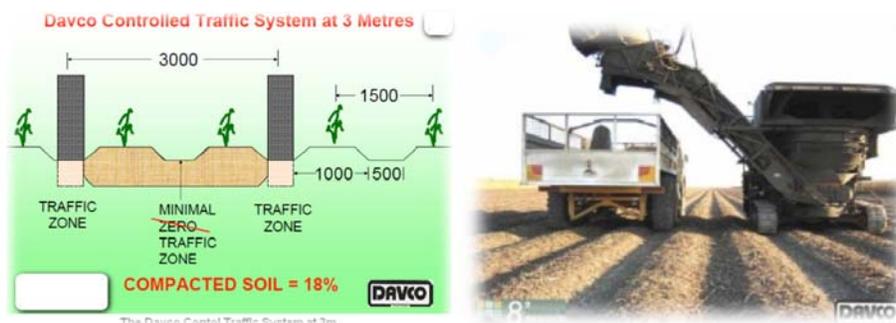


Figura 15. Estudo desenvolvido pela DAVCO em cana-de-açúcar.

A Figura 16 mostra as zonas de tráfego no sistema convencional de produção de cana de açúcar, sendo que na colheita cada linha é trafegada 2 vezes pelo conjunto do transbordo e colhedora.

Cada pneu na figura, indicado pelo retângulo preto, representa um conjunto de 2 pneus, ou seja, em todas as entre linhas de plantio tem-se 2 passagens de 2 pneus de colhedora, 2 pneus do trator, 2 pneus do transbordo 1 e 2 pneus do transbordo 2, totalizando somente durante a colheita 16 passagens de pneus com carga que variam de $1,75 \text{ Mg.eixo}^{-1}$ a 5 Mg.eixo^{-1} .

Com as demais operações tem-se o tráfego sobre um número menor de linhas, porém para um ciclo completo da produção a área total trafegada pode chegar a 60%.

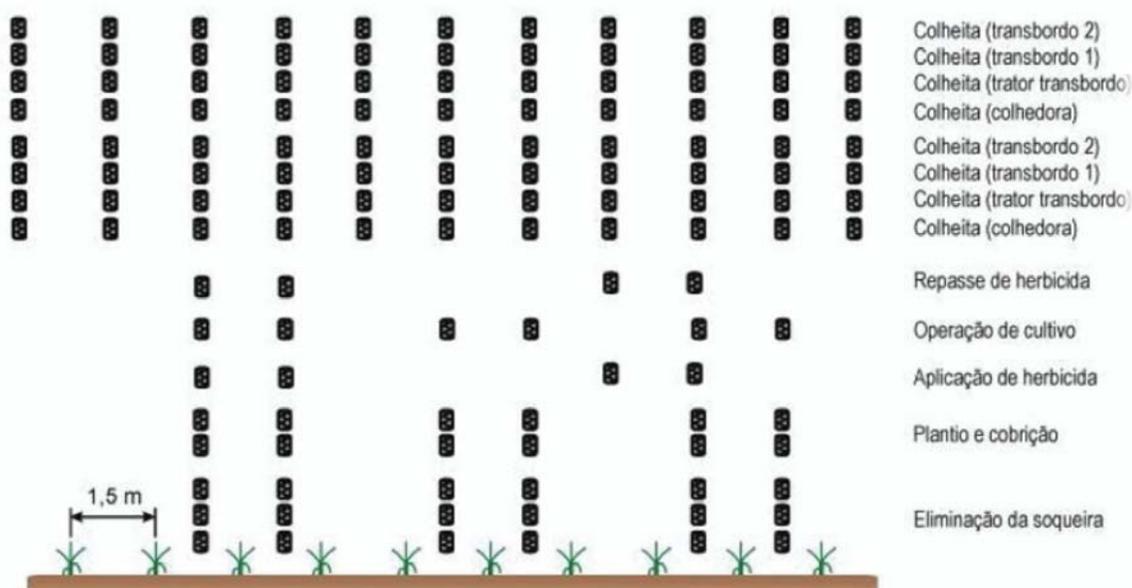


Figura 16. Ilustração da área de tráfego no ciclo da cana de açúcar (Fonte: CORTEZ (2010)).

No Brasil o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), uma instituição de pesquisa, desenvolvimento e inovação (P,D&I) governamental que atua na área de etanol de cana-de-açúcar aberto a usuários externos, foi criado para contribuir na liderança na produção de bioetanol brasileiro, buscando respostas para desafios científicos e tecnológicos em todo o ciclo produtivo.

Dessa forma está sendo implementado o programa de Mecanização de Baixo Impacto para o plantio direto de cana-de-açúcar. A proposta desse projeto se apóia em três pilares: viabilização do sistema de plantio direto (SPD) (com controle de tráfego) nos canaviais, agricultura de precisão (AP) e tecnologia da informação (TI). O objetivo dos pesquisadores dessa área do Laboratório é criar um modelo de plantio e colheita sustentável de cana-de-açúcar que reduza custos e conserve solo e água, com um melhor aproveitamento da palha.

2.4. Análise e Quantificação da Compactação

Vários modelos já foram propostos para se prever a compactação do solo devido às tensões aplicadas pelos pneus. Estes modelos geralmente analíticos, empíricos ou numéricos, frequentemente apresentam bons resultados quando focam resultados individuais, em estruturas homogêneas, mas geralmente não avaliam adequadamente o desempenho dos pneus e seus efeitos sobre o solo em condições mais reais. Estes modelos contêm duas componentes principais, a primeira relacionada à área de contato e a distribuição de tensões na interface pneu/solo, e a segunda relacionada à propagação de tensões no solo que resultam na sua deformação (CUI, *et al.*, 2007).

2.4.1. Métodos Analíticos

Modelos analíticos são baseados no trabalho de BOUSSINESQ (1885), mostrado a seguir, que desenvolveu equações de propagação de tensões em meios elásticos, homogêneos e semi-finitos. FROHLICH (1934), introduziu os fatores de concentração para se levar em conta o fato que as tensões estão mais concentradas no centro de aplicação de carga. Mais tarde SOHNE (1953) citado por KOOLEN e KUIPERS (1983) apresentaram um modelo numérico que a partir do centro do pneu com uma determinada pressão de inflação, e carga em um solo conhecido, é possível determinar a tensão em profundidade no solo. A partir do cálculo das tensões é possível então obter a deformação do solo. Estes modelos não levam em conta as características do pneu, mas estimam a tensão no solo a partir de uma área de contato e pressões conhecidas.

2.4.1.1. Propagação de Tensões no Solo

Os modelos são baseados no trabalho desenvolvido por SOHNE (1953) com a modelagem de distribuição vertical de tensão sob a área de contato entre pneu e solo, calculando a propagação de tensão principal (σ_1) através do solo. O cálculo de propagação usa fórmulas semi-empíricas derivadas por FROHLICH (1934) de BOUSSINESQ (1885), com soluções analíticas estabelecidas para materiais homogêneos, isotrópicos e elásticos.

FROHLICH (1934) sugeriu aplicar a equação de BOUSSINESQ (1885), a solos, introduzindo um fator de concentração ξ por notar que medições de esforços no solo pela equação de BOUSSINESQ (1885) eram maiores no eixo da carga que em seus arredores, com isso a principal tensão a uma distância r sob uma carga pontual P , como mostrado na Figura 17, é:

$$\sigma_1 = \frac{\xi \cdot P \cdot \cos^{\xi-2} \theta}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde θ é o ângulo entre o raio e a vertical.

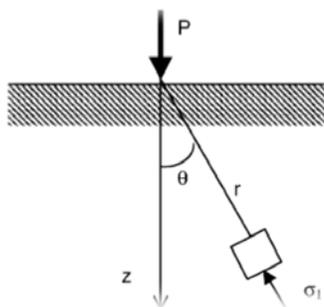


Figura 17. Tensão em um elemento devido à carga pontual P .

A Figura 18 mostra as isolinhas calculadas pela equação 1, para uma carga pontual vertical de 8 kN e nota-se que com o aumento de ξ tem-se isolinhas mais profundas.

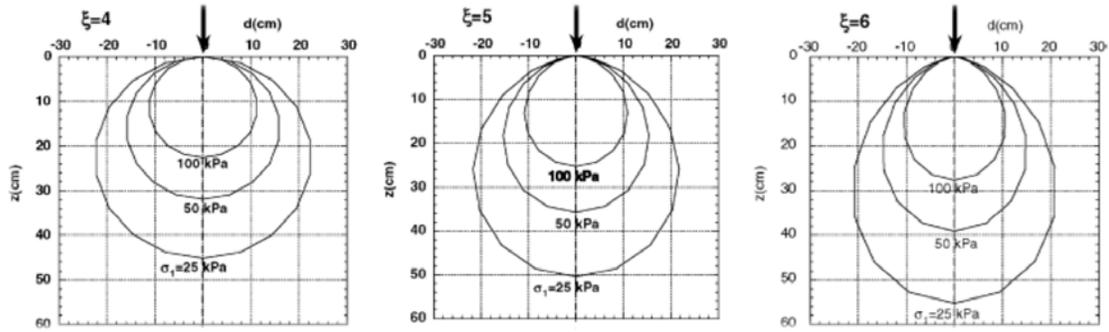


Figura 18. Curvas isobáricas sob uma carga pontual de 8kN, em três fatores de concentração $\xi=4, 5$ e 6.

SOHNE (1953) sugeriu valores de ξ de 4, 5 e 6 para solos mais pesados, médios e mais leves, respectivamente. Segundo EMBRAPA (2011) a classificação de solos em leve, médio e pesado é dada pelos seguintes critérios:

Solos de Textura Arenosa (Solos Leves) - Possuem teores de areia superiores a 70% e o de argila inferior a 15%; são permeáveis, leves, de baixa capacidade de retenção de água e de baixo teor de matéria orgânica. Altamente susceptíveis à erosão, necessitando de cuidados especiais na reposição de matéria orgânica, no preparo do solo e nas práticas conservacionistas. Possuem baixa capacidade de retenção de água o que ocasiona uma alta taxa de infiltração de água no solo e conseqüentemente elevada perda por percolação.

Solos de Textura Média (Solos Médios) - São solos que apresentam certo equilíbrio entre os teores de areia, silte e argila. Normalmente, apresentam boa drenagem, boa capacidade de retenção de água e índice médio de erodibilidade. Portanto, não necessitam de cuidados especiais, adequando-se a todos os métodos de irrigação.

Solos de Textura Argilosa (Solos Pesados) - São solos com teores de argila superiores a 35%. Possuem baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de água. Esses solos apresentam maior força de coesão entre as partículas, o que além de dificultar a penetração, facilita a aderência do solo aos implementos, dificultando os trabalhos de mecanização. Embora sejam mais resistentes à erosão, são altamente susceptíveis à compactação, o que

merece cuidados especiais no seu preparo, principalmente no que diz respeito ao teor de umidade, no qual o solo deve estar com consistência friável. Apresentam restrições para o uso da irrigação por aspersão quando a velocidade de infiltração básica for muito baixa.

O resultado dessa firmeza vem de combinações empíricas de densidades e quantidade de água no solo. Isso significa que o comportamento do solo difere de um corpo perfeitamente elástico. SOHNE (1953), propôs um método para cálculo de propagação de tensão sob um pneu agrícola usando as fórmulas de BOUSSINESQ (1885), modificada, contudo o modelo não considera a umidade do solo na propagação das tensões. O autor modelou tensões aplicadas por um pneu na superfície de contato pneu/solo, assumindo essa área de contato como uma elipse, desconsiderando-se o cisalhamento, descrevendo a distribuição vertical de tensões na superfície do solo por uma parábola de sexta ordem, quarta ordem e segunda ordem para $\xi=4$, $\xi=5$ e $\xi=6$, respectivamente. Na Figura 19 é ilustrada a distribuição vertical de tensões na superfície do solo para $\xi=5$, a tensão a partir da superfície do solo diminui com o aumento da distancia entre o centro da área de contato e o ponto na profundidade do solo. SOHNE (1953), calculou a tensão principal σ_1 , desconsiderando σ_2 e σ_3 (Figura 19).

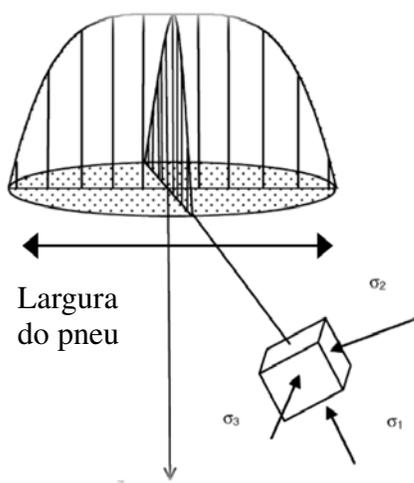


Figura 19. Tensões agindo sobre um elemento de solo devido à pressão aplicada pelo pneu sobre o solo na interface de contato (SOHNE, 1953).

2.4.2. Métodos Numéricos

Modelos de elementos finitos (MEF) faz o uso da mecânica dos meios contínuos e tem potencial para descrever o comportamento do solo mais adequadamente, pois a tensão é calculada a partir de uma deformação. Para se utilizar corretamente os modelos de elementos finitos são necessárias mais informações sobre o comportamento mecânico do solo e características do pneu (DÉFOSSEZ e RICHARD, 2002).

A distribuição de tensão na interface pneu/solo é difícil de medir devido à presença das garras e da irregularidade do solo. Alguns trabalhos de pesquisa determinaram a tensão em pontos a 0,1 m abaixo da superfície (KELLER e ARVIDSSON, 2004), ou instrumentando o pneu diretamente (VANDENBERG e GILL, 1962), (WOOD e BURT, 1987), (BURT, WOOD e BAILEY, 1987) e (WAY e KISHIMOTO, 2004).

ARVIDSSON e KELLER (2007), apresentam um modelo bi-dimensional para prever a tensão e a compactação de solos agrícolas devido ao tráfego de veículos. O modelo apresentou bons resultados muito similares aos obtidos através de modelos de elementos finitos. Contudo os autores ressaltam que precisa ainda ser ensaiado em diferentes condições para se determinar seus limites e aplicabilidade. Um refinamento do modelo pode incluir funções para se estimar a tração, através das tensões de cisalhamento na superfície e incorporar funções de transferência de pedologia.

Recentemente uma programação em Matlab-Simulink tornou-se disponível para o estudo da interação pneu/solo (AS²TM, 2009). O modelo foi desenvolvido especialmente para atender a demanda de profissionais que lidam com os problemas relacionados à interação entre pneus viscoelásticos e solos deformáveis e está baseado na teoria de BEKKER (1956), BEKKER (1960) e BEKKER (1969).

NAKASHIMA e OIDA (2004), verificaram a combinação do MEF junto com método de elementos discretizados (MED), modelando o pneu e o subsolo com MEF e a superfície do solo com MED, para assim resolver alguns problemas básicos de interação pneu e solo (Figura 20).

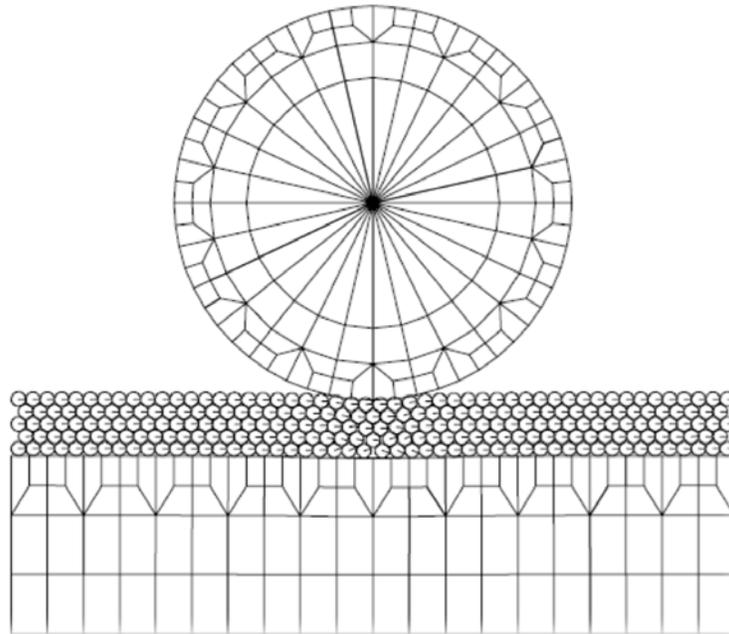


Figura 20. Método FE-DE, mostrando a deformação do solo causada pela carga radial do pneu, onde os elementos mais discretizados são MED e pneu e subsolo MEF.

Dessa forma o tempo de processamento foi reduzido e a deformação do solo, quando comparada com um experimento de campo foi bastante precisa.

RODRIGUES (2009) realizou simulações computacionais (MEF) de um pneu rígido aplicando carga estática sobre um solo deformável, simulando ensaios em caixa de solos, constatando, que a máxima tensão no solo não foi no contato pneu/solo, mas em uma profundidade um pouco maior (Figura 21).

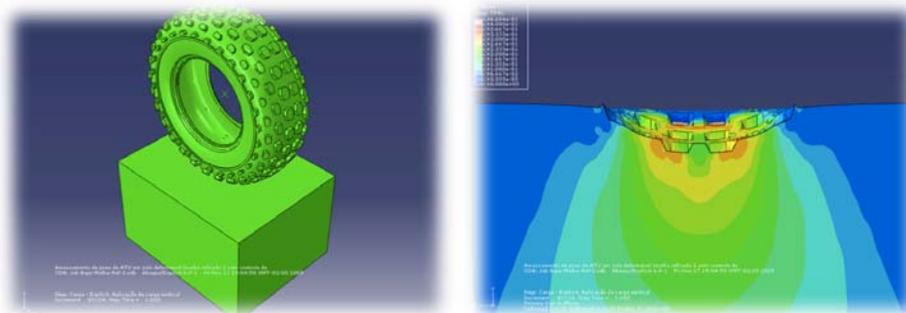


Figura 21. Simulação pelo MEF, realizada com um pneu indeformável.

Para se garantir boa correlação entre modelos simulados e experimentos, deve-se calibrar os modelos de solos, comparando-se comportamentos da simulação com resultados empíricos.

OIDA, *et al.* (2005) como forma de calibrar seus modelos de solo, utilizaram o MEF para traçar a curva simulada da caixa de cisalhamento comparando-se com a curva empírica (Figura 22).

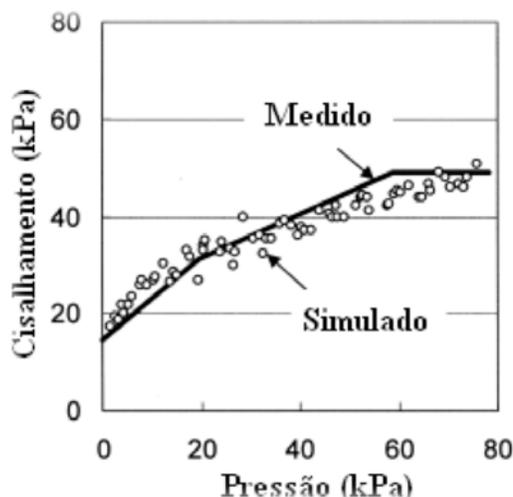


Figura 22. Modelo simulado comparado com a medição experimental, para caixa de cisalhamento (OIDA, *et al.*, 2005).

Pode-se notar uma boa correlação entre os valores das características físicas do solo com o modelado, dessa forma garante-se que com a simulação da interação pneu e solo serão obtidos valores próximos aos reais.

2.4.3. Métodos Empíricos

São experimentos realizados em campo (lavouras) ou em caixa de solos, sendo que em caixa de solos pode-se trabalhar sob condições controladas de umidade, temperatura, granulometria do solo e compactação inicial.

A quantificação da compactação é realizada por dois métodos comumente usados, a resistência à penetração e densidade, classificados por LANÇAS (1996) e RIPOLI, *et al.* (2005), como método intermediário e preciso, respectivamente.

A resistência à penetração, ou índice de cone, depende das seguintes características do penetrômetro; ângulo e diâmetro do cone, rugosidade da superfície e velocidade de penetração, sendo alguns fatores padronizados por normas, como ASAE S313.3 (1999) e ASAE EP542 (1999).

A resistência do solo à penetração é bastante utilizada em sistemas de manejo por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (TORMENA e ROLLOF, 1996) e (MERCANTE, *et al.*, 2003).

Os aspectos do solo que influenciam a resistência à penetração são; densidade, textura, matéria orgânica e, principalmente, a umidade. O uso do penetrômetro como indicador de compactação deve ser feito com cuidado, devido a sua dependência em relação à umidade do solo e as complexas relações com as demais características do solo (OSULLIVAN, *et al.*, 1987).

Segundo CAMARGO e ALLEONI (1997) quando a resistência à penetração é menor que 1,0 MPa não há limitação ao desenvolvimento de raízes, enquanto que valores entre 1,0 e 2,5 MPa, a resistência é considerada baixa, ocorrendo pouca restrição ao desenvolvimento radicular, sendo alta acima de 2,5 MPa.

Pode-se ainda, estimar os níveis de compactação do solo para uma mesma condição de umidade e diferentes tipos de solo, como mostra a Tabela 2 (FALKER, 2011).

Tabela 2. Níveis de resistência à penetração para cada tipo de solo.

Níveis de Compactação do solo (Umidade Capacidade de Campo)	Solos Leves*	Solos Médios*	Solos Pesados*
Nível Tolerável (MPa)	Abaixo de 2	Abaixo de 2	Abaixo de 2,5
Nível Intermediário (MPa)	Entre 2,5 e 3	Entre 2 e 3,5	Entre 2,5 e 4
Nível Crítico (MPa)	Acima de 3	Acima de 3,5	Acima de 4

*Classificação segundo EMBRAPA (2011).

Assim como para resistência à penetração há também níveis para densidades e cada solo possui uma densidade crítica, a partir da qual tem-se a diminuição ou o impedimento do crescimento de raízes (ROSEMBERG, 1964), (CINTRA e MIELNICZUK, 1983) e (PEDÓ, 1986).

A densidade do solo crítica é dependente principalmente de sua classe textural. ARGENTON, *et al.* (2005) constataram que, em Latossolo Vermelho argiloso, a deficiência de aeração inicia-se com densidade do solo próxima de 1300 kg.m^{-3} , e KLEIN (2006) para mesma classe de solo, baseado no intervalo hídrico ótimo, observou que a densidade limitante foi de 1330 kg.m^{-3} . REICHERT, *et al.* (2003), propuseram densidade do solo crítica para algumas classes texturais: 1300 a 1400 kg.m^{-3} para solos argilosos, 1400 a 1500 kg.m^{-3} para os franco-argilosos e de 1700 a 1800 kg.m^{-3} para os franco-arenosos.

Algumas espécies podem, mesmo em solos compactados, desenvolver o sistema radicular em função das especificidades de cada espécie (ROSOLEM, *et al.*, 2002). Essas diferenças auxiliam na seleção de espécies capazes de crescer em condições adversas e serem utilizadas na recuperação de solos.

Após a morte e decomposição das raízes, o solo fica com uma quantidade maior de bioporos, nos quais ocorrem as trocas gasosas, o fluxo descendente de água e o crescimento das raízes das plantas subsequentes (WILLIAMS e WEIL, 2004).

NAGAOKA, *et al.* (2003) avaliaram a resistência do solo à penetração para 2 tipos de pneus, um radial e outro diagonal, através de ensaios dinâmicos em campo com um equipamento de ensaio de pneu agrícola individual, verificando que para ambos os pneus com a mesma carga radial o incremento do índice de cone foi maior na camada de $0,1$ a $0,2$ m de profundidade que na camada de 0 a $0,1$ m e os valores de índice de cone foram maiores para o pneu diagonal que para o pneu radial, isso pode ser verificado na Figura 23, apresentada por MCKEYS (1985).

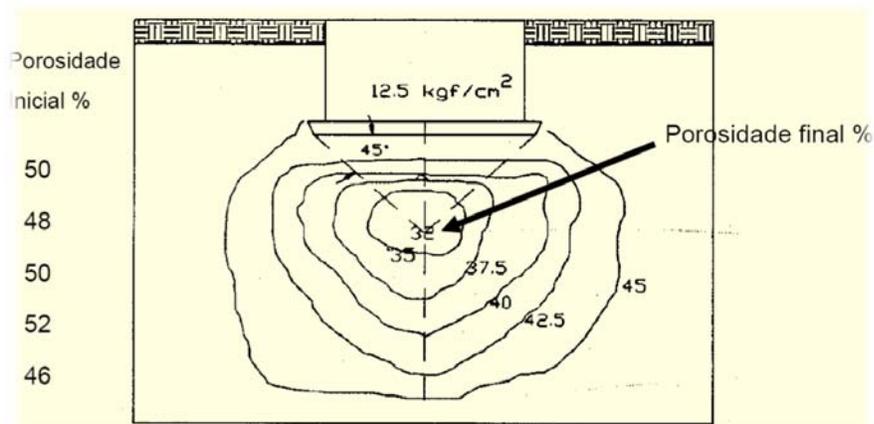


Figura 23. Relação da largura do pneu com a profundidade da compactação máxima.

BOTTA, *et al.* (2008) realizaram ensaios com pneus de tratores radiais e diagonais em cultivo convencional e plantio direto, medindo-se densidade e índice de cone. Para os dois tipos de medições concluíram que a área de contato influencia na compactação superficial do solo, enquanto que a carga radial influencia na compactação em profundidade.

KELLER e ARVIDSSON (2004) obtiveram a mesma conclusão, onde definiram que a pressão interna do pneu possui correlação direta com a compactação superficial, porém não apresenta influência sobre a compactação em profundidade, ou seja, a pressão interna e a rigidez do pneu relaciona-se com o tamanho e o formato da área de contato.

KOGER, *et al.* (1984), realizaram ensaios estáticos em caixa de solos, para avaliar a relação da compactação do solo com as dimensões do pneu. Os autores observaram que pneus maiores, que possuíam uma ampla área de contato compactaram mais que pneus com áreas menores, sendo aplicada a mesma carga radial, isso devido a diferença da capacidade de carga entre os pneus, ou seja, o aumento da capacidade de carga aumenta também a rigidez do pneu e isso faz com que o pneu compacte mais o solo, mesmo com área de contato maior.

Um comparativo entre diferentes tamanhos de pneus e uma esteira de borracha feito por ANSORGE e GODWIN (2008), em caixa de solos, mostrou que mesmo a esteira de borracha possuindo uma largura menor, deformou menos o solo em superfície e em profundidade e apresentou valores de incremento de densidades menores que os pneus, a Figura 24 mostra como os ensaios foram realizados.



Figura 24. Caixa de solos da Universidade de Cranfield, ensaios com esteira (esquerda) e pneu (direita).

MAZETTO, *et al.* (2004) compararam três pneus agrícolas, radial, diagonal e um pneu de baixa pressão e alta flutuação (BPAF), através de ensaios estáticos em caixa de solos e observaram que o pneu BPAF possuía a maior deformação elástica, menor rigidez, fazendo com que a deformação do solo fosse a menor dentre os três pneus, por conseguinte apresentou a maior área de contato e o menor incremento de índice de cone, sendo o pneu diagonal o que apresentou maior deformação do solo, menor área de contato e maior incremento de índice de cone, a Figura 25 mostra a correlação entre área de contato e carga radial para cada pneu.

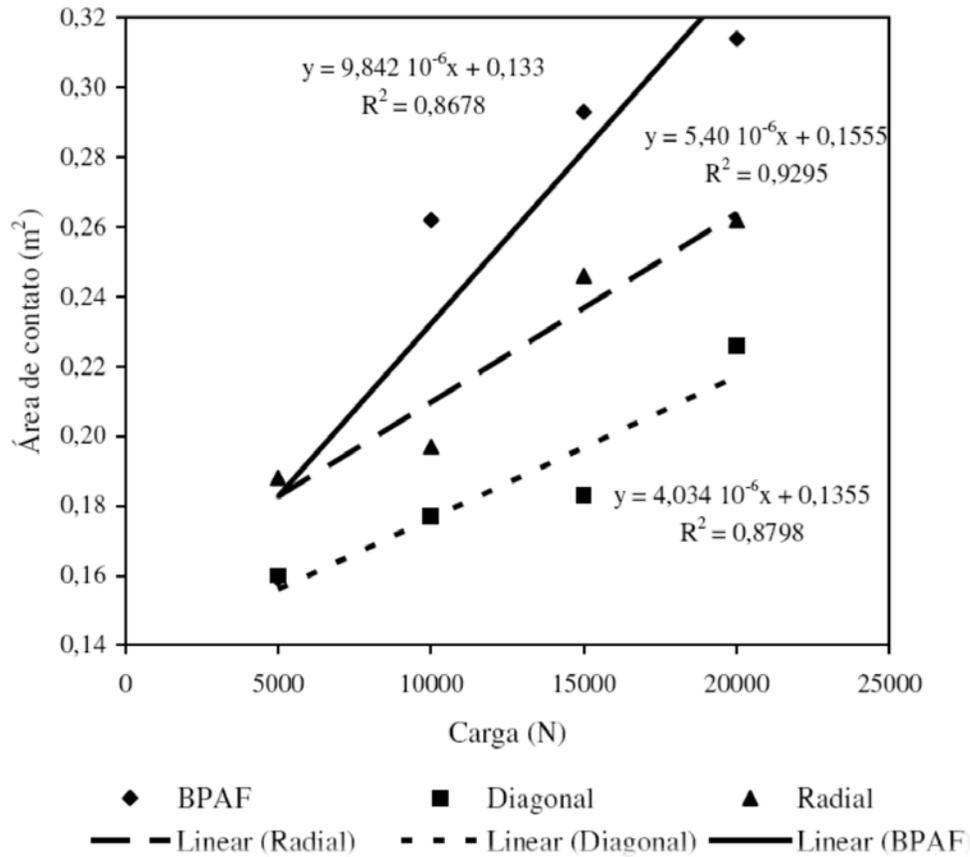


Figura 25. Comportamento da área de contato com o aumento da carga radial, para os três modelos de pneus agrícolas (MAZETTO, *et al.*, 2004).

Pelos gráficos da Figura 25, nota-se que com o aumento da carga radial aumenta-se a área de contato, para qualquer tipo de pneu e que os pneus BPAF e radial, por apresentarem maiores valores de área de contato, representam menor dano ao solo.

Grupos de pesquisa têm trabalhado com problemas relacionados com a interação pneu/solo, seja com experimentos em campo ou em caixa de solos, JÚNIOR, FABBRI, *et al.* (2005) de São Carlos, USP, MAZIERO, *et al.* (1997) e CORRÊA, *et al.* (1999) do IAC-Campinas, e mais recentemente Kleber Lanças da UNESP, Botucatu montou um grupo de pesquisa e tem desenvolvido trabalhos relacionados a avaliação de pneus em solos agrícolas, NAGAOKA, *et al.* (2003), MAZETTO, *et al.* (2004), FILHO, *et al.* (2008), MONTEIRO, *et al.* (2009), e MONTEIRO e LANÇAS (2009).

3. MATERIAL E MÉTODO

Os ensaios foram realizados no laboratório de Projeto de Máquinas Agrícolas e Agricultura de Precisão, LabMAAP, da Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, FEAGRI-UNICAMP, durante os anos de 2010 e 2011, em caixa de solo construída em alvenaria, com 12 m de comprimento, 2 m de largura e 1,5 m de profundidade.

Um carro porta ferramentas tracionado por sistema hidrostático foi utilizado nas operações de preparo de solo e durante os ensaios dos pneus (Figura 27).

3.1. Pneus

Foram ensaiados dois tipos de pneus cedidos pela Pirelli do Brasil, HF-75 com garras (CG) e RA-28 sem garras (SG), cujas características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Características dos pneus ensaiados, especificado pelo fabricante.

Pneu ¹	Modelo	Pressão de inflação (bar)	Medida	Carga máx.(kN) ²	Largura da secção (mm)	Diâmetro externo (mm)	Garras	
							Larg. (mm)	Prof. (mm)
Pirelli	HF-75	3,58	400/60-15,5	29	421	885	30	20
Pirelli	RA-28	4,14	400/60-15,5	31	428	874	--	--

1 – HF-75 – Peso – 387,7 N - 6 Lonas

RA-28 – Peso – 452,2 N - 6 Lonas

2 - As cargas foram consideradas para eixos livres, sem tração.

O pneu HF-75 identificado como CG apresenta a banda de rodagem em forma de “espinha de peixe” é recomendado para utilização em rodas de tração e/ou eixos livres e o RA-28, pneu SG somente para eixos livres, os dois pneus são da linha de alta flutuação do tipo “bias ply”, ou convencional cinturado, mostrados na Figura 26.



Figura 26. Modelos de pneus ensaiados, Pirelli HF-75 (CG) e Pirelli RA-28 (SG).

3.2. Solo

A caixa de solos foi completada com solo de textura média segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1997) e com classificação franco-argilo-arenoso de acordo com o triângulo de classificação textural, e cujas características granulométricas (Anexo A) estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados da análise granulométrica do solo empregado no laboratório de Projeto de Máquinas Agrícolas.

AREIA		ARGILA	SILTE por dif.
Grossa	Fina		
		Total	
		g.kg ⁻¹	
180,0	377,0	557,0	110,5

As características mecânicas do solo foram determinadas através de ensaios específicos apresentando os seguintes resultados:

1. Para os limites de Atterberg ou limite de consistência do solo, realizado segundo a norma NBR 7180 (Anexo B).

Limite de Liquidez (LL) = 25,4 %

Limite de plasticidade (LP) = 17,31 %

Índice de Plasticidade 8,09, o que o caracteriza como mediamente plástico.

2. Ensaio de Proctor normal, realizado segundo a norma brasileira NBR 7182 (Anexo C).
 - a) Umidade ótima de compactação 14,5 %.
 - b) Compactação máxima do solo 1720 kg.m^{-3} .

3. Propriedades físicas do solo. Obtido em ensaio triaxial de compressão estático em laboratório (Anexo D).
 - a) Coesão de 216,2 kPa
 - b) Ângulo de atrito interno das partículas do solo de $54,7^\circ$.

Essa escolha de solo partiu do princípio de que possuísse uma quantidade de argila e areia intermediários, pois embora na caixa de solos não seja possível reproduzir a estrutura encontrado no campo, solos de textura média são bastante representativo no estado de São Paulo.

3.3. Equipamentos para Ensaio e Aquisição de Dados

Os ensaios estáticos são caracterizados pela aplicação de carga vertical sem que haja movimentação do pneu sobre o solo. Dessa forma foi construído um implemento, estrutura amarela Figura 27, para suporte da roda na parte inferior e do lastro na parte superior, sendo fixado por um sistema de três pontos ao carro porta ferramentas, já existente na caixa de solos.

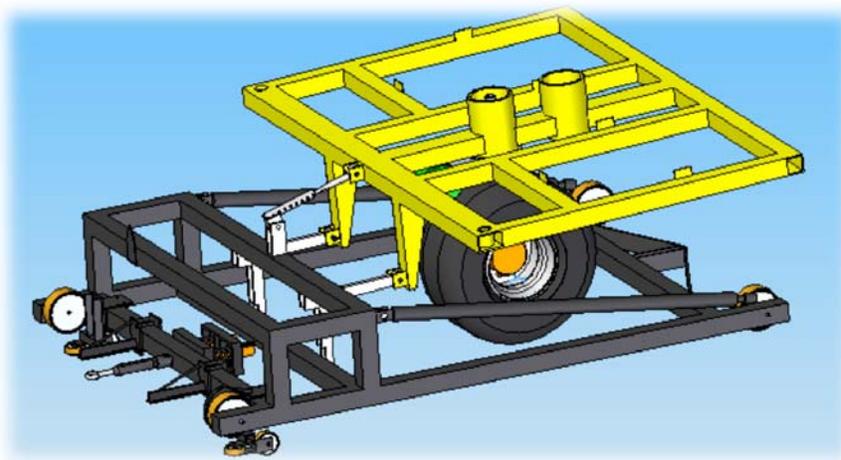


Figura 27. Montagem virtual do equipamento, com a roda na parte inferior e fixação ao carro porta ferramentas.

O implemento é suportado por um conjunto de três cilindros hidráulicos que garantem a aplicação da carga vertical sobre o pneu e o carro porta ferramentas desloca-se horizontalmente sobre trilhos percorrendo os 12 m da caixa de solo, sendo tracionado por cabos de aço ligados a um motor hidráulico. Em cada cilindro foi montado uma célula de carga com capacidade de 50 kN (modelo Type U10M, HBM, Darmstadt, Alemanha), previamente aferida e calibrada, que permitia a leitura da carga através do sistema de aquisição de dados (modelo Quantum MX840, HBM, Darmstadt, Alemanha). Na parte superior do implemento foram adicionados lastros até atingir o valor equivalente a 100% da carga máxima recomendada para os pneus trativos, Figura 28.

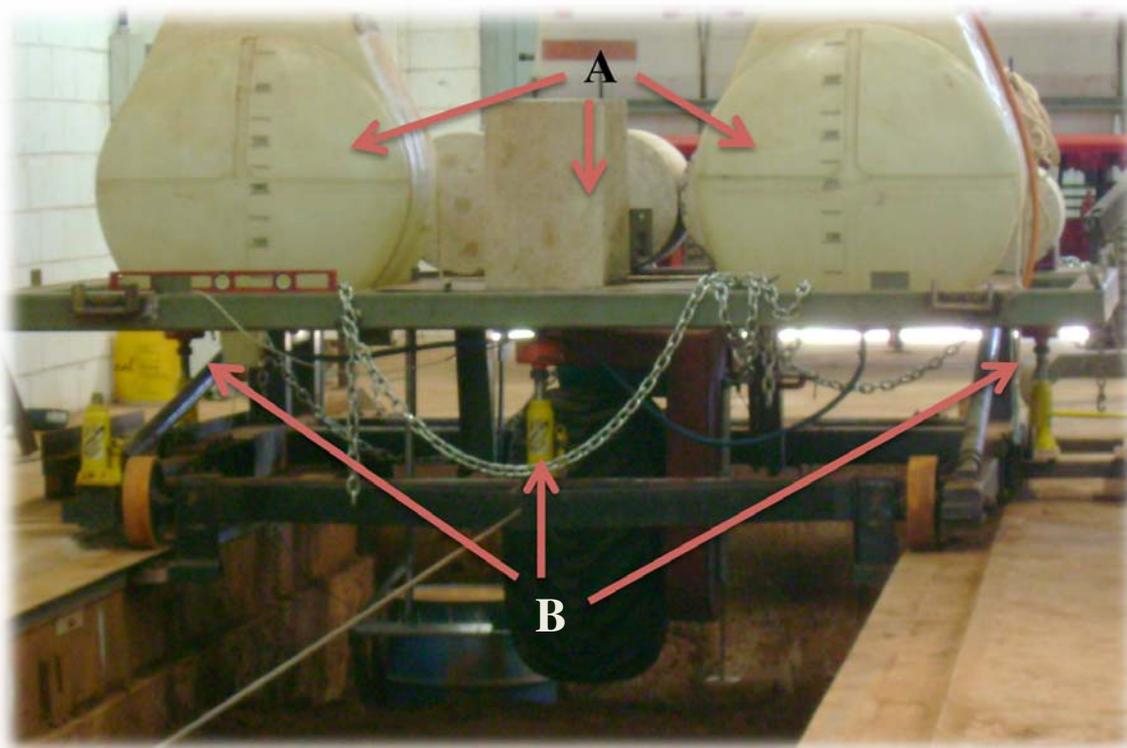


Figura 28. Equipamento para realização dos ensaios estáticos de pneus em caixa de solos, A – Lastros e B – cilindros hidráulicos e células de carga.

Os parâmetros medidos nos ensaios (Figura 29), são correspondentes à deformação, tanto do solo quanto total, a deformação total foi medida pelo sensor de deslocamento vertical, alinhando-o com a rodagem do pneu, sendo registrada a deformação do momento em que o pneu tocou o solo até o ponto em que atingiu-se a carga radial desejada e a deformação do solo foi medida após o ensaio.

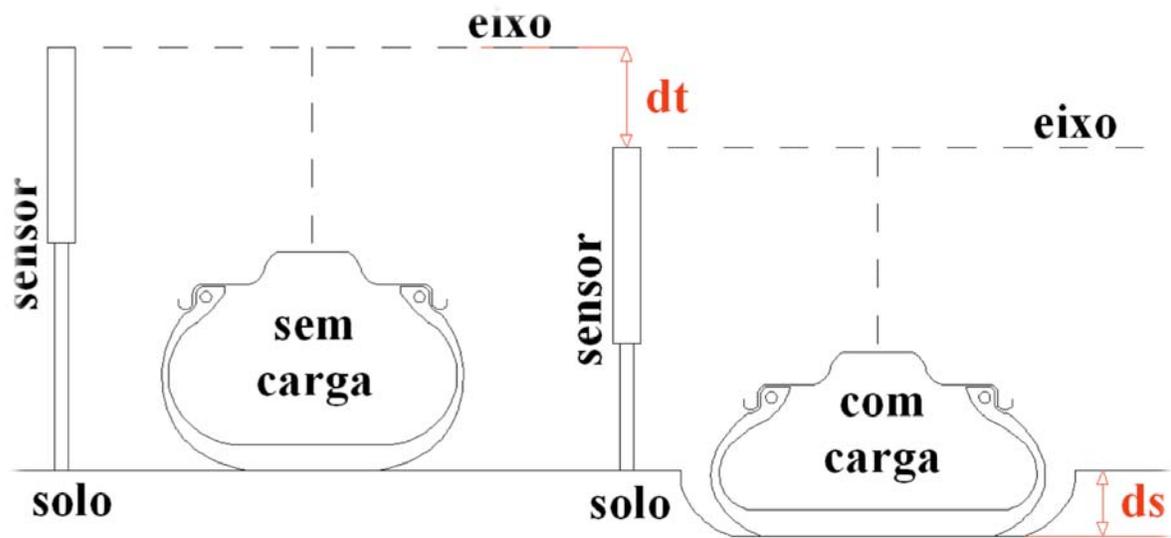


Figura 29. Parâmetros medidos durante os ensaios do pneu, ds – deformação do solo e dt – deformação total.

A deformação total foi determinada acoplando-se à linha de centro vertical da roda um transdutor linear de deslocamento, modelo PC-M-0450, GEFTRAN, Provaglio d'Iseo, Itália, Figura 30.



Figura 30. Dispositivos para determinar a deformação total e lateral do pneu.

O valor da deformação do solo foi determinada utilizando-se um perfilômetro construído para este fim, Figura 31.

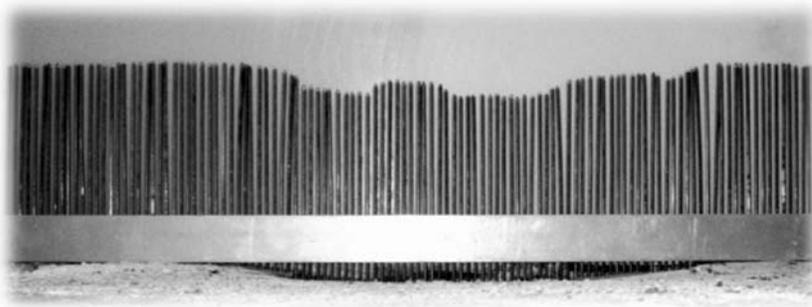


Figura 31. Perfilômetro utilizado para medir a deformação do solo.

Para se determinar a resistência à penetração utilizou-se um penetrômetro automático, modelo PLG5200 SOLOTRACK, marca FALKER, Porto Alegre, (Figura 32), que apresenta sempre velocidades constantes de penetração gerando dados mais precisos.



Figura 32. Penetrômetro automático SOLOTRACK da FALKER.

A coleta da densidade do solo foi realizada de forma aleatória dentro da área de contato a dois níveis de profundidades, extraídas com anéis amostradores. As umidades em base seca foram obtidas através de secagem em estufa (Figura 33).



Figura 33. Anéis amostradores de densidade.

3.4. Metodologia dos Ensaiois

3.4.1. Ensaio em Superfície Rígida

Realizou-se primeiramente um teste de carga radial sobre superfície rígida, para caracterização da estrutura de cada pneu, com a utilização de uma placa X3 PX 200 da XSENSOR Technology Corporation, Calgary, Canada, capaz de armazenar a pressão de contato e a área sobre a qual se distribui, em função da carga aplicada.

3.4.2. Preparo do Solo

O solo foi preparado segundo metodologia descrita por BIANCHINI (2002) Antes de se iniciar os procedimentos para a compactação do solo, faz-se a retirada de todo o material que estava contido na caixa, e procede-se a compactação em camadas de 50 mm até a altura de aproximadamente 1 m.

Prepara-se o solo com umidade de aproximadamente 12%, para posteriormente umidificá-lo até a umidade ideal de compactação determinada pelo ensaio de Proctor (14,5%).

3.4.3. Cargas de Ensaio

Foram aplicados 2 níveis de cargas, 16 e 29 kN correspondentes a 55 e 100% respectivamente da capacidade de carga do modelo de pneus CG com a pressão interna de 3,58 bar.

3.4.4. Áreas de Contato

A área de contato pneu-solo foi fotografada com uma máquina digital W30, Sony, e mensurada através de recurso gráfico, AUTOCAD, como ilustra a Figura 34, fazendo-se a conversão de escalas em relação a área do retângulo, medindo-se a área de contato plana, produzida pelas garras, desconsiderando-se a área do fundo íncavo (área efetiva), e a área total de contato.



Figura 34. Determinação da área de contato pneu-solo, a área do retângulo é de $0,39 \text{ m}^2$.

3.4.5. Determinação da Resistência à Penetração (RP)

Cada caixa de solo foi preparada com 8 metros de comprimento e permite a realização de

oito ensaios (Figura 35).

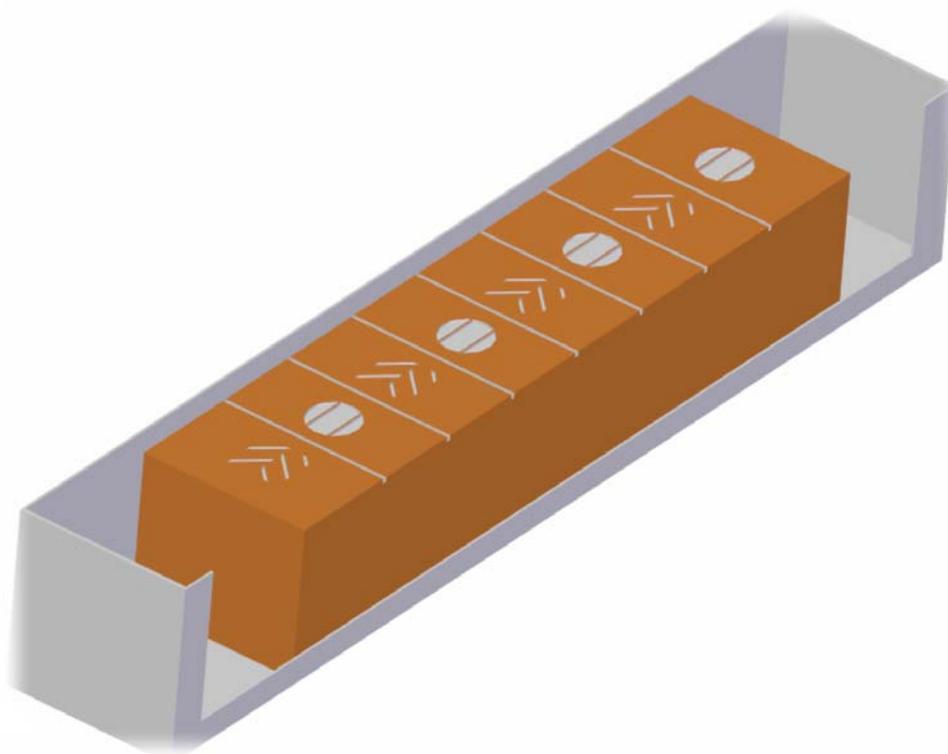


Figura 35. Divisão da caixa de solos para realização dos ensaios.

Para a determinação da alteração da estrutura do solo devido à carga aplicada pelo pneu após os ensaios, determina-se a resistência à penetração através de amostras regularmente espaçadas nos pontos de contato da garra com o solo, até a profundidade de 0,2 m.

Os pontos amostrados antes dos ensaios são coletados entre as zonas de ensaio, para que não deformem a superfície do solo onde é aplicada a carga no pneu, sendo três pontos alinhados entre as zonas de ensaio, resultando em um total de 21 pontos amostrais.

Realizados os ensaios, os pontos de amostragem concentram-se na região da área de contato, sendo aleatórias as posições nos quatro quadrantes da área de contato, totalizando 32 pontos de amostras (Figura 36).

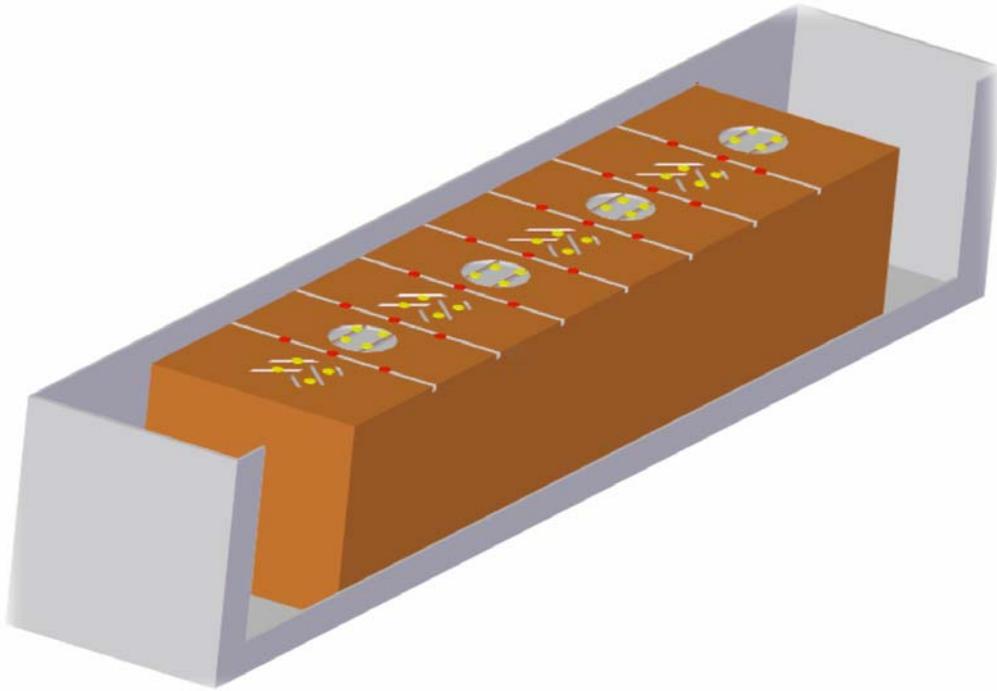


Figura 36. Pontos de amostras de IC, na área de contato e entre os ensaios.

3.4.6. Densidade

Para verificação da alteração da densidade do solo devido à carga aplicada pelos pneus, como trata-se de ensaio invasivo realizou-se duas amostras aleatórias na área de contato e uma amostra por bloco de ensaio antes da aplicação da carga pelo pneu para 2 níveis de profundidade (Figura 37).

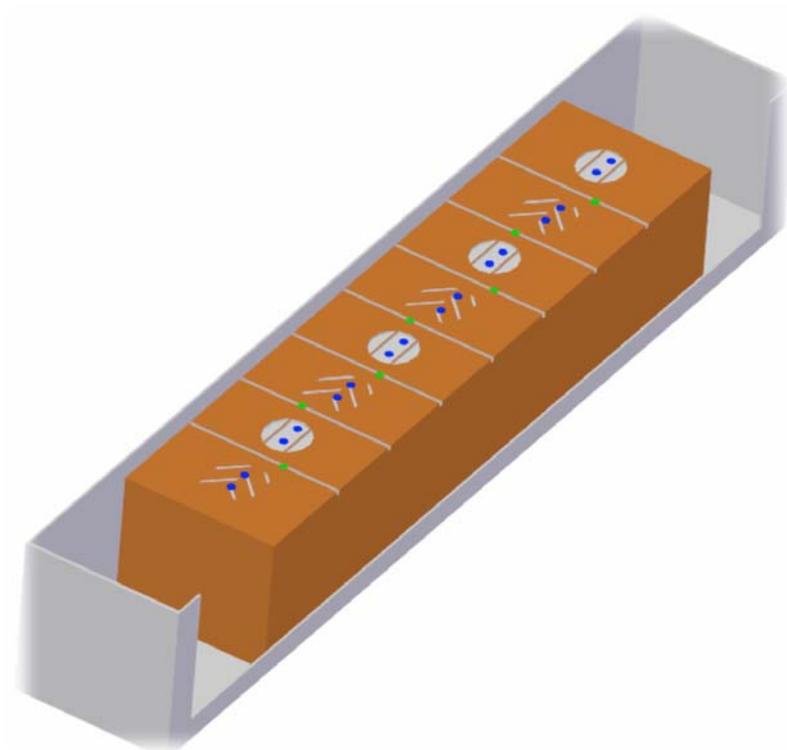


Figura 37. Amostras de densidade, na área de contato e na região entre os ensaios.

3.4.7. Delineamento Estatístico

A análise fatorial do experimento é 2×2 , sendo 2 pneus, 2 cargas e 8 repetições, totalizando 32 visualizações.

Foram preparadas 4 caixas no total, sendo utilizado o teste de médias de Tukey a 95% de confiabilidade, através do programa Statgraphics centurion.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Ensaio em Superfície Rígida

4.1.1. Deformações

Os resultados do ensaio de deformação dos pneus SG e CG sobre superfície rígida são apresentados na Figura 38, onde é possível observar que o pneu CG para uma mesma carga aplicada possui uma maior deformação em consequência de sua menor rigidez estrutural.

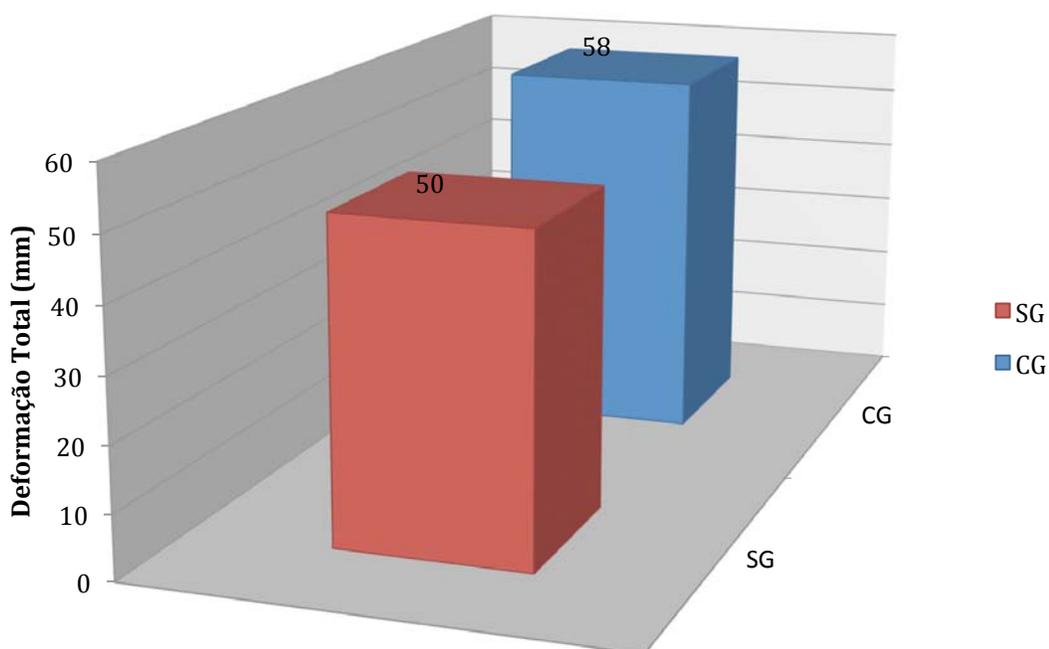


Figura 38. Deformações totais dos pneus SG e CG sobre superfície rígida para a carga de 29 kN.

A menor rigidez do pneu pode implicar em uma compactação menor, como mostram KOGER, *et al.* (1984), KELLER e ARVIDSSON (2004) e ARVIDSSON e KELLER (2007) correlacionando o tamanho da área de contato, com deformações e rigidez.

4.1.2. Área de Contato

Esse ensaio mostra o comportamento da distribuição da carga do pneu sobre a superfície rígida, sendo que sem a deformação da superfície a região entre garras do pneu trativo não entra em contato com ela, ou seja, a distribuição da carga não ocorre sobre a área total.

A Figura 39 apresenta o gráfico de variação da área de contato em função da carga radial sobre superfícies rígidas. Dessa forma é possível verificar o comportamento do pneu sobre carga dinâmica, o incremento da pressão e da área de contato sobre a superfície devido o aumento da carga radial.

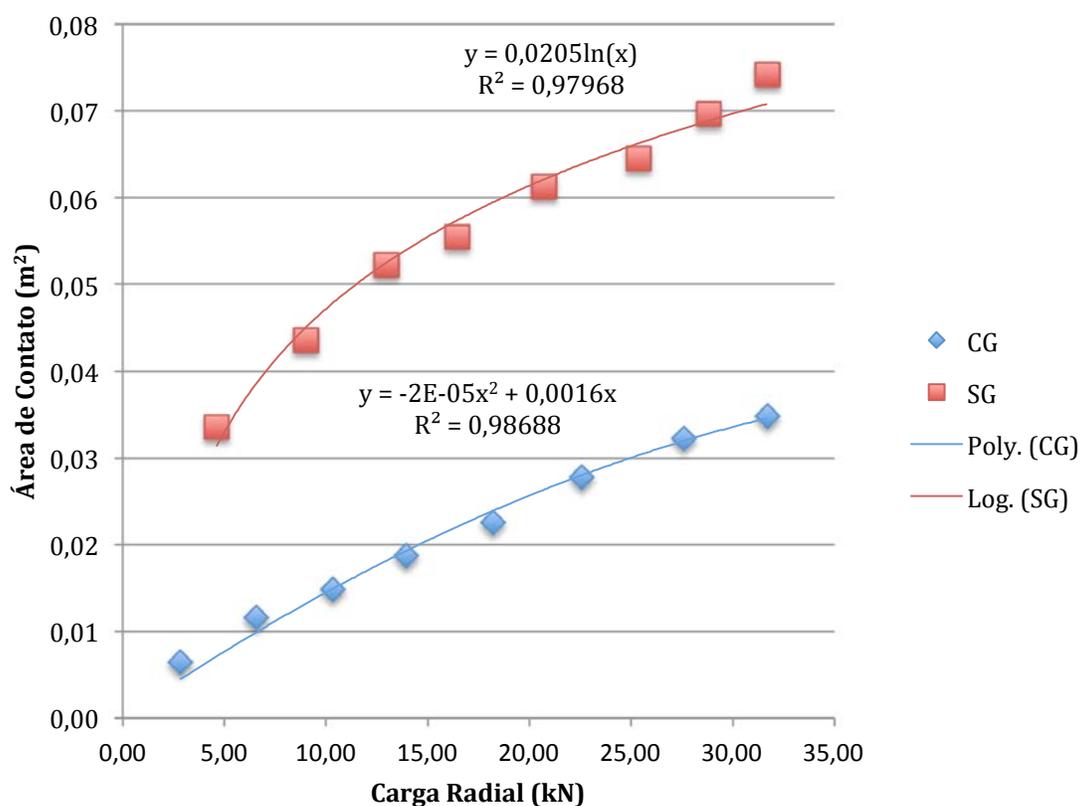


Figura 39. Estudo do incremento da área de contato efetiva devido o incremento da carga radial de 0 a 31 kN.

A área de contato de cada pneu em função da carga radial, em superfície rígida, varia conforme uma equação logarítmica para o pneu SG e polinomial de grau 2 para o pneu CG.

Observa-se que em superfície rígida a área de contato efetiva do pneu SG é sempre maior

que o pneu CG. A Figura 40 apresenta uma fotografia da área de contato e distribuição das pressões para a carga de 29 kN, onde pode-se observar que a área de contato efetiva do pneu CG é significativamente menor, devido sua relação de cheio e vazio (garra e entre garra).

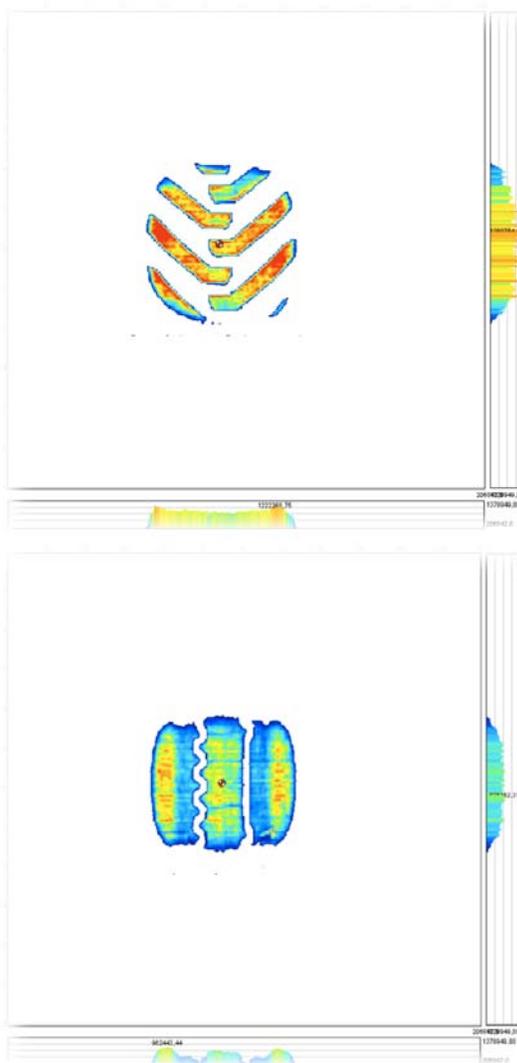


Figura 40. Imagem da área de contato e pressões para a carga de 29 kN em superfície rígida, pneu CG acima e pneu SG abaixo.

Na Figura 41 é possível notar que as pressões de contato são maiores para o pneu CG que para o pneu SG. Neste ensaio observou-se que a pressão de contato média do pneu SG foi de 636 kPa enquanto que a do pneu CG foi de 986 kPa, isso deve-se ao tamanho da área de contato, essa relação foi observada em vários trabalhos como ARVIDSSON e KELLER (2007), ANSORGE e GODWIN (2007) e BOTTA, *et al.* (2008).

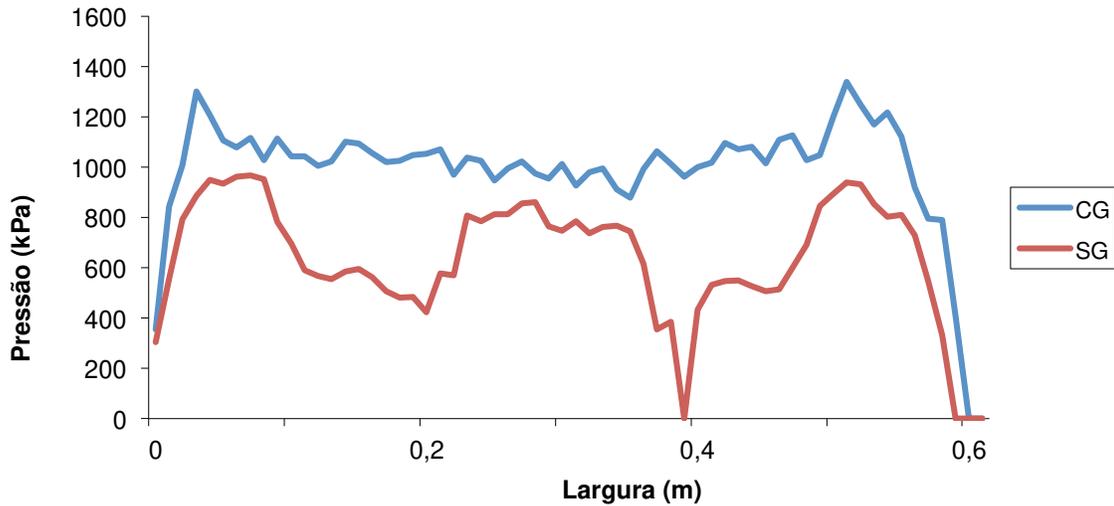


Figura 41. Pressão média ao longo do perfil da área de contato para os pneus SG e CG com carga radial de 29 kN.

O pneu SG possui uma área cheia, já o pneu CG possui uma área com vazios, que são as regiões entre garras, que não tocam a superfície.

4.2. Ensaio em Superfície Deformável

4.2.1. Deformações

Sobre superfície deformável fez-se o levantamento das deformações dos pneus, para se correlacionar a rigidez do pneu com o tamanho da área de contato e a deformação do solo para ser correlacionada com a compactação.

A Figura 42 mostra a deformação apresentada pelo solo e a deformação total do conjunto de pneu para cada carga aplicada. Observa-se que o ponto de equilíbrio varia em função do tipo de pneu. GENT e WALTER (2005) definem o ponto de equilíbrio como o ponto onde a pressão de reação do solo se iguala a pressão interna do pneu.

Observa-se que a diferença de deformação do solo para um mesmo tipo de pneu em função

da carga aplicada é cerca de 10%. Essa deformação relaciona-se a capacidade de suporte de carga do solo (intrínseca as suas propriedades físicas) e atinge o valor próximo a seu limite com 55% da carga máxima dos pneus, sendo que com o incremento da carga para 100% não se observa um aumento significativo dessa deformação.

Com relação a deformação total, observa-se que esta apresenta valores significativamente maiores em função das cargas e tipo de pneu.

Com 55% da carga a deformação total é praticamente a mesma que a deformação do solo, não sendo suficiente para deformar os pneus. Quando se aplicou carga máxima a deformação total para o pneu CG foi maior que a deformação total provocada pelo pneu SG em consequência da maior rigidez estrutural do pneu SG.

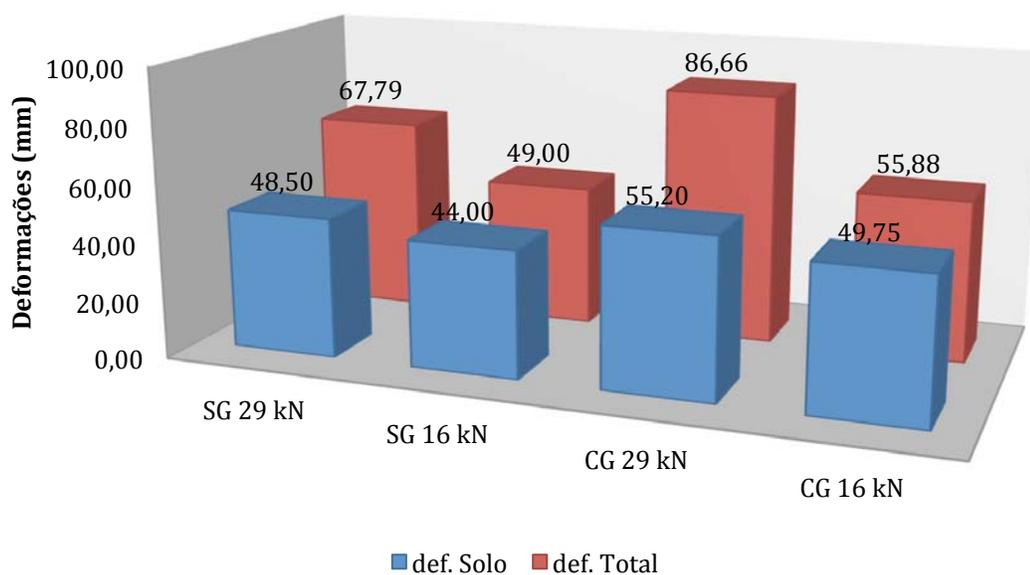


Figura 42. Deformações totais e deformação do solo.

Tabela 5 apresenta os resultados da análise de variância da deformação do solo em função da carga aplicada. Observa-se que a deformação do solo não é função da carga aplicada, nem do tipo de pneu, a 95% de confiabilidade ($p > 0,05$).

Tabela 5. Análise da variância (ANOVA) para deformação do solo em função da carga aplicada e tipo de pneu.

<i>Fontes</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
FATORES					
A:Carga	99.0025	1	99.0025	2.43	0.1453
B:Pneu	155.003	1	155.003	3.80	0.0750
INTERAÇÕES					
AB	0.9025	1	0.9025	0.02	0.8842
RESIDUO	489.61	12	40.8008		
TOTAL	744.518	15			

A Figura 43 mostra a interação entre os valores das deformações do solo.

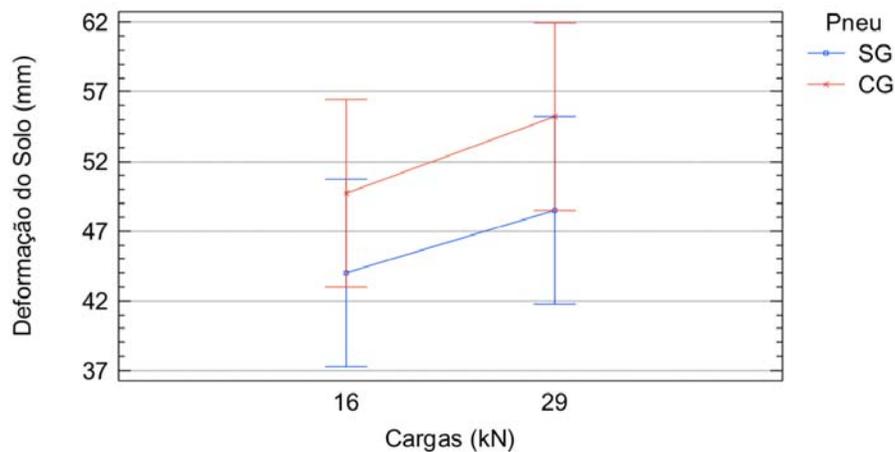


Figura 43. Diferença estatística entre os valores de deformação do solo.

Tabela 6 apresenta os resultados da análise de variância para a deformação total do conjunto solo e pneu em função da carga aplicada e do tipo de pneu. Observa-se que a deformação total apresenta diferenças estatísticas com 95% de confiabilidade ($p < 0,05$) tanto para carga quanto para o tipo de pneu.

Tabela 6. Análise da variância (ANOVA) para deformação total.

Fontes	Soma dos Quadrados	Gl	Quadrado Médio	F-Ratio	P-Value
FATORES					
A:Carga	2456.19	1	2456.19	187.88	0.0000
B:Pneu	662.805	1	662.805	50.70	0.0000
INTERAÇÕES					
AB	143.76	1	143.76	11.00	0.0062
RESIDUO	156.877	12	13.0731		
TOTAL	3419.64	15			

Para a carga de 16 kN, as deformações totais não apresentam diferença estatística, por serem muito próximas à deformação do solo, porém com o aumento da carga para 29 kN, tem-se a influência da deformação dos pneus, havendo significativa diferença entre os valores a um nível de 95% de confiabilidade pelo teste de TUKEY (Figura 44).

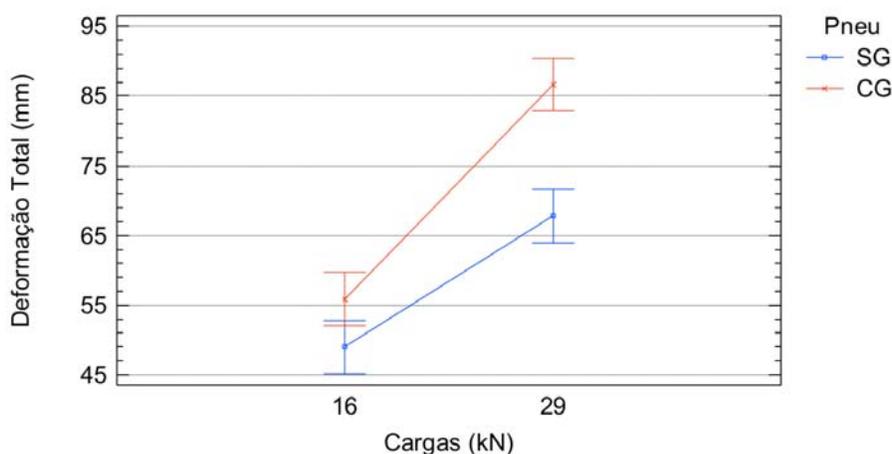


Figura 44. Diferença estatística entre as interações de deformação total.

Essa diferença estatística nas deformações totais está relacionada com a rigidez dos pneus, tendo em vista que o pneu CG possui uma rigidez menor que a do pneu SG.

A deformação do pneu pode ser útil para se diminuir a resistência ao rolamento e até mesmo para diminuir a compactação do solo (ANSORGE e GODWIN, 2007).

4.2.2. Área de Contato

A área de contato do pneu sobre superfície deformável não é plana, porém fez-se a projeção da área sobre um plano horizontal, medindo-se a área efetiva, somente do topo das garras e a área total, que inclui a região entre garras.

A Figura 45 mostra que a área efetiva do pneu CG é cerca de 50% menor que a do pneu SG, em qualquer carga.

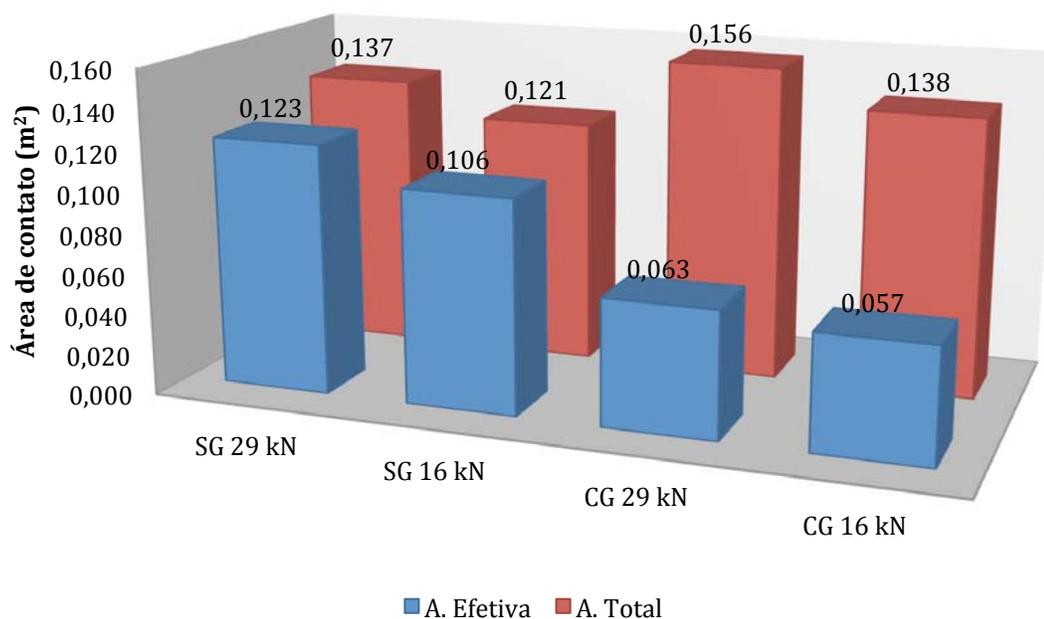


Figura 45. Áreas efetivas e áreas totais.

A análise da variância ANOVA (Tabela 7) mostra diferença significativa ($p < 0,05$) para os fatores carga e pneu e para a interação entre eles em área efetiva.

Para o pneu SG nota-se diferença estatística entre carga e entre pneu e para o pneu CG há diferença somente entre pneu, pois mesmo com o aumento da carga a área efetiva não aumentou significativamente.

Tabela 7. Análise da variância (ANOVA) para área efetiva.

<i>Fontes</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
FATORES					
A:Carga	0.00055225	1	0.00055225	29.65	0.0001
B:Pneu	0.0119903	1	0.0119903	643.77	0.0000
INTERAÇÕES					
AB	0.000144	1	0.000144	7.73	0.0166
RESIDUO	0.0002235	12	0.000018625		
TOTAL	0.01291	15			

Como mostrado em superfícies rígidas a área efetiva do pneu CG é menor devido a sua relação de cheio e vazio em função das garras, isso faz com que a área do pneu SG seja maior em todas as cargas, com diferenças significativas ($p < 0,05$) (Figura 46).

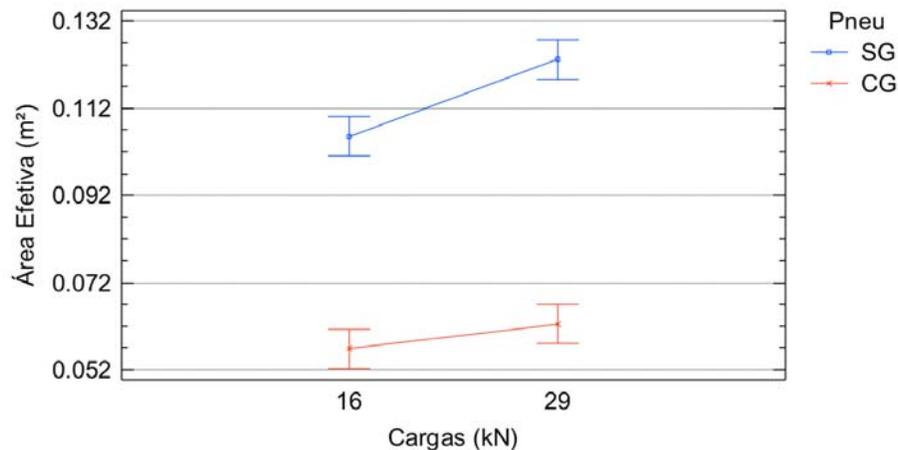


Figura 46. Interações entre pneu e carga para área efetiva.

Para as áreas totais há diferença estatística para os fatores carga e pneu (Tabela 8), para ambas as cargas (Figura 47) e novamente o pneu CG apresentou um maior incremento de área para o mesmo aumento de carga, como observado nas deformações.

A grande flexibilidade do pneu CG permite que aumente sua área de contato total com o aumento da carga radial com mais facilidade que o pneu SG.

Tabela 8. Análise da variância (ANOVA) para área total.

Fontes	Soma dos Quadrados	Gl	Quadrado Médio	F-Ratio	P-Value
FATORES					
A:Carga	0.001156	1	0.001156	18.94	0.0009
B:Pneu	0.001225	1	0.001225	20.07	0.0008
INTERAÇÕES					
AB	0.00000225	1	0.00000225	0.04	0.8510
RESIDUO	0.0007325	12	0.0000610417		
TOTAL	0.00311575	15			

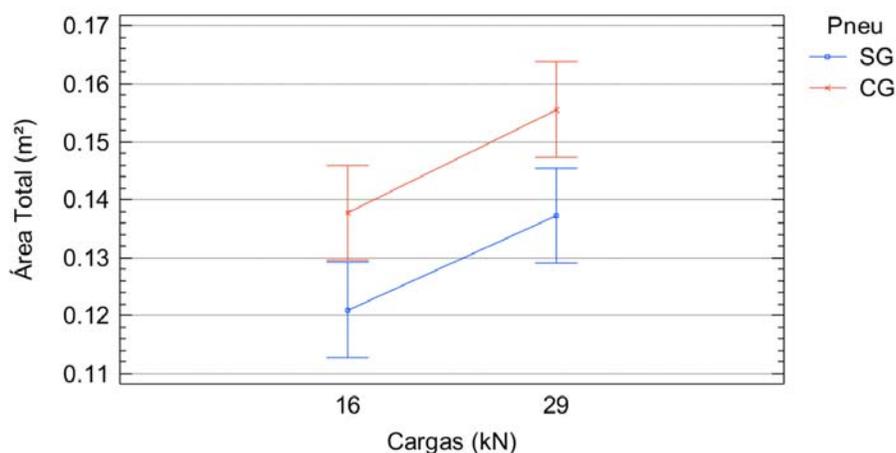


Figura 47. Diferença estatística entre os valores de área total.

As áreas apresentam pequena diferença significativa já a 55% da carga nominal, porém com o aumento da carga para 100% tem-se um maior aumento da área do pneu CG que do pneu SG, acentuando ainda mais a diferença estatística.

4.2.3. Compactação do Solo

4.2.3.1. Incremento do Índice de Cone (IC)

Através de medição indireta da compactação, índice de cone, pode-se comparar o aumento da resistência à penetração no solo provocado pelos pneus SG e CG, correlacionando com as áreas de contato.

Para a carga de 29 kN o pneu SG apresentou maior incremento do IC nas 2 profundidades.

Com uma carga radial de 16 kN as curvas de incremento do IC até a primeira camada de 0,1 m, são bastante próximas para ambos os pneus, sendo diferenciada para a camada de 0,2 m, onde o incremento gerado pelo pneu SG foi maior (Figura 48).

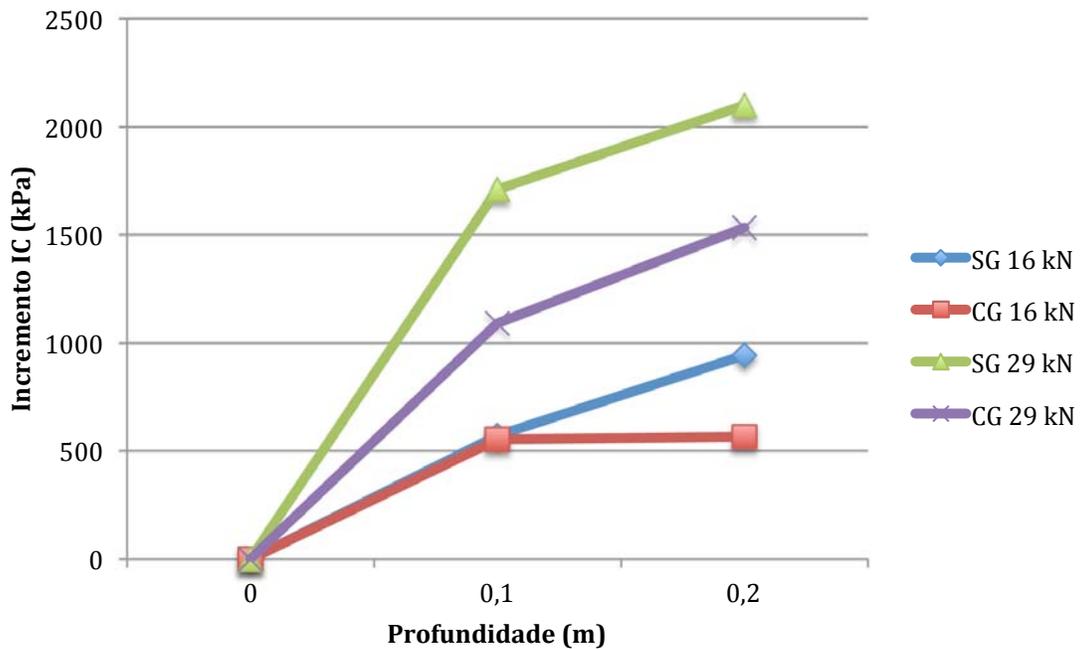


Figura 48. Incremento do índice de cone em 2 níveis de profundidade.

Pela análise de variância dos dados, é possível observar que houve diferença estatisticamente significativa entre os valores médios do IC para os fatores carga e tipo de pneu, assim como para a interação carga-pneu (Tabela 9).

Tabela 9. Análise da variância (ANOVA) para o incremento IC de 0 a 0,1 m.

Fontes	Soma dos Quadrados	Gl	Quadrado Médio	F-Ratio	P-Value
FATORES					
A:Carga	2.79356E6	1	2.79356E6	122.96	0.0000
B:Pneu	405635.	1	405635.	17.85	0.0012
INTERAÇÕES					
AB	362079.	1	362079.	15.94	0.0018
RESIDUO	272640.	12	22720.0		
TOTAL	3.83392E6	15			

Para a camada de 0,1 m na carga de 16 kN não houve diferença estatística entre os pneus, porém para a carga de 29 kN o incremento de IC gerado pelo pneu SG foi muito maior que o incremento do pneu CG, sendo significativa a diferença ($p < 0,05$) pelo teste de TUKEY, pela Figura 49 é possível visualizar como o aumento da carga de 55% para 100%, fez com que o pneu SG aumentasse muito seu incremento de IC na primeira camada.

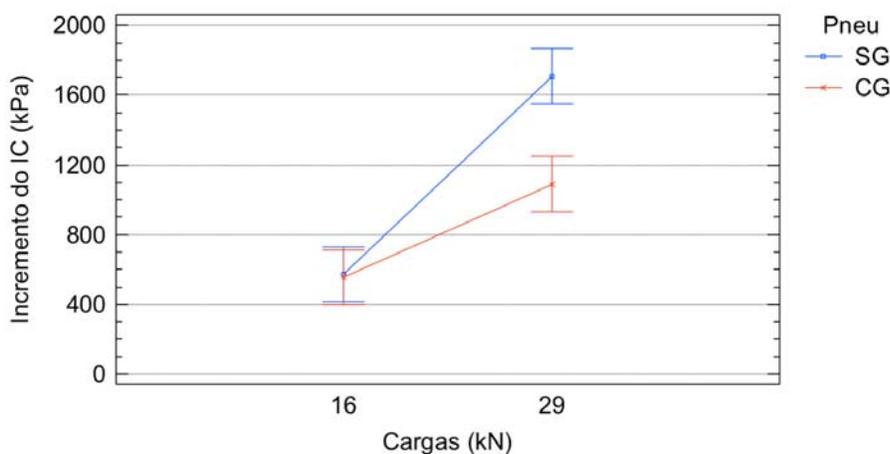


Figura 49. Incremento do IC para camada de 0 - 0,1 m em função da carga aplicada e tipo de pneu.

Na profundidade de 0,2 m, novamente, para a carga de 16 kN os pneus não apresentaram diferença estatística para os valores médios do IC, mas para 29 kN, o incremento do IC proporcionado pelo pneu SG foi novamente maior (Tabela 10).

Tabela 10. Análise da variância para incremento do IC de 0,1 a 0,2 m.

Fontes	Soma dos Quadrados	Gl	Quadrado Médio	F-Ratio	P-Value
FATORES					
A:Carga	4.52589E6	1	4.52589E6	74.12	0.0000
B:Pneu	888306.	1	888306.	14.55	0.0025
INTERAÇÕES					
AB	35768.3	1	35768.3	0.59	0.4588
RESIDUO	732729.	12	61060.8		
TOTAL	6.1827E6	15			

A 55% da capacidade de carga dos pneus o incremento do IC foi praticamente o mesmo, já para 100% da carga o pneu SG apresentou maior incremento, comparado ao pneu CG, análise feita a um nível de confiabilidade de 95%, pelo teste de TUKEY, porém esse aumento não foi na mesma proporção que na primeira camada, como mostra a Figura 50.

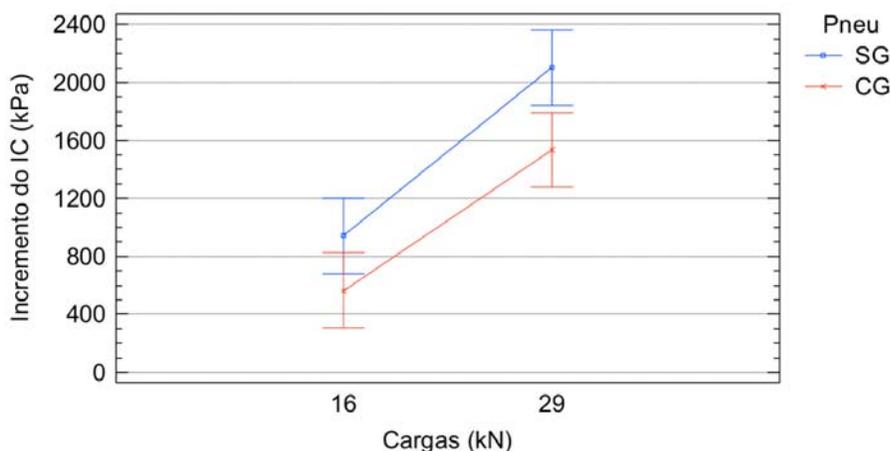


Figura 50. Incremento do IC para camada de 0,1 - 0,2 m em função da carga aplicada e tipo de pneu.

4.2.3.2. Incremento da Densidade

Como medição direta da compactação do solo devido a aplicação da carga radial dos pneus SG e CG, fez-se amostragem de densidade, para que fosse também correlacionado com a área de contato dos pneus.

Os dados obtidos mostram que os incrementos de densidade foram próximos para os pneus na carga de 16 kN, e não diferiram estatisticamente do pneu CG na carga de 29 kN, para as 2 profundidades.

Enfatiza-se o pneu SG com a carga radial de 29 kN, que apresentou o maior incremento em ambas as profundidades como mostra a Figura 51.

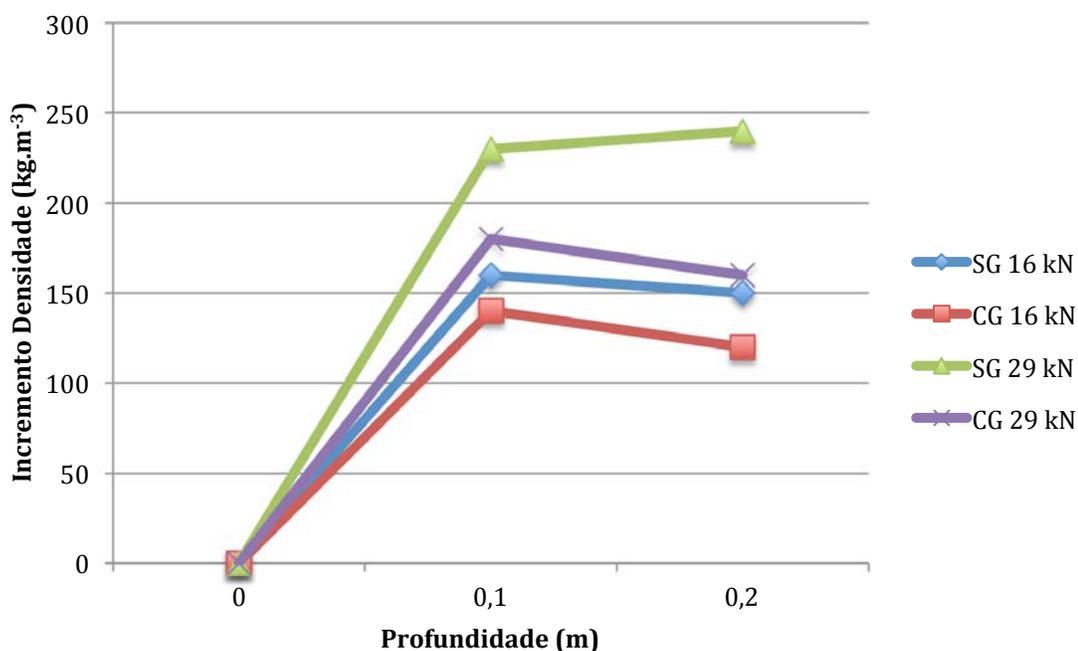


Figura 51. Incremento de densidade em 2 níveis de profundidade.

Pela análise da variância dos valores de incremento de densidade para a primeira camada (Tabela 11), observa-se que há diferença estatística para os valores médios do incremento da densidade para os fatores carga e tipo de pneu, mas não há diferença estatística entre os valores médios do incremento de densidade para o fator tipo de pneu à mesma carga.

Tabela 11. ANOVA do incremento de densidade na primeira camada.

<i>Fontes</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
FATORES					
A:Carga	10506.3	1	1050.63	14.37	0.0026
B:Pneu	6006.25	1	6006.25	8.21	0.0142
INTERAÇÕES					
AB	1056.25	1	1056.25	1.44	0.2526
RESIDUO	8775.0	12	731.25		
TOTAL	26343.8	15			

Para a primeira camada de 0 a 0,1 m, os valores de incremento não se diferenciaram entre os pneus para a mesma carga, pois os pneus SG e CG a 16 kN não apresentaram diferença estatística, assim como os pneus SG e CG a 29 kN, mas o pneu SG a 29 kN apresentou diferença significativa em relação aos valores na carga de 16 kN (Figura 52).

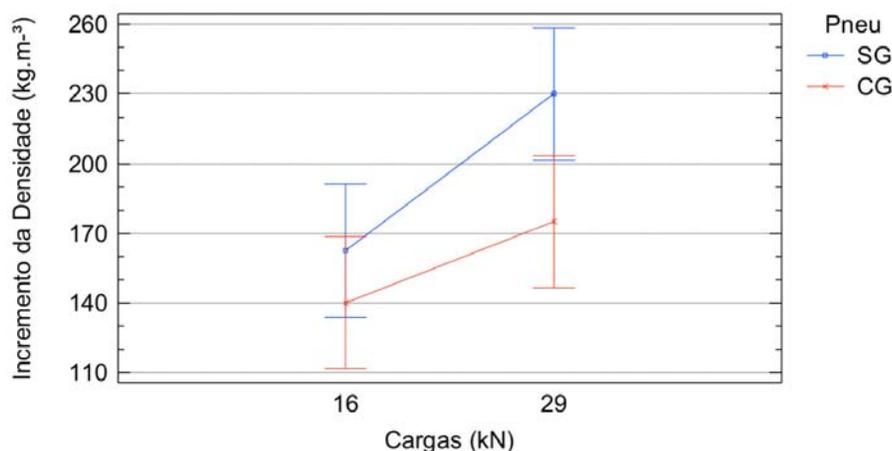


Figura 52. Incremento da densidade do solo na camada de 0 - 0,1 m em função da carga aplicada e tipo de pneu.

A 0,2 m os pneus SG e CG a 16 kN e CG a 29 kN, não apresentam diferença estatística entre si, porém o pneu SG a 29 kN, apresentou diferença em relação aos dois pneus a carga de 16 kN e também em relação ao pneu CG na mesma carga (Tabela 12).

Tabela 12. Análise da variância do incremento de densidade na segunda camada.

Fontes	Soma dos Quadrados	Gl	Quadrado Médio	F-Ratio	P-Value
FATORES					
A:Carga	18906.3	1	18906.3	15.10	0.0022
B:Pneu	11556.3	1	11556.3	9.23	0.0103
INTERAÇÕES					
AB	2756.25	1	2756.25	2.20	0.1637
RESIDUO	15025.0	12	1252.08		
TOTAL	48243.8	15			

Como observado no incremento de IC, os pneus não apresentam diferenças a 55% de sua carga, porém a 100% o pneu SG, novamente, apresentou o maior incremento de densidade, sendo significativo em relação ao pneu CG, como mostra a Figura 53.

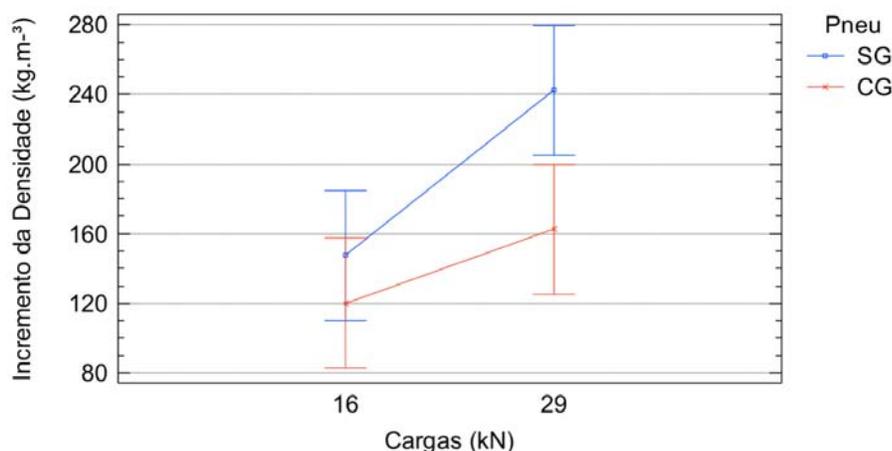


Figura 53. Incremento da densidade do solo na camada de 0,1 - 0,2 m em função da carga aplicada e tipo de pneu.

Apesar de se observar diferença estatística para a camada de 0,2 m, quando analisado os pneus a um mesmo nível de carga, fica evidente que, com o mesmo aumento de carga radial, o pneu SG aumenta muito mais a compactação do solo que o pneu CG.

Como no trabalho de KOGGER, *et al.* (1984), os dois pneus, com as mesmas dimensões, diferenciam-se na compactação do solo.

4.3. Correlação dos Parâmetros

As Figura 38 e 42 mostram que o pneu SG possui uma rigidez maior que o pneu CG, pois com a mesma carga radial a deformação do pneu SG foi menor, isso é explicado pelo fato de apresentar uma quantidade de composto de borracha maior na banda de rodagem, que o pneu CG, como mostra a Figura 54.

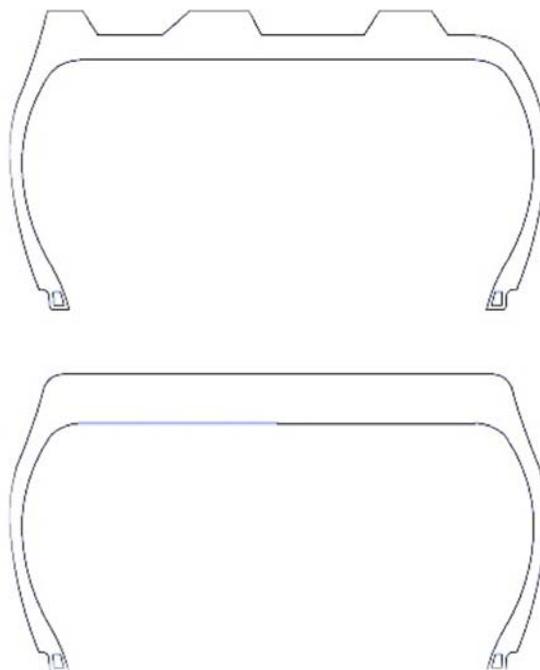


Figura 54. Diferenças entre as seções dos pneus CG e SG.

Essa quantidade de borracha na banda de rodagem, além de aumentar o peso do pneu, como visto na Tabela 3, faz com que diminua sua flexibilidade, já os vazios das regiões entre garras do pneu CG, representa uma redução de material, conseqüentemente do peso e aumento da flexibilidade.

KOGER, *et al.* (1984) mostraram que aumentando-se a rigidez do pneu, mesmo com o aumento de área de contato, o pneu não se deforma o suficiente de modo a absorver a carga radial e acaba transferindo ao solo uma pressão de contato alta, aumentando a resistência ao rolamento e também a compactação do solo.

Na Figura 42, observa-se que as deformações apresentadas pelo solo foram muito próximas para ambos os pneus e cargas, porém as deformações totais, que somam-se as

deformações dos pneus e do solo, foram muito maiores para os pneus CG, mostrando que de 16 para 29 kN o pneu CG deformou 63,8% a mais que o pneu SG.

Isso mostra que a menor carga provoca somente deformação no solo e não nos pneus, já a carga nominal provoca deformação do solo e também nos pneus resultando em deformações significativamente diferentes (Figura 55).

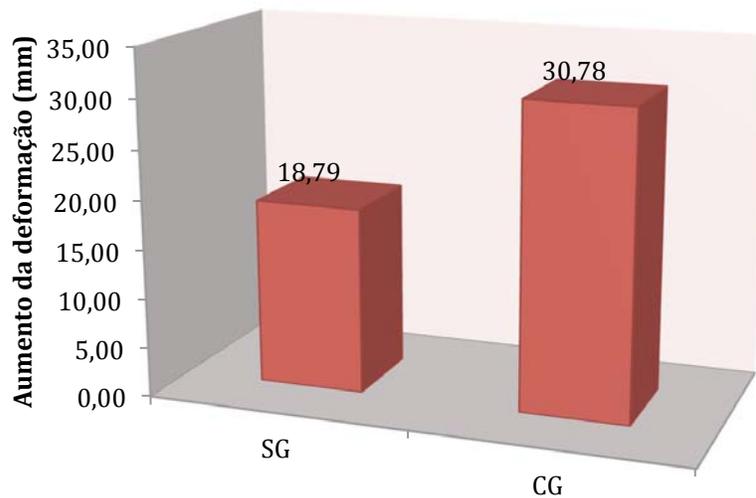


Figura 55. Incremento na Deformação total com o incremento da carga de 16 para 29 kN.

Em solo rígido observa-se que a área de contato apresentada pelo pneu CG é menor que a do pneu SG em todas as cargas trabalhadas (Figura 39) e a concentração da carga radial sobre as garras provoca uma pressão de contato muito superior que a pressão de contato do pneu SG (Figura 40).

Porém em superfície deformável a distribuição da carga pela área de contato foi melhor no pneu CG, apresentando incrementos de compactação menores, isso nos indica que a área de contato do pneu CG é maior que a do pneu SG, então a região entre barras também contribui para suporte da carga radial.

Em ambas as cargas o pneu SG obteve incremento de IC e densidade maiores, porém a 100% da carga nominal a compactação foi mais acentuada, não aumentando na mesma proporção que o incremento do pneu CG.

Esse efeito foi contrário para área de contato e , como visto, também para a deformação total. Com o aumento da carga radial o pneu SG não aumentou muito sua área, ao contrário do pneu CG que obteve um grande aumento.

Dessa forma pode-se explicar a maior compactação do solo pelo pneu SG, atribuindo-se à sua rigidez estrutural, pois a maior rigidez do pneu SG, comprovada pelos ensaios em superfície rígida e deformável, foi responsável pela menor área de contato, sendo que com o aumento da carga de 55% para 100%, o pneu CG aumentou 12,5% a mais sua área de contato total (Figura 56).

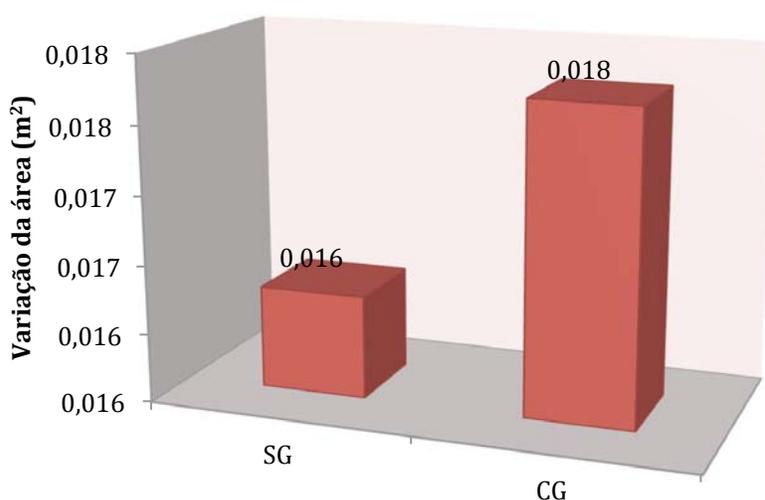


Figura 56. Incremento da área de contato total com a variação da carga de 16 kN para 29 kN.

Esse efeito de aumento da área com o aumento da carga radial pode ser visualizado na Figura 57, onde são sobrepostas as imagens das áreas mostrando que o sentido longitudinal é o principal sentido no qual a área aumenta sendo o incremento transversal menor.

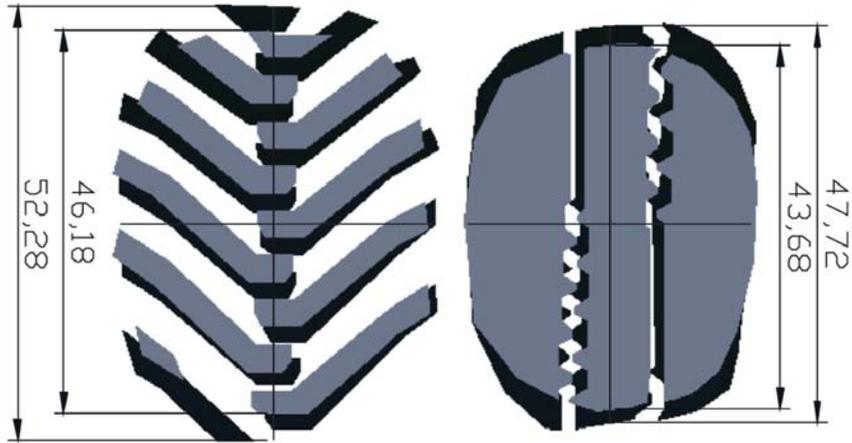


Figura 57. Sobreposição das áreas, cinza com carga de 16 kN e preto 29 kN e a dimensão longitudinal (mm), na qual ocorre o aumento da área.

Fica claro que para a carga de 16 kN as áreas totais em cinza eram próximas entre os dois pneus, porém com o aumento da carga o pneu CG apresentou um incremento da área no sentido longitudinal maior que o pneu SG.

Pela correlação de área de contato mostrada por ARVIDSSON e KELLER (2007) e também por MAZETTO, *et al.* (2004) em seus trabalhos, pode-se afirmar que, para a condição de compactação e umidade do solo, dos ensaios realizados, a área de contato do pneu CG é maior que a do pneu SG, devido ao fato de possuir uma menor rigidez.

As diferenças entre as áreas de contato provocam efeitos próximos à superfície do solo, como descrito por BOTTA, *et al.* (2008), assim a uma profundidade de 100 mm pode-se notar a grande diferença entre os pneus com relação ao IC com o aumento da carga, Figura 58, porém em profundidade essa diferença cai drasticamente, pois começa haver maior influência da carga radial, que é a mesma para os dois pneus.

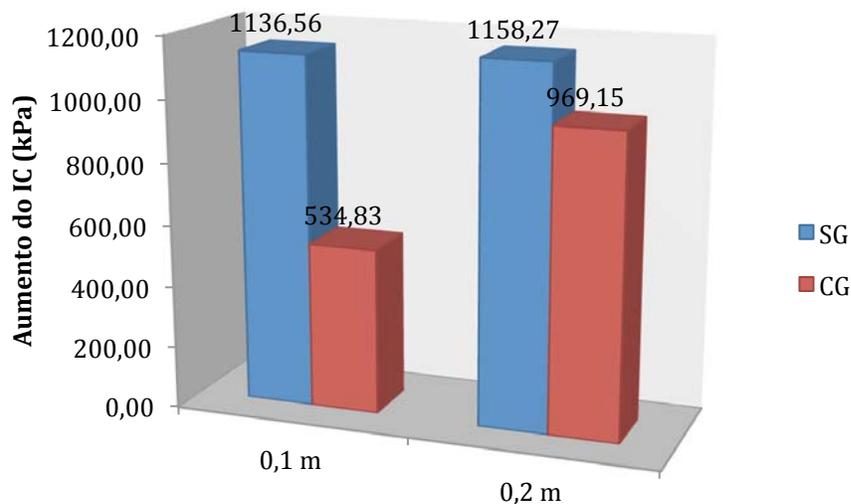


Figura 58. Variação do IC com o incremento da área de contato em relação a profundidade e tipo de pneu.

Sendo assim, para o solo estudado, a área de contato sobre a qual há distribuição da carga radial é a área de contato total e não a efetiva, contrário a hipótese de trabalho.

A rigidez do pneu está diretamente relacionada com a compactação do solo, como comprovado nos trabalhos de ANSORGE e GODWIN (2007), ANSORGE e GODWIN (2008), KOGER, *et al.* (1984), e RAPER (2005).

Pneus flexíveis tendem a absorver mais a carga radial em sua estrutura e passar ao solo uma pressão de contato menor que pneus rígidos, provocando assim deformações elásticas maiores (KOGER, *et al.*, 1984).

A deformação do solo além dos fatores externos, depende muito de suas propriedades físicas e químicas (matéria orgânica), devendo-se atentar quanto a comparação das deformações plásticas, pois mesmo não significando maiores incrementos de compactação podem provocar danos à estrutura radicular das culturas ou mesmo aumentar a velocidade de escoamento superficial da água (RAPER, 2005).

Em superfícies de alta rigidez (solos compactados) a área de contato sobre a qual ocorre a distribuição da carga é a área efetiva, podendo reduzir a vida útil do pneu pelo desgaste excessivo das garras.

Independente da carga e do pneu, a maior compactação foi observada nas camadas de 100 a 200 mm de profundidade, assim como descrito por NAGAOKA, *et al.* (2003) e explicado por MCKEYS (1985) entre outros.

A máxima compactação ocorre na região central do pneu a uma profundidade equivalente a altura de um triângulo retângulo de base igual a metade da largura do pneu Figura 59.

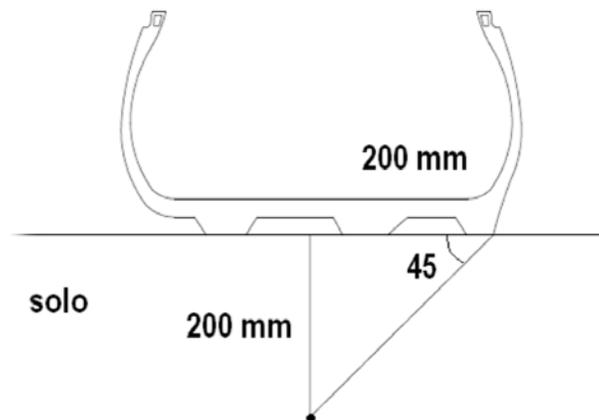


Figura 59. Profundidade do ponto onde ocorre a máxima compactação, 200 mm, calculada pelo triângulo retângulo.

Dessa forma a máxima compactação, segundo MCKEYS (1985), ocorre a 200 mm de profundidade, como observado pelos resultados apresentados.

5. CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos, conclui-se que :

O aumento da carga radial aplicada ao pneu SG (maior rigidez) provoca maior compactação do solo quando comparado com o pneu CG (menor rigidez) com a mesma variação de carga, sendo de maior proporção para camada superficial do solo;

Quando analisada em profundidade a variação do incremento da compactação é a mesma para ambos os pneus;

Independente de pneu a máxima compactação não ocorre logo abaixo da superfície de contato, mas a uma certa profundidade, função da largura do pneu;

Os pneus apresentam deformações próximas que estatisticamente não diferem a 95% de confiabilidade, quando a carga aplicada corresponde a 55% da carga nominal, porém a 100% da carga nominal há diferenças significativas nas deformações apresentadas entre os pneus;

A área de contato entre o pneu CG e o solo engloba as garras e a região de fundo íncavo e, além disso, possui área de contato maior com o solo que o pneu SG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA, Agência Nacional das Águas. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/default.asp>>. Acesso em: 21 jul. 2010.

ANFAVEA, Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 20 mai. 2012.

ANSORGE, D.; GODWIN, R. J. The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction: Part 1: Single Axle Studies. **Biosystems Engineering**, v. 98, n. 1, p. 115-126, 2007.

ANSORGE, D.; GODWIN, R. J. The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction-Part 2: Multi-axle machine studies. **Biosystems Engineering**, Harsewinkel, v. 99, p. 338-347, 2008.

ANTIQUFARMING, Disponível em: <www.antiquefarming.com>. Acesso em: 20 nov. 2010.

ARAÚJO, A. G. **Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa**. 224 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; WILDNER, L. P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 29, p. 425-435, 2005.

ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. **Soil & Tillage Research**, n. 96, p. 284-291, 2007.

ASAE, American Society of Agricultural Engineers. **ASAE EP 542: Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer**. In: ASAE Standards. St Joseph, p. 996-999, 1999.

ASAE, American Society of Agricultural Engineers. **ASAE S313.3: Soil Cone Penetrometer**. In: ASAE Standards. St Joseph, p. 847-848, 1999.

AS2TM, 2009. **AESCO Soft Soil Tyre Model User Guide**. Disponível em: <<http://www.tire-soil.de>>. Acesso em: 05 jul. 2009.

BEKKER, M. G. **Theory of land locomotion - the mechanics of vehicle mobility**. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1956.

BEKKER, M. G. **Off the road locomotion - research and development in terramechanics**. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1960.

BEKKER, M. G. **Introduction to terrain-vehicle systems**. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1969.

BIANCHINI, A. **Desenvolvimento técnico experimental de disco de corte dentado passivo para corte de palhiço em cana de açúcar**. 241 p. Tese (Doutorado em Máquinas Agrícolas) - Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002.

BILLER, R. H.; OLFE, G. Collect of data on tractor use by questionnaires and by eletronical data approval. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 34, p. 219-227, 1986.

BIONDI, P. Technical trends of tractors and combines (1960-1989) based on italian type approval data. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 65, p. 1-14, 1996.

BOTTA, G.; JORAJURIA, D.; BALBUENA, R.; RASATTO, H. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. **Soil & Tillage Research**, v. 101, p. 44-51, jun. 2008.

BOTTA, G.; JORAJURIA, D.; DRAGHI, L. Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. **Journal of Terramechanics**, v. 39, n. 1, p. 47-54, 2002.

BOUSSINESQ, J. **Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques**. Paris: Gauthier-Villars, 1885.

BURT, E. C.; WOOD, R. K.; BAILEY, A. C. A three dimensional system for measuring tire deformation and contact stress. **ASAE**, v. 30, p. 324-327, 1987.

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

CHI, L.; TESSIER, S. Soil compaction and rut depth reduction with high flotation tires on heavy tractors. **ASAE**, v. 94, n. 1559, p. 1-18, 1994.

CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 197-201, 1983.

CORRÊA, I. M.; YANI, K.; MAZIERO, J. V. G.; LANÇAS, K. P. Determinação da circunferência de rolamento de pneus agrícolas utilizando dois métodos: manual e eletrônico, Campinas, v. 58, n. 1, p. 179-184, 1999.

CORTEZ, L. A. B. Bioetanol de cana de açúcar P&D Produtividade e Sustentabilidade. In: BRAUNBECK, O. A.; MAGALHÃES, P. S. G. **Avaliação tecnológica da mecanização da cana de açúcar**. São Paulo: [s.n.], 2010. p. 451 -464.

CRAUL, P. J. Soil compaction on heavily used sites. **Journal of Arboricult**, v. 20, n. 2, p. 69-74, 1994.

CUI, K.; DÉFOSSEZ, P.; RICHARD, G. A new approach for modelling vertical stress distribution at the soil/tyre interface to predict the compaction of cultivated soils by using the PLAXIS code. **Soil & Tillage Research**, v. 95, p. 277-287, 2007.

DÉFOSSEZ, P.; RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. **Soil & Tillage Research**, v. 67, p. 41-64, 2002.

DAVCO Farming, **Advanced Sugarcane Farming System**. Disponível em: <<http://www.davcofarming.com/>>. Acesso em: 21 jun. 2011.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part 1. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Geoderma, v. 120, p. 201-214, 2004.

EMBRAPA, **Empresa Brasileira de Agropecuária**. Disponível em: <<http://www.sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/AlgodaoIrrigado/solos.html>>. Acesso em: 27 jun. 2011.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1997. 212 p.

ENCYCLOPEDIA BRITANICA. 15 ed. ed. Chicago: Macropaedia, 1979.

FALKER, **Automação Agrícola PLG5200-Medidor Automatizado de Compactação do Solo-SoloTrack**. Disponível em: <http://www.falker.com.br/produto_download.php?id=8>. Acesso em: 04 ago. 2011.

FILHO, A. G.; GUERRA, S. P. S.; PAULA, C. A.; CORRÊA, I. M.; YANI, K ; MAZIERO, J. V. G.; MIALHE, L. G.; MENEZES, J. F.; MONTEIRO, L.A. UMEB-Unidade móvel para ensaio da barra de tração. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v. 28, n. 4, p. 782-789, 2008.

FLEIGE, H.; HORN, R. Field experiments on the effect of soil compaction on soil properties, runoff, interflow and erosion. **Advances in Geocology**, Reiskirchen, v. 32, p. 258-268, 2000.

FROHLICH, O. K. **Druckverteilung im baugrunde (Pressure in soil foundation)**. Wien: [s.n.], 1934. 178 p.

GAMEDA, S.; RAGHAVAN, G. S. V.; MCKEYS, E.; WATSON, A. K.; MEHUYS, G. Response of grain corn to subsoiling and chemical wetting of a compacted clay subsoil. **Soil and Tillage Research**, v. 29, p. 179-187, 1994.

GENT, A. N.; WALTER, J. D. **The Pneumatic Tire**. The University of Akron. Washington DC, p. 364. 2005.

GOODYEAR, **The Charles Goodyear story**. Disponível em: <http://www.goodyear.com/coporate/history_story.html>. Acesso em: 05 maio 2011.

HAKANSSON, I. **Machinery induced compaction of arable soils. Incidence-Consequences-Countermeasures**. Swedish University of Agricultural Science. [S.l.]. 2005.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. University of Massachusetts. Amherst, p. 413. 1980.

HORN, R. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n. 1/2, p. 23-36, 1995.

JÚNIOR, J. L. F.; FABBRI, G. T. P.; PARREIRA, A. B.; SÓRIA, M. H. A.; GIGANTE, A. C. Efeitos dos pneus trelleborg sobre pavimentos asfálticos. **Minerva**, São Carlos, v. 2, p. 13-24, 2005.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure propagation in soil. **Soil & Tillage Research**, v. 79, p. 191-205, 2004.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - Um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista Ciência Agronômica**, v. 5, p. 26-32, 2006.

KOGER, J. L.; TROUSE, A. C.; BURT, E. C.; BAILEY, A. C. Skidder tire size vs. soil compaction in soil bins. **ASAE**, v. 27, n. 3, p. 665-669, 1984.

KOOLEN, A. J.; KUIPERS, H. **Agricultural soil mechanics**. New York: [s.n.], 1983. 240 p.

LANÇAS, K. P. **Desempenho operacional de pneus radiais em função da pressão de inflação, da lastragem e do deslizamento das rodas de tratores agrícolas**. 172 p. Tese (Livre docência em mecânica aplicada/Engenharia rural) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Neto". Botucatu. 1996.

LANÇAS, K. P. **Sustentabilidade dos solos de cerrado e tráfego de máquinas**. In: Encontro técnico de manejo de solos sob cerrado. Uberaba: [s.n.]. 2005.

LINEARES, P. **Teoría de la tracción de tractores agrícolas**. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Madrid, p. 157. 1996.

MÁRQUEZ, L. **Solo tractor'90**. Madrid: Laboreo, 1990. 198 p.

MACMILLAN, D. **The John Deere Tractor Legacy**. Hong Kong: Voyageur Press, 2003.

MAZETTO, F. R.; LANÇAS, K. P.; NAGAOKA, A. K.; NETO, P. C.; GUERRA, S. P. S. **Avaliação do contato pneu-solo em três modelos de pneus agrícolas**. Jaboticabal: [s.n.], v. 24, 2004. 750-757 p.

MAZIERO, J. V. G.; MIALHE, L. G.; CORRÊA, I. M.; YANI, K.; MENEZES, J. F. Efeito da patinação da roda motriz de um trator agrícola na compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 1, 1997.

MCKEYS, E. **Soil cutting and tillage**. New York: Elsevier Science, v. 7, 1985.

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

MICHELIN, **The Michelin Company**. Disponível em: <<http://www.michelin.com/corporate/EN/group/history>>. Acesso em: 17 mar. 2011.

MILLAR, D. **The Cambridge dictionary of scientists**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1996.

MONTEIRO, L. A.; LANÇAS, K. P. Pneus agrícolas: efeito da pressão de inflação no desempenho do trator. **Cana Mix**, v. 2, jul. 2009.

MONTEIRO, L. A.; LANÇAS, K. P.; MASIERO, F. Conjunto de lastro. **Panorama Rural**, n. 125, 2009.

MUROSKY, D. L.; HASSAN, A. E. Impact of tracked and rubber-tired skidders traffic on a wetland side in Mississippi. **ASAE**, v. 34, n. 1, p. 322-327, 1991.

NAGAOKA, A. K.; NETO, P. C.; LOPES, A.; GUERRA, S. P. S. Resistência do solo à penetração, após o tráfego com dois tipos de pneus utilizando-se um equipamento para ensaio dinâmico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 387-393, 2003.

NAKASHIMA, H.; OIDA, A. Algorithm and implementation of soil-tire contact analysis code based on dynamic FE-DE method. **Journal of Terramechanics**, Kyoto, v. 41, p. 127-137, 2004.

OIDA, S.; SETA, E.; HEGURI, H.; KATO, K. Soil/Tire Interaction Analysis Using FEM and FVM. **Tire Science and Technology**, Tokyo, v. 33, n. 1, p. 38-62, 2005.

OSULLIVAN, M. F.; DICKSON, J. W.; CAMPBELL, D. J. Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. **European Journal of Soil Science**, v. 38, n. 1, p. 137-148, 1987.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. Soil pore system as an indicator of soil quality. Sustainable land management environmental protection. A Soil Physical Approach. **Advances in Geocology**, Reiskirchen, v. 35, p. 71-82, 2002.

PEDÓ, F. **Rendimento e distribuição de raízes de seis espécies de plantas em dois níveis de compactação do solo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 1986.

RAPER, R. L. Agricultural traffics impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Auburn, n. 42, p. 259-280, março 2005.

RAPER, R. L.; REEVES, D. W.; BURT, E. C.; TORBERT, H. A. Conservation tillage and traffic effects on soil condition. **ASAE**, v. 37, n. 3, p. 763-768, 1994.

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

RENIUS, K. Trends in tractor design with particular reference to europe. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 57, p. 3-22, 1994.

RIPOLI, T. C. C.; JÚNIOR, W. F. M.; RIPOLI, M. L. C. **Manual prático do agricultor - máquinas agrícolas**. Piracicaba: Edição dos autores, v. 1, 2005. 192 p.

RODRIGUES, T. H. R. **Análise computacional entre pneu e solo deformável**. Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas. 2009.

ROSEMBERG, N. J. Response of plants to the physical effects of soil compaction. **Advance in Agronomy**, v. 16, p. 181-196, 1964.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil & Tillage Research**, v. 65, p. 109-115, 2002.

SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. **Soil Compaction in Crop Production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 660 p.

SOHNE, W. Druckverteilung im boden und bodenverformung unter schlepperreifen (Pressure distribution in the soil and soil deformation under tractor tyres). **Grundlagen land technink**, v. 5, p. 373-400, 1953.

TAYLOR, J. H. Benefits of permanent traffic lanes in a controlled traffic crop production system. **Soil Tillage Research**, v. 3, n. 4, p. 385-395, 1983.

TAYLOR, J. H.; BURT, E.; BAILEY, A. C. Effect of total load on subsurface soil compaction. **ASAE**, v. 39, n. 5, p. 568-570, 1980.

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

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, v. 85, n. 5, p. 759-766, 1994.

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

WAY, T. R.; KISHIMOTO, T. Interface pressures of a tractor drive tyre on structured and loose soils. **Biosystems Engineering**, v. 87, p. 109-120, 2004.

WILLIAMS, S. M.; WEIL, R. R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society**, v. 68, p. 1403-1409, 2004.

WOOD, R. K.; BURT, E. C. Soil-tire interface stress measurements. **ASAE**, p. 1254-1258, 1987.

ANEXOS

ANEXO A - Análise Granulométrica

Material

Agitador rotatório de Wagner;

Vibrador de peneiras,

Balança analítica,

Estufa com circulação de ar,

Dispersantes: Hidróxido de sódio (NaOH) 0,1N e Hexametáfosfato de sódio (Calgon) 0,1N.

Que constituem uma solução de 20g de NaOH em 5 litros de água e 50g de Calgon;

Triângulo de Classificação Textural (USDA);

Pipeta com água.

Metodologia

Para o preparo das amostras foram acompanhados os seguintes passos:

Peneirar o solo seco ao ar com peneira malha 2,0 mm, obtendo-se a TFSA;

Colocar 10g de TFSA na garrafa de Sthomann;

Acrescentar 50ml da solução dispersante (NaOH+Calgon);

Colocar a garrafa de Sthomann no agitador Wagner a 30 rpm, de 14 a 16 horas;

Transferir a suspensão para uma proveta graduada de 500 ml passando por um peneira de malha 0,053 mm;

Preparar uma amostra em “BRANCO”: Misturar 50 ml da solução dispersante em 500 ml de água destilada;

Pipetar 10 ml desta solução, colocar em um Becker tarado e identificado, levar para estufa a 105 °C.

Separação da fração areia – peneiramento

Transferir o material retido na peneira para becker de 400 ml, previamente identificado e tarado, levar para secar em estufa a 105C, durante 24horas.

Passar o material que ficou retido na peneira de 0,053 mm seco em estufa, em conjunto de peneiras de 0,210 mm e 0,053 mm, com auxílio de um vibrador de peneiras, para o fracionamento da fração areia em areia grossa (AG), e areia fina (AF) respectivamente;

Pesar as frações retidas em cada peneira.

Separação da fração silte e argila – sedimentação

Completar o volume da proveta para 500ml com água destilada;

Agitar a solução com agitador manual por 30 segundos. Ao término da agitação, começar a contagem do tempo ($t = 0$);

Anotar a temperatura da solução e calcular o tempo de sedimentação pela Lei de Stokes para as frações argila e (argila+silte);

Esperar o tempo de sedimentação da fração (argila+silte), segundo os cálculos;

Pipetar 10 ml da solução a uma profundidade de 10 cm da superfície da suspensão;

Transferir para Becker devidamente pesado e identificado;

Levar para secar em estufa a 105 °C, durante 24 horas;

Esperar o tempo para sedimentação da fração argila;

Pipetar 10 ml da solução a uma profundidade de 5 cm da superfície da suspensão;

Transferir para Becker tarado e identificado como ARG;

Levar para secar em estufa a 105 °C, por 24 horas;

Retirar os beckers da estufa após 24 horas, colocar no dessecador até a temperatura ambiente, e pesá-los.

ANEXO B - Determinação da Consistência do Solo

Materiais

Aparelho de Casagrande;

Cinzel;

Espátula;

Tigela de porcelana;

Cápsulas;

Balança;

Placa de vidro;

Água destilada;

Peneira nº 40.

Limite de Plasticidade

Em uma tigela de porcelana. Colocar aproximadamente 100g de solo seco ao ar, passado na peneira número 40;

Adicionar água ao solo, e misturar desfazendo todos os agregados, até formar uma massa coesa;

Separar uma porção desta massa. Em placa de vidro levemente rugosa. Formar cilindros de 3mm de diâmetro e 4cm de comprimento. Se os cilindros começarem a fissurar com estas dimensões coloque-os em cápsulas para a determinação da umidade (U%);

Repetir a etapa 3 até obter mais dois cilindros que serão utilizados com o primeiro para o cálculo do teor de umidade médio, o qual será o Limite de Plasticidade procurado. (Se os cilindros apresentarem fissuras com dimensões maiores que 3 mm de diâmetro. Adicionar água à amostra e repetir a etapa 3. Se os cilindros não apresentarem fissuras, role mais a

amostra para perder umidade e repita o ensaio até obter fissuras em cilindros de dimensões indicadas na etapa 3.)

Obter assim as umidades: U1%, U2%, U3%.

Cálculo do Limite de Plasticidade (LP) de acordo com a Equação 1.

$$LP = \frac{U_1\% + U_2\% + U_3\%}{3} \quad \text{Eq. 1}$$

Limite de Liquidez

Ajustar a altura de queda (1 cm) do aparelho Casagrande (Figura 2) com auxílio do calibre existente na extremidade do cinzel. A altura deverá ser medida entre a base e o ponto de contato desta com a concha, Deve-se observar que este ponto não é o mais baixo da concha quando estiver levantada;

Em tigela de porcelana, colocar aproximadamente 150 g de solo seco ao ar que tenha passado através da peneira número 40, acrescentar água e homogeneizar a massa até formar uma massa uniforme;

Com auxílio de uma espátula, colocar uma porção desta massa na concha do aparelho Casagrande, acertar o nível da superfície com a frente da concha, de modo a formar uma camada de 1 cm acima do fundo;

Fazer um corte uma ranhura no centro da amostra utilizando o cinzel. Manter o cinzel perpendicular a superfície da concha durante a confecção da ranhura;

Ligar o aparelho numa velocidade de 2 revoluções (2 golpes) por segundo (60 rpm);

Anotar o número de golpes necessários para unir a massa de solo no fundo da concha, na distância de 1 cm;

Retirar amostra da massa do solo na região onde a ranhura se uniu;

Colocar o restante da massa na tigela de porcelana e adicionar mais água, para obter uma mistura mais fluida que a anterior;

Repetir as etapas 3 a 7 para obter dois ensaios com resultados entre 15 e 35 golpes. Deve-se ter pelo menos três determinações de umidade, de tal maneira que se distribuam acima e abaixo de 25 golpes, entre 27 e 35, e entre 10 e 18, respectivamente;

Limpar e secar a concha antes de repetir cada ensaio;

O limite de liquidez (LL) será obtido por meio da Equação 2.

$$LL = U\% \cdot \left(\frac{N}{25}\right)^{0,12} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: U% = teor de umidade

N = número de golpes

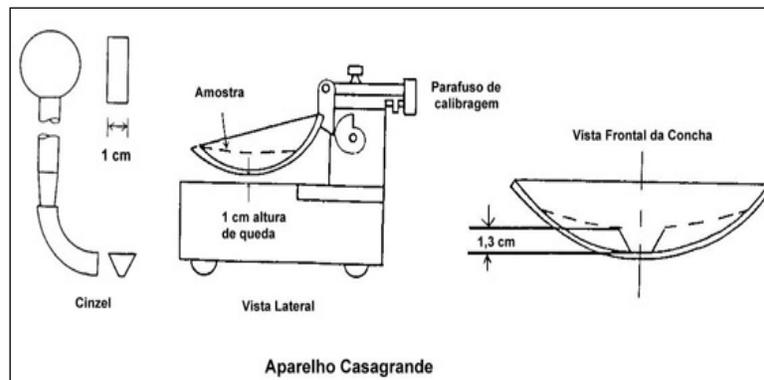


Figura 1: Aparelho de Casagrande.

Índice de Plasticidade

O Índice de Plasticidade (IP) é calculado pela diferença numérica entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), conforme a Equação 3.

$$IP = LL - LP \quad \text{Eq. 3}$$

ANEXO C - Ensaio de Proctor Normal

Materiais

Cilindro e soquete de Proctor;

Balanças com capacidade de 20000 g e precisão de 1,0 g e capacidade de 200 g e precisão de 0,01 g;

Bandeja metálica;

Triturador;

Quarteador de amostra;

Extrator de amostras;

Cápsulas de alumínio para determinar a umidade;

Estufa;

Espátula, concha;

Peneira de 19,1 mm e 4,2 mm;

Régua biselada;

Proveta com divisões de 2 ml.

Metodologia

Deixar a amostra de solo em condições naturais;

Peneirar a amostra, se for constituída de partículas finas (peneira 4,2 mm) e se a amostra conter partículas maiores (peneira 19,1 mm), e o material que ficou retido na peneira de 19,1 mm deverá ser substituído por um material fino que passe nesta mesma peneira e fique retido na peneira de 4,2 mm;

Homogeneizar a amostra de solo, quebrando os torrões, evitando a quebra dos grãos;

Quartear a amostra da seguinte maneira: misturar bem todo o solo e depois repartir em 4 partes iguais, tomar 2 partes alternadas e repetir o processo até que se tenha a quantidade de solo necessária para o ensaio;

Se o solo estiver muito seco, juntar água em pequenas quantidades e homogeneizar, até que o solo apresente uma umidade uniforme. A umidade inicial deve estar bem abaixo da umidade ótima do solo;

Colocar o solo no cilindro até uma altura de aproximadamente metade do cilindro;

Com um soquete de Proctor compactar o solo com 26 golpes, tendo o cuidado de distribuir os golpes por toda a área do cilindro. Cada camada, assim compactada, deve ficar com uma altura de 1/3 da altura do cilindro;

A superfície de cada camada deve ser escarificada com uma espátula para haver a união entre as mesmas;

Colocar nova quantidade de solo no cilindro e compactar com o mesmo número de golpes do soquete a camada de solo;

Colocar o solo no cilindro até a borda superior do anel e compactar novamente com 26 golpes;

Retirar o colar do cilindro e retirar o excesso de solo até o início do cilindro;

Pesar o cilindro com o solo, obtendo um valor para determinação da massa específica úmida;

Levar o cilindro para o extrator de amostras e retirar o solo;

Da parte central amostra extraída, retirar uma porção de solo para determinação da umidade;

Se o ensaio estiver sendo realizado com reaproveitamento do solo, quebrar toda a amostra extraída, juntar com o solo restante da bandeja e homogeneizar a amostra até que todo o solo apresente a mesma umidade;

Adicionar água ao solo e homogeneizar até que toda amostra apresente uma umidade uniforme;

Repetir os itens 4.6 a 4.17, obtendo assim os vários pontos necessários para traçar a curva de compactação;

Se o ensaio estiver sendo realizado sem o reaproveitamento da amostra do solo, repetir os itens 4.6 a 4.15;

O número mínimo de pontos a serem obtidos para traçar a curva é 5, sendo 2 pontos abaixo e 3 pontos acima da umidade ótima;

Deve-se procurar obter um intervalo de umidade entre 2 pontos consecutivos da ordem de 1 a 2 %.

Para cada série de operação de compactação do solo no cilindro obteve-se:

o peso do solo compactado mais cilindro;

o peso e volume do cilindro;

o peso do solo compactado;

a massa específica úmida do solo compactado (γ);

a umidade da compactação do solo (W);

a massa específica aparente seca (γ_d) do solo por meio da Equação 4.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{(1 + W)} \quad \text{Eq. 4}$$

obtidos os pares de valores de umidade e massa específica aparente seca, colocar em gráficos e traçar a curva que melhor se ajusta a eles;

da curva obtida, tirar o valor da massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima correspondente;

ANEXO D - Ensaio de Cisalhamento

Materiais

O equipamento existente no laboratório de Mecânica de Solos do Departamento de Engenharia Civil, para a realização destes ensaios, é constituído pela máquina de corte reversível e pela caixa de corte e acessórios. A caixa de corte é constituída por duas meias caixas de acordo com a Figura 3.



Figura 2: Caixa de corte utilizada no ensaio de cisalhamento

Metodologia

O provete é alojado na caixa de corte entre duas placas porosas, cobertas por placas metálicas com as lâminas dispostas perpendicularmente ao sentido de deslocamento da caixa de corte;

A pressão vertical é mantida constante durante o ensaio e um deflectómetro colocado na metade superior da caixa permite o registo das deformações verticais;

A semi-caixa superior está ligada ao anel dinamométrico que permite medir forças de corte; ligado à semi-caixa inferior, um deflectómetro horizontal mede os deslocamentos desta;

No decorrer do ensaio realizam-se leituras dos diferentes deflectómetros de 10 em 10 s nos primeiros 60 segundos e de 30 em 30 segundos até se dar a rotura. Esta verifica-se quando o valor da tensão de corte diminui ou se mantém constante.

Para cada ensaio de cisalhamento obteve-se:

a seção da caixa de corte, a densidade das partículas sólidas e o factor de calibração de cada deflectómetro.

a carga vertical aplicada, a tensão de consolidação, a velocidade de corte, o tempo até à rotura, o deslocamento na superfície de corte ($\gamma_1 - \gamma_2$), a força de corte (F) e a tensão tangencial (τ) dada pela equação 5.

$$\tau = \frac{F}{a \cdot [b - (\gamma_1 - \gamma_2)]} \quad \text{Eq. 5}$$

O deslocamento horizontal da semi-caixa inferior, medido no deflectómetro, não fornece o deslocamento na superfície de corte. Para tal, será necessário efectuar-se a correcção seguinte:

A semi-caixa inferior, ao deslocar-se, arrasta consigo a semi-caixa superior cujo deslocamento pode ser quantificado através da deformação do anel dinamométrico. O deslocamento entre as duas semi-caixas será, portanto, a diferença entre estes dois deslocamentos: γ_1 – deslocamento da semi-caixa inferior; γ_2 – deslocamento do anel dinamométrico.

ANEXO E - Ensaio de Adensamento

Materiais

Prensa devidamente equipada com a célula de adensamento (edômetro);

Extensômetro mecânico para a realização das medidas de deformações;

Jogos de pesos para transmissão de pressão ao corpo de prova;

Cronômetro para o acompanhamento dos tempos de leituras.

Metodologia

Instala-se o corpo de prova entre duas pedras porosas, no edômetro, o qual deve estar cheio de água para a saturação por 24 horas.

Aplica-se uma determinada (pressão) no corpo de prova e realizam-se leituras no extensômetro nos instantes 15 e 30s, 1, 2, 4, 9, 16, 32, 46, 64, 120min, etc até que haja estabilização das deformações.

Dobra-se a carga aplicada e procede-se como descrito anteriormente.

Cálculos

Índice de Vazios

$$e = \frac{h}{h_s} - 1 \quad \text{Eq. 6}$$

$$h_s = \frac{h_o}{(1+e_o)} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

h_s - altura reduzida do corpo de prova (altura de sólidos);

e - índice de vazios;

h - altura do corpo de prova no dado instante;

ho - altura inicial do corpo de prova;

eo- índice de vazios inicial.

$$\text{Pressão Aplicada} = \frac{\text{Carga aplicada}}{\text{Área do corpo de prova}}$$

Índice de compressão

$$I_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{P_2}{P_1}} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

Ic – Índice de compressão;

e1 – Um valor do índice de vazios;

e2 – Outro valor do índice de vazios;

P1 – pressão correspondente ao primeiro índice de vazios;

P2 - pressão correspondente ao segundo índice de vazios;