

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE
CONTATO E DEFORMAÇÕES ELÁSTICAS DE PNEUS AGRÍCOLAS EM FUNÇÃO
DAS PRESSÕES DE INFLAÇÃO E CARGAS RADIAIS**

FLÁVIO RIELLI MAZETTO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP
Janeiro – 2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE
CONTATO E DEFORMAÇÕES ELÁSTICAS DE PNEUS AGRÍCOLAS EM FUNÇÃO
DAS PRESSÕES DE INFLAÇÃO E CARGAS RADIAIS**

FLÁVIO RIELLI MAZETTO
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças

Co-Orientador: Dr. Reginaldo Barboza da Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
– Área de Concentração em Energia na
Agricultura.

BOTUCATU – SP
Janeiro - 2004

À DEUS

Aos meus pais, Aldo e Maria Heloisa

Ao meu irmão, Fábio

Aos meus familiares

DEDICO

Aos meus avós paternos, Romano (*in memorian*) e Carolina

Aos meus avós maternos, Américo (*in memorian*) e Ises

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA-UNESP), Câmpus de Botucatu e a Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Energia na Agricultura, pela oportunidade concedida, apoio e atenção durante o curso de Mestrado, em especial aos Professores Doutores: Sérgio Hugo Benez e Carlos Antônio Gamero (Diretor da FCA).

Ao Professor Doutor Kléber Pereira Lanças, do Departamento de Engenharia Rural da FCA-UNESP, Câmpus de Botucatu, pela orientação segura, atenção, dedicação, compreensão, sinceridade e amizade dispensada em toda minha vida acadêmica.

Ao Doutor Reginaldo Barboza da Silva, do Departamento de Engenharia Rural da FCA-UNESP, Câmpus de Botucatu, pela co-orientação e amizade.

Aos Professores Doutores: Ulisses Rocha Antuniassi e João Eduardo Guarnetti dos Santos pelas sugestões.

Aos Professores Doutores: Alberto Kazushi Nagaoka e Pedro Castro Neto, pela amizade, consideração e incentivo na minha carreira profissional.

Às empresas Goodyear e Trelleborg do Brasil pelo fornecimento de pneus, sem os quais não seria possível a concretização dessa pesquisa.

Aos funcionários da Trelleborg do Brasil, Anderson Jacon e Márcio Souza Leão, pela amizade, incentivo e apoio durante o curso.

Ao colega e Mestre Saulo Philipe Sebastião Guerra, pela consideração, amizade e ajuda decisiva nos ensaios de pneus.

Aos colegas contemporâneos: Paulo Arbex, Antônio Renan B. da Silva, Rogério Germino, Élcio H. Yano, Fabrício Leite, Émerson Borghi, Edmilson Renato Silva Ruiz, Elka Élice Vasco de Miranda e a aluna de graduação Edilene Marlei Costa pela convivência e amizade.

Ao meu irmão Fábio Rielli Mazetto, pelo auxílio durante a fase de coleta de dados.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Rural, em especial a Benedito Fernando Camargo, Rosângela Cristina Moreci e Rita de Cássia Miranda Araújo, pela atenção, amizade e serviços prestados.

Às secretárias da Seção de Pós-graduação da FCA-UNESP, Câmpus de Botucatu, Marilena do Carmo Santos, Marlene Rezende de Freitas e Jaqueline de Moura Gonçalves, pela atenção e atendimento.

Enfim, a todas as pessoas e instituições que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 Características dos pneus	7
4.2 Desempenho de rodados pneumáticos	13
4.2.1 Lastragem e pressão de inflação.....	15
4.2.2 Resistência ao rolamento	17
4.3 Interação pneu/solo	18
4.3.1 Determinação da área de contato	19
4.3.2 Variáveis que afetam a área de contato	22
4.4 Deformação elástica dos rodados agrícolas	23
5 MATERIAL E MÉTODOS	27
5.1 Material	27
5.1.1 Área experimental	27
5.1.2 Pneus	27
5.1.3 Prensa hidráulica	30
5.1.4 Tanque de solo	31
5.1.5 Solo	31
5.1.6 Pórtico e talha	32
5.1.7 Massa modelável	32
5.1.8 Gesso	32
5.1.9 Papel carbono e de seda	33
5.1.10 Balança de pesagem	33
5.1.11 Célula de carga	33
5.1.12 Quadros de madeira	34
5.1.13 Perfilômetro	35

5.1.14 Medidor de pressão dos pneus	35
5.1.15 Equipamentos e acessórios	36
5.1.16 Programas computacionais	36
5.2 Métodos	36
5.2.1 Calibração dos sensores	36
5.2.2 Aplicação da carga aos pneus	37
5.2.3 Obtenção da impressão dos pneus em superfície deformável	37
5.2.4 Obtenção da impressão dos pneus em superfície rígida	41
5.2.4.1 Utilização do pó de gesso	41
5.2.4.2 Utilização do papel carbono	42
5.2.4.3 Utilização da massa modelável	43
5.2.5 Determinação das áreas de contato a partir da impressão	44
5.2.6 Determinação das áreas de contato a partir da equação da elipse	47
5.2.7 Deformações elásticas dos pneus agrícolas em superfície rígida	47
5.2.8 Deformação elástica dos pneus em superfície deformável	49
5.2.9 Pressões de inflação dos pneus agrícolas	50
5.2.10 Cargas concentradas	50
5.2.11 Análise estatística	50
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
6.1 Calibração dos sensores	52
6.2 Análise de correlação entre as metodologias de cálculo das áreas de contato	53
6.3 Área de contato em superfície rígida	54
6.4 Deformação elástica em superfície rígida	57
6.5 Área de contato em superfície rígida e deformável	59
6.6 Deformação elástica em superfície rígida e deformável	59
6.7 Síntese dos resultados da análise estatística das variáveis comparativas em superfície rígida	60
6.7.1 Interação entre os fatores pressão de inflação e pneu para a variável área de contato.....	62
6.7.1.1 Análise do fator pneu dentro de cada fator pressão de inflação	62

6.7.1.2	Análise do fator pressão de inflação dentro de cada fator pneu	63
6.7.2	Interação entre os fatores pneu e carga para a variável área de contato.....	63
6.7.2.1	Análise do fator pneu dentro de cada fator carga	64
6.7.2.2	Análise do fator carga dentro de cada fator pneu	64
6.7.3	Interação entre os fatores pressão de inflação e carga para a variável área de contato	65
6.7.3.1	Análise do fator pressão dentro de cada fator carga	65
6.7.3.2	Análise do fator carga dentro de cada fator pressão	66
6.7.4	Interação entre os fatores pneu, pressão de inflação e carga para a variável área de contato	67
6.7.5	Interação entre os fatores pressão de inflação e pneu para a variável deformação elástica	67
6.7.5.1	Análise do fator pneu dentro de cada fator pressão de inflação	68
6.7.5.2	Análise do fator pressão de inflação dentro de cada fator pneu	68
6.7.6	Interação entre os fatores pneu e carga para a variável deformação elástica.....	68
6.7.6.1	Análise do fator pneu dentro de cada fator carga	69
6.7.6.2	Análise do fator carga dentro de cada fator pneu	69
6.7.7	Interação entre os fatores pressão de inflação e carga para a variável deformação elástica	70
6.7.7.1	Análise do fator pressão de inflação dentro de cada fator carga	71
6.7.7.2	Análise do fator carga dentro de cada fator pressão de inflação	71
6.7.8	Interação entre os fatores pneu, pressão de inflação e carga para a variável deformação elástica	72
6.8	Síntese dos resultados da análise estatística das variáveis comparativas para superfície deformável	73
6.8.1	Interação entre os fatores pneu e carga para a variável área de contato	74
6.8.1.1	Análise do fator pneu dentro de cada fator carga	74
6.8.1.2	Análise do fator carga dentro de cada fator pneu	75
6.8.2	Análise do fator pneu para a variável deformação elástica	76
6.8.3	Análise do fator carga para a variável deformação elástica	76

6.8.4 Análise do fator pneu para a variável recalque	76
6.8.5 Análise do fator carga para a variável recalque	76
7 CONCLUSÕES	77
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
APÊNDICE	88

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1 Classificação de pneus para tratores agrícolas, segundo Associação Brasileira de Pneus e Aros (1994)	11
2 Características técnicas dos pneus utilizados nos ensaios estáticos, conforme Goodyear (1994) e Trelleborg (2002)	28
3 Análise física da amostra de Latossolo Vermelho	31
4 Principais características da balança eletrônica	33
5 Pressões de inflação alta, intermediária, baixa e recomendada para cada tipo de pneu, segundo Trelleborg (2002) e Goodyear (1994)	50
6 Síntese das análises de correlação para a variável área de contato obtida por diferentes métodos	55
7 Síntese das análises de correlação para a variável deformação elástica obtida por diferentes métodos	57
8 Síntese da análise de variância e o teste de médias para a variável área de contato e deformação elástica dos pneus agrícolas	61
9 Interação entre os fatores pressão de inflação e pneu para a variável área de contato (m^2)	62
10 Interação entre os fatores pneu e carga (kN) para a variável área de contato (m^2)	63
11 Interação entre os fatores pressão de inflação e carga (kN) para a variável área de contato (m^2)	65
12 Interação entre os fatores pressão de inflação e pneu para a variável deformação elástica (m)	67
13 Interação entre os fatores pneu e carga (kN) para a variável deformação elástica (m)	69
14 Interação entre os fatores pressão de inflação e carga (kN) para a variável deformação elástica (m)	71
15 Síntese da análise de variância e o teste de médias para as variáveis área de contato, deformação elástica e perfil do recalque do pneu no solo	73
16 Interação entre os fatores pneu e carga (kN) para a variável área de contato (m^2)	74

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Partes constituintes do pneu. Fonte: adaptado de Trelleborg do Brasil	9
2 Pneu diagonal (A), radial (B) e BPAF (C). Fonte: adaptado de Trelleborg do Brasil	10
3 Designação das características do pneu radial. Fonte: adaptado de Pirelli	13
4 Deflexão da área de contato pneu-solo, segundo Koolen & Kuipers (1983). Fonte Castro Neto (2001)	19
5 Ilustração frontal dos pneus Diagonal (A), Radial (B) e Baixa Pressão (C)	29
6 Ilustração lateral dos pneus Diagonal (A), Radial (B) e Baixa Pressão (C)	29
7 Prensa hidráulica	30
8 Tanque de solo	31
9 Pórtico e talha	32
10 Célula de carga e seu indicador digital	34
11 Quadros de madeira	34
12 Perfilômetro	35
13 Calibrador de pressão (manômetro)	35
14 Leitores dos sensores (a) e os elementos envolvidos na calibração (b)	37
15 Tanque de solo adaptado à prensa	38
16 Determinação da massa do solo pela balança	39
17 Quadro suspenso pelo pórtico (a), preenchimento do tanque (b) e camada de solo dentro do tanque (c)	39
18 Nivelamento (a) e acondicionamento (b) do solo	40
19 Solo descarregado do tanque	40
20 Prensa adaptada aos acessórios (a) e execução da metodologia (b)	41
21 Acessórios adaptados à prensa	42
22 Massa pronta para estampagem da área de contato do pneu	43
23 Áreas de contato obtidas em superfície deformável (a) e rígida (massa – b; papel carbono – c; pó – d)	44
24 Plataforma e máquina fotográfica da prensa	45

25 Cálculo das áreas no programa AutoCad 2000	46
26 Determinação dos valores do eixo menor (a) e maior da elipse (b)	47
27 Escala graduada acoplada na prensa (a) e leitura da deformação do pneu (b)	48
28 Detalhe da deformação elástica sofrida pelo pneu agrícola	48
29 Perfil da área de contato obtida por perfilometria	49
30 Curva de calibração da balança de pesagem	52
31 Curva de calibração do manômetro da prensa hidráulica	53
32 Modelo de regressão das metodologias de cálculo das áreas de contato	54
33 Modelo de regressão da área de contato obtida pelo método da massa e do pó	55
34 Modelo de regressão da área de contato obtida pelo método da massa e do carbono	56
35 Modelo de regressão da área de contato obtida pelo método do carbono e do pó	56
36 Modelo de regressão da deformação elástica obtida pelo método da massa e do pó	57
37 Modelo de regressão da deformação elástica obtida pelo método da massa e do carbono	58
38 Modelo de regressão da deformação elástica obtida pelo método do carbono e do pó	58
39 Modelo de regressão da área de contato obtida em superfícies rígida e deformável	59
40 Dispersão dos dados de deformação elástica, obtidos em superfícies rígida e deformável.....	60
41 Modelos de regressão das áreas em função das cargas para o pneu BPAF, diagonal e radial.....	64
42 Modelos de regressão linear das áreas em função das cargas para a pressão de inflação alta, intermediária e baixa	66
43 Modelos de regressão das deformações elásticas em função das cargas para o pneu BPAF, diagonal e radial	70
44 Modelos de regressão das deformações elásticas em função das cargas para a pressão de inflação alta, intermediária e baixa	72
45 Modelos de regressão linear das áreas em função das cargas para os pneus BPAF, diagonal e radial	75

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice	Página
1. Lista de abreviaturas dos tratamentos	89
2. Dados originais da área de contato dos pneus agrícolas obtidos pela equação da elipse e digitalização das áreas	90
3. Dados originais da deformação elástica dos pneus e recalque no solo	96

1 RESUMO

O desempenho operacional dos tratores agrícolas é dependente da interação dos rodados e a superfície de contato, sendo de extrema importância a seleção do tipo de pneu, pressão de inflação e lastragem para as diversas operações agrícolas, proporcionando maior eficiência de tração e menor compactação do solo, racionalizando assim, os custos operacionais do sistema produtivo.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar e correlacionar as metodologias de determinação das áreas de contato e deformações elásticas de pneus agrícolas em superfícies rígida e deformável, em função das pressões de inflação e das cargas radiais, com a finalidade de identificar a metodologia mais acurada e prática para cada condição de ensaio estático de pneus.

O experimento foi realizado no Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agrícolas (NEMPA) da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, Câmpus de Botucatu, SP. Os pneus estudados foram do tipo R1 com as seguintes dimensões: pneu baixa pressão e alta flutuação (500/60-26.5) inflado com as pressões de 206,7 kPa, 103,3 kPa e 68,9 kPa; radial (14.9R26) com pressões de inflação de 186,1 kPa, 137,8 kPa e 68,9 kPa e diagonal (14.9-26) com pressões de 206,7 kPa, 137,8 kPa e 68,9 kPa; submetidos as cargas de 5 kN, 10 kN, 15 kN e 20 kN aplicadas por uma prensa hidráulica. As áreas de contato dos pneus agrícolas em superfície deformável foram obtidas em tanque de solo e em superfície rígida

pelo método do pó, carbono e massa. Os valores das áreas de contato foram determinados por duas metodologias de cálculo: equação da elipse e digitalização das áreas.

Os resultados permitiram concluir que a metodologia de cálculo das áreas de contato através da equação da elipse é confiável e prática para obter as áreas de contato dos pneus agrícolas.

Os métodos para obter a impressão das áreas de contato como o pó, carbono e massa podem ser utilizados para obtenção das áreas de contato em superfície rígida.

As áreas de contato dos pneus em superfície deformável apresentaram correlações estatísticas significativas com as áreas obtidas em superfície rígida, ao contrário dos valores de deformações elásticas que não apresentaram correlações estatísticas significativas, evidenciando a importância de avaliar a variável individualmente para cada tipo de pneu.

O pneu radial apresentou maior deformação elástica em superfície rígida, enquanto que o pneu BPAF mostrou maior deformação e menor recalque em superfície deformável, em comparação aos outros pneus ensaiados.

O pneu BPAF e as baixas pressões de inflação dos rodados foram mais susceptíveis à variação da carga, estando diretamente correlacionado com a área de contato.

EVALUATION OF CONTACT AREAS AND ELASTIC DEFORMATIONS METHODOLOGIES OF AGRICULTURAL TIRES IN FUNCTION OF INFLATION PRESSURES AND BALLASTS. Botucatu, 2004, 100p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Programa de Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: FLÁVIO RIELLI MAZETTO

Adviser: KLÉBER PEREIRA LANÇAS

2 SUMMARY

The agricultural tractor performance is depended of interaction among the tire and contact surface, and then, the selection of tire type, its inflation pressure and tractor ballast are very important to several conditions of agricultural operation, proportioning higher efficiency of machines and lower soil compaction, rationalizing the operations costs of crop systems.

This present research had for main objective the evaluation and correlation of methodologies of tire/ground contact areas and elastic deformations of agricultural tires on rigid and deformable surfaces, in function of inflation pressures and ballasts, identifying the methodology most accuracy and practice for each condition of tire static test.

The research was carried out at Agricultural Machinery and Tire Testing Center (NEMPA), Rural Engineering Department of Agronomic Science College, Sao Paulo State University (UNESP), Botucatu/SP, Brazil. The studied tires were of R1 type with the following dimensions: low pressure and high fluctuation tire (500/60-26.5) inflated with pressures of 206,7 kPa, 103,3 kPa and 68,9 kPa; radial ply (14.9R26) with inflation pressures of 186,1 kPa, 137,8 kPa and 68,9 kPa and bias ply (14.9-26) with pressures of 206,7 kPa,

137,8 kPa and 68,9 kPa. Four ballast conditions were applied on the wheels by hydraulic press: 5 kN, 10 kN, 15 kN and 20 kN. The contact areas of the agricultural tires on deformable surface were obtained in soil bin and on rigid surface by powder, carbon paper and modelling mass methods. The contact area values were determined by two calculus methodologies: ellipse equation and areas digitalization.

The results of methodologies used to calculate the contact areas permit to conclude that ellipse equation can estimate with precision and practice the contact areas of agricultural tires.

The powder, carbon paper and modelling mass methods to obtain the foot print can be utilized to obtain the contact areas on rigid surface.

The contact areas obtained on rigid and deformable surfaces were statically correlated and elastic deformations didn't have correlation, and then, it's important to evaluate this variable for each tire type.

The radial tire had highest values of elastic deformation on rigid surface, but on deformable surface, the low pressure and high fluctuation tire showed higher deformation and lower soil sinkage than other tested tires. The high fluctuation tire and low inflation pressures area most susceptible the variation of load to contact area.

Keywords: agricultural tires, contact area, tire deformation, sinkage, inflation pressure, ballast

3 INTRODUÇÃO

O desempenho operacional dos rodados pneumáticos dos tratores agrícolas depende das características físicas do solo, tipo e geometria do pneu, cargas aplicadas aos rodados e sua pressão de inflação. A interação correta entre essas variáveis pode minimizar significativamente os efeitos negativos do tráfego agrícola, melhorar a eficiência operacional dos tratores, elevar a vida útil das máquinas e de seus rodados e consumir combustível de forma racional, aumentando a rentabilidade econômica das culturas.

Upadhyaya & Wulfsohn (1990) definem que as características de desempenho de pneus agrícolas em diferentes condições de solo, submetidos a diversas cargas dinâmicas e pressões de inflação são de grande interesse na adequação dos mesmos dentro da unidade de força motriz, objetivando a execução dos trabalhos de campo de forma mais eficiente.

A interação pneu/solo também está relacionada com a compactação devido ao tráfego agrícola. Porterfield & Carpenter (1986) definem que a compactação superficial depende da pressão de contato, enquanto que a profunda é influenciada pela área de contato, largura do pneu e pela carga suportada pelo mesmo.

Diante da importância de conhecer melhor a característica dos pneus de tratores agrícolas, principalmente aquelas relacionadas ao estudo da interação pneu/solo, pesquisadores têm utilizado diferentes metodologias para determinar as áreas de contato dos

pneus, porém, não se sabe qual delas é a mais acurada para cada condição de ensaio estático de pneus.

Diante dessas considerações foi desenvolvida essa pesquisa, com o objetivo de avaliar as metodologias de obtenção das áreas de contato e deformações elásticas de pneus agrícolas, em função de suas configurações estruturais, pressões de inflação e cargas, nas diferentes superfícies de contato.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Características dos pneus

O rodado pneumático apresenta estrutura em forma de tubo circular, de maneira que, ao se inflar com uma determinada pressão, resiste, dentro dos limites normais de trabalho, as cargas nele aplicadas e as solicitações dinâmicas e estáticas que agem sobre o mesmo. O pneu é composto basicamente por borracha vulcanizada e camadas de cordonéis, também chamadas de lonas (malhas de fibras de algodão, de aço, nylon, poliéster, etc), que se estendem ao longo de sua estrutura (MIALHE, 1980; ATARES e BLANCA, 1996; SÁNCHEZ e RENEDO, 1996).

De acordo com Mialhe (1980), a borracha sintética tem a propriedade de absorver vibrações de modo mais eficiente em comparação com a borracha natural, daí sua importância tanto em aplicações industriais como na fabricação de pneus. Entretanto, essa energia de deformação é transformada em calor; daí a razão de pneus feitos inteiramente de borracha natural apresentarem temperatura menor que os de borracha sintética. Como a temperatura afeta os pontos de junção dos componentes do pneu, ocasionando desagregação, a vida útil será menor, caso seja construído inteiramente de borracha sintética, embora de preço relativamente mais baixo. Com uma mistura dos dois tipos de borracha, natural e sintética, obtêm-se produtos de boa qualidade. Entretanto, para o caso de pneus, quanto maior a

porcentagem de borracha natural, maior será a segurança e a resistência ao desgaste prematuro.

Na construção do pneu, a borracha é responsável por 50% da massa, assumindo a seguinte proporção: banda de rodagem 35%, carcaça 35%, talão 15% e flancos 15%. Entre os outros componentes estão a malha (nylon ou poliéster) e cordonéis (aço). Devido às diferentes propriedades da borracha sintética (maior flexibilidade) e da borracha natural (maior resistência), em cada parte do pneu muda-se a proporção entre esses dois tipos. Nos tratores agrícolas, pelo fato de se movimentarem em baixa velocidade e para diminuir custos, utilizam-se pneus constituídos basicamente de borracha sintética (LOPES, 2000).

De acordo com Mialhe (1974), a durabilidade e o desempenho de um pneumático de tração agrícola dependem, principalmente, do cuidado em manter a pressão exata de inflação. A pressão abaixo do valor indicado acarreta ruptura das lonas por excessiva flexão na zona de esforço, corte da câmara de ar, consumo irregular da banda de rodagem e redução da resistência dos flancos aos impactos causados pelos obstáculos e irregularidades do terreno. Pressão superior àquela prescrita pelo fabricante leva às seguintes conseqüências: perda de tração por diminuição da área de contato e por excesso de patinagem, desgaste prematuro da banda de rodagem e aumento no consumo de combustível. O controle da pressão deve ser realizado a cada duas ou três semanas, usando-se um manômetro confiável.

Wittcott & Reuben (1980) relataram que um pneu é constituído de quatro componentes principais conforme mostra a Figura 1:

- banda de rodagem: parte que está em contato com a superfície de rolamento;
- flancos: paredes laterais;
- talão: parte responsável pelo assento do pneu no aro;
- carcaça: corresponde ao conjunto de camadas ou lonas.

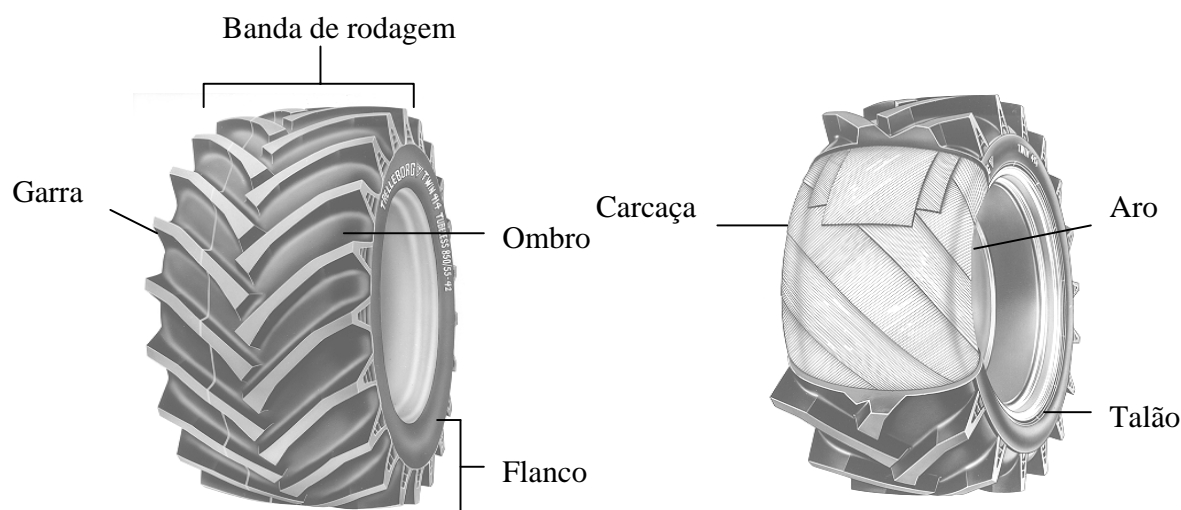


Figura 1. Partes constituintes do pneu. Fonte: adaptado de Trelleborg do Brasil

Segundo a Associação Brasileira de Pneus e Aros (1994), existem três tipos distintos de configuração estrutural de pneus agrícolas de tração: diagonal, radial e baixa pressão e alta flutuação (BPAF).

O pneu diagonal apresenta os cordonéis das lonas dispostos de talão a talão em ângulos menores que 90° (aproximadamente 30° a 40°). Os pneus diagonais são de fabricação nacional e admitem recauchutagem, refletindo em menor custo de aquisição.

O pneu radial apresenta os cordonéis dispostos de talão a talão em ângulo de 90° , em relação à linha de centro da banda de rodagem, o que lhe confere maior flexibilidade. A banda de rodagem apresenta cintas que lhe proporciona uma característica plana da mesma. Os pneus radiais não admitem recauchutagem, implicando em maiores custos de aquisição e não são fabricados no país.

O pneu baixa pressão e alta flutuação (BPAF) apresenta lonas com os cordonéis dispostos diagonalmente em relação à linha de tração do pneu e a banda de rodagem apresenta cintas que lhe proporciona uma característica plana, podendo-se dizer que esse tipo de pneu apresenta banda de rodagem radial e flanco diagonal, permitindo assim, maior flexibilidade e resistência ao mesmo tempo. Os pneus BPAF são mais largos que os outros

tipos de pneus, não são fabricados no Brasil e não admitem recauchutagem, sendo assim, de maior custo de aquisição. A Figura 2 mostra as diferentes carcaças dos pneus diagonais, radiais e BPAF.

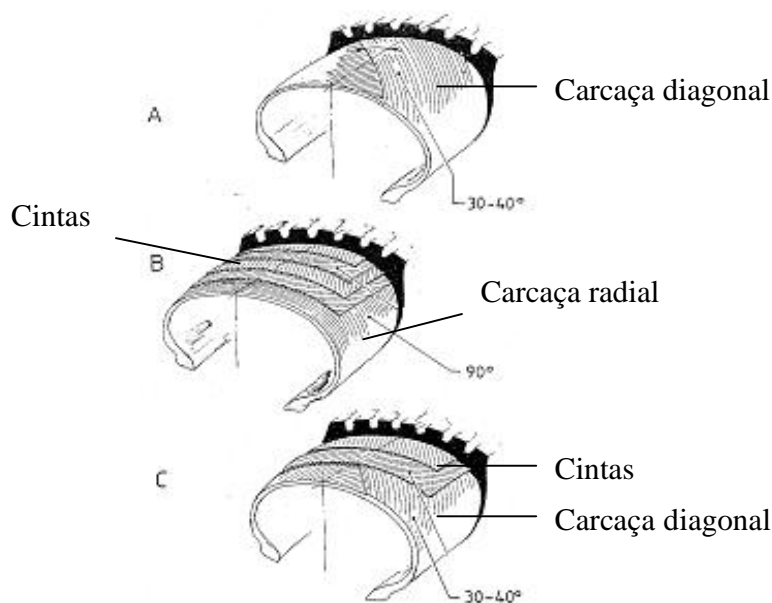


Figura 2. Pneu diagonal (A), radial (B) e BPAF (C). Fonte: adaptado de Trelleborg do Brasil

Hauz (1985), citado por Wulfsohn & Upadhyaya (1996), afirma que as características de construção do pneu radial permitem maiores vantagens de tração, sendo resultado da maior deflexão e melhor distribuição de pressão. Os pneus radiais, normalmente, apresentam área de contato maior que os diagonais de mesmo tamanho, nas mesmas condições de carga e de pressão de inflação.

Para identificar o tipo de pneu, existe uma padronização geral quanto ao tamanho, largura, carga suportada, velocidade máxima, tipo de uso, tipo de construção, entre outras. Especificamente para tratores agrícolas, os pneus de tração se classificam conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação de pneus para tratores agrícolas, segundo Associação Brasileira de Pneus e Aros (1994).

Rodados de tração	
Item	Especificações
R1	Tração regular
R1W	Tração Intermediária
R2	Tração extra (Garra profunda)
R3	Tração baixa (Garra superficial)
R4	Industrial
Rodados direcionais	
Item	Especificações
F1	Uma Raia
F2	Multi-raiado (2 ou mais raias)
F3	Multi-raiado (aplicação industrial)

Quando Vasey e Naylor (1958) realizaram estudos comparando pneus lisos, industriais e agrícolas normais com garras, em solo arado, para testar diferenças na banda e na altura das garras, concluíram que as garras são indispensáveis, proporcionando melhor desempenho. As garras dos pneus permitem uma interação rodado/solo mais eficiente, resultando em melhor tração e auto-limpeza da banda de rodagem.

Taylor (1973) estudou o efeito do ângulo da garra dos pneus em várias condições de superfície, obtendo pouca influência deste parâmetro no desempenho do conjunto. O mesmo autor avaliou o desempenho de tração de pneus 18.4-34 com diferentes espaçamentos das garras e concluiu que o número ideal de garras é 23 para a condição de solo argiloso e de 26 até 29 para solo arenoso.

De acordo com Dias et al. (1996), a altura de garra de um pneu novo, tipo R1 é de, aproximadamente, 33 mm, sendo esta dimensão obtida em seu centro. Os fabricantes de pneus recomendam que a substituição deve ocorrer quando atingirem 10% da altura nominal ou seja 3 mm.

O uso de um modelo de pneu específico para determinado tipo de superfície ou material de suporte (asfalto, pista de solo compactado ou cascalhado, solo agrícola, etc.) permitiria aumentar a sua vida útil. No entanto, a variedade dos solos agrícolas (BARGER et al., 1966; LILJEDAHN et al., 1989) é o fator que dificulta o projeto de componentes de tração que funcionem satisfatoriamente em qualquer situação. Um elemento de tração, de acordo com esses autores, deve ser adequado em 70% do tempo de trabalho e sobre 90% dos terrenos cultivados.

A designação do tamanho dos pneus, segundo as normas técnicas da Associação Brasileira de Pneus e Aros, pode ser expressa, conforme mostra os exemplos a seguir:

- 30.5-32, no qual:

30.5: Indica a largura da seção nominal do pneu sem carga, expresso em polegadas;

32: Indica o diâmetro interno do pneu sem carga, expresso em polegadas;

A ausência da letra “R” indica que o pneu é de construção diagonal.

- 710/70R38, corresponde:

710: Indica a largura da seção nominal do pneu sem carga, expresso em milímetros;

70: Indica a dimensão do flanco (relação entre a altura da seção e a largura), expresso em porcentagem;

R: Indica que o pneu é de construção radial;

38: Indica o diâmetro interno do pneu sem carga, expresso em polegadas.

- 850/60-38 Twin, onde:

850: Indica a largura da seção nominal do pneu sem carga, expresso em milímetros;

60: Indica a dimensão do flanco (relação entre a altura da seção e a largura), expresso em porcentagem;

38: Indica o diâmetro interno do pneu sem carga, expresso em polegadas;

Twin: Indica que o pneu apresenta banda de rodagem radial e flanco diagonal, isto é, pneu baixa pressão e alta flutuação.

A Figura 3 ilustra a designação padronizada das características do pneu radial em seu flanco.

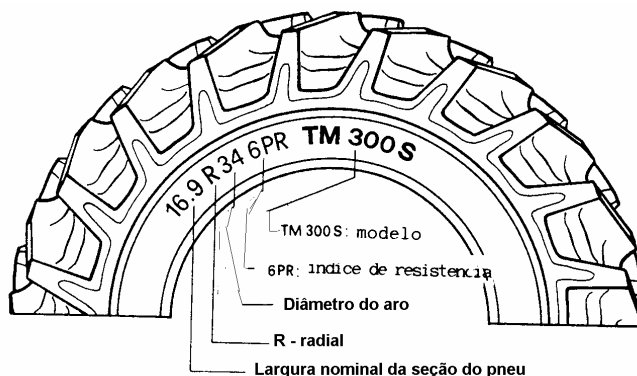


Figura 3. Designação das características do pneu radial. Fonte: adaptado de Pirelli

4.2 Desempenho de rodados pneumáticos

Franz (1988) estudou o desempenho de três pneumáticos com diferentes alturas de garras (33, 21 e 11 mm), em um Latossolo Vermelho de textura argilosa e observou que os melhores resultados da força de tração e da razão dinâmica de tração ocorreram para maior altura da garra (33 mm), com 30% de patinagem. Os parâmetros potência na barra, eficiência de tração e consumo de combustível apresentaram melhores resultados para maior altura das garras; porém, com patinagem de 20%.

Segundo Magalhães et al. (1995), a altura de garra influencia o desempenho do rodado pneumático. Estudando os pneus 14.9-28, com alturas de 35, 24, 16 e 00 mm, em um Argissolo, arado e gradeado com 32,95% de teor de água, concluíram que a altura de 24 mm apresentou melhor coeficiente de tração, enquanto a de 35 mm apresentou maior resistência ao rolamento.

Lopes (1996) avaliou o desgaste máximo de pneus 14.9-26, tipo R1, em função dos índices de patinagem (45, 30 e 15%), na mesma condição de solo. O pneu ensaiado apresentou desgaste, em volume, de 64, 86 e 179 mm³.hora⁻¹ e vida útil estimada de 1650, 2150 e 3200 horas para as respectivas patinagens, considerando que a taxa de desgaste seria uniforme até o final da vida dos pneus.

Potier (1990) comparou o desempenho de um trator realizando a operação de aração, equipado com pneus radiais 20.8R38 (pressão de inflação 248 kPa) e 700/75R34 (pressão de inflação de 150 kPa). Este último pneu apresentou velocidade de deslocamento e capacidade operacional 7% maior, redução da patinagem em 19% e consumo de combustível, expresso em litros por hectare, diminuindo em 10,3%.

Corrêa (2000) avaliou o desempenho operacional de pneus radiais em função da pressão de inflação, da condição de superfície do solo e da condição de acionamento da tração dianteira. O autor concluiu que a pressão baixa e recomendada (62 kPa) nos pneus radiais reduziu o consumo de combustível e a patinagem, com aumento na potência na barra e na capacidade operacional. Porém, uma análise de custo-benefício, revelou que o período de retorno do investimento dos pneus radiais, nas condições do experimento, foi após o quarto ano de uso.

Cordeiro (2000) avaliou o desempenho de um trator em função do tipo de pneu (radial, diagonal e BPAF) em condições de campo, sob duas situações: com o trator trafegando sobre o solo solto, na primeira marcha e sobre rastro da passada anterior, na segunda marcha. Verificou-se que houve menor consumo de combustível para os pneus radiais ensaiados sob pressão de inflação de 110 kPa (16 psi) e carga no pneu traseiro variando de 18.000 N a 22.500 N. O pneu diagonal, com pressão de inflação 124 kPa (18 psi) e carga no pneu traseiro variando de 17.000 N a 22.000 N, apresentou maior capacidade de tração, com menor patinagem para os níveis de força de tração na barra, sob maiores lastragens.

Lopes (2000) também encontrou resultados semelhantes com os três tipos de pneus em condição de preparo do solo com escarificador acoplado a um trator com tração dianteira auxiliar. Os pesos nos pneus traseiros foram 20.430 N para o pneu radial, 20.575 N para o diagonal e 26.215 N para o BPAF, obtendo patinagens de 14,43%, 17,65% e 19,84%, respectivamente. Os resultados evidenciaram vantagens para o trator quando equipado com pneu radial nos seguintes pontos: velocidade de deslocamento, potência na barra, consumo específico, capacidade de campo efetiva, patinagem e coeficiente de tração. O mesmo autor concluiu que a lastragem do pneu, com água, melhorou o desempenho do trator nas seguintes variáveis: velocidade de deslocamento, consumo de combustível, capacidade de campo efetiva e patinagem.

Nagaoka (2001) construiu um equipamento para ensaio dinâmico de rodado agrícola individual e avaliou o desempenho dinâmico de pneus diagonal e radial, não obtendo diferença, estatisticamente significativa, para os seguintes parâmetros: força líquida, torque, velocidade, patinagem, resistência ao rolamento, coeficiente de tração líquida e bruta.

Taylor et al. (1967) relacionaram o desempenho do trator com as dimensões dos pneus. Os resultados mostraram que aumentando o tamanho do pneu, o efeito é positivo na eficiência de tração dos tratores.

De acordo com Thanden (1962), o uso de pneu de construção radial pode aumentar a força de tração em até 29%. O autor menciona que a vantagem de usar pneu radial foi quando a patinagem era menor (16%).

Upadhyaya & Wulfsohn (1989) avaliaram os pneus radiais e diagonais em vários tipos de solo e chegaram à conclusão que o tipo construtivo dos pneus influencia na durabilidade e no desempenho de tração dos tratores, porém as condições de solo são os fatores mais influentes no desempenho dos rodados pneumáticos.

4.2.1 Lastragem e pressão de inflação

Cordeiro (1994) avaliou o efeito da lastragem no desempenho de um trator agrícola e observou que o consumo horário de combustível dependeu apenas da rotação e da carga aplicada na barra de tração, sendo que, tanto as condições de lastragem quanto às condições do solo, não tiveram influência significativa no seu comportamento. A combinação de pressão baixa\correta e o uso de pneus de construção radial tem sido uma alternativa para minimizar o efeito da compactação e aumentar a eficiência de tração.

Corrêa et al. (1997) compararam o desempenho de um trator agrícola 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) equipado com pneus radiais (650/75R32 inflados com 69 kPa e 18.4R26 com pressão de 103 kPa) e diagonais (24.5-32 inflados com 138 kPa e 18.4-26 com pressão de 152 kPa). Os resultados obtidos, nessas condições, permitiram verificar que houve melhor desempenho de tração para os pneus radiais, pois o trator desenvolveu 7,7% a mais de velocidade de deslocamento e a patinagem foi reduzida em 28,8%.

Barger et al. (1966) concluíram, por meio de equações, que a tração de um pneu pode ser melhorada pela diminuição de sua pressão de inflação, pois se obtém maior área de contato com o solo. O aumento da pressão proporcionou maior resistência ao rolamento do rodado, quando trafegando sobre areia solta, devido ao aumento do recalque no solo.

Bashford et al. (1992) estudaram, em condições de campo, a utilização de três pressões de inflação (55; 83 e 124 kPa) em um trator equipado, alternadamente, com os seguintes pneus radiais: 18.4R42; 18.4R46 e 12.4R54. Os autores concluíram que os pneus inflados com menor pressão apresentaram melhor desempenho, tomando-se como base a patinagem.

Seraut (1990) estudou o pneu 20.8R38, suportando 39 kN, em duas situações de pressões: 80 e 160 kPa e constatou que a pressão na superfície do solo é semelhante à de inflação do pneu e que a pressão a 30 cm de profundidade no solo tem relação direta com a carga suportada pelo pneu.

Grisso et al. (1991) avaliaram o desempenho tratorístico dos pneus de tração 18.4R42 e 18.4R46, montado em tratores agrícolas 4x2 e 4x2 TDA, em três diferentes superfícies de solo. Os resultados foram influenciados pela alta pressão de inflação e condição do solo, cujos fatores reduziram as vantagens do pneu radial 18.4R46, não havendo ganho aparente de tração.

Ensaio de pneus agrícolas realizados por Lanças et al. (1995), na Universidade da Califórnia – EUA, permitiu concluir que a utilização de pressão baixa, porém ideal, resultou em alta capacidade tratorística, baixo consumo de combustível, alta produtividade operacional e baixo grau de compactação do solo.

Milan (1986) avaliou o desempenho de um trator em função do tipo de pneu e da lastragem, concluindo que o nível de carga sobre o rodado motriz é fator determinante no desempenho do trator, quando se refere à velocidade de deslocamento e a potência na barra de tração.

Nagaoka (2001) ressalta a importância da avaliação da carga sobre o rodado motriz dos tratores agrícolas, haja visto que influencia o desempenho do trator e, conseqüentemente, o desgaste dos pneus. Essa carga é diretamente afetada pela força em decorrência da variação nos valores da transferência de peso, o que, segundo Balastreire

(1990) em termos práticos, é a capacidade do trator de utilizar o próprio peso em benefício da aderência dos pneus e de ganho de tração.

Segundo Yanai (1994), a pressão de inflação e a quantidade de carga sobre o rodado motriz é a combinação de maior influência no desempenho do trator agrícola. Nesse trabalho foram aplicados quatro níveis de cargas sobre o rodado inflado com quatro pressões distintas. Utilizou-se um trator com tração dianteira auxiliar, pneus diagonais e os testes foram realizados em condição de solo não mobilizado. Os resultados mostraram que a pressão de inflação teve influência significativa na velocidade de deslocamento, patinagem e potência na barra de tração, sem, no entanto, apresentar uma tendência de comportamento. A interação entre pressão de inflação e carga sobre o rodado mostrou que determinadas combinações desses dois fatores foram favoráveis para o desenvolvimento de maior velocidade de deslocamento e menor patinagem.

4.2.2 Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento é definida como a potência consumida para deslocar livremente um pneu, sendo afetada pelos seguintes fatores: pressão de inflação, diâmetro externo, largura, lastro, deflexão, tipo de construção, material de fabricação, altura das garras, patinagem do pneu, declividade, condições da superfície, temperatura, velocidade de trabalho e tipo de solo (NAGAOKA, 2001).

Conforme relatam Burt & Bailey (1982), a redução da lastragem dos pneus reflete em menor pressão de contato pneu/solo, proporcionando menor recalque e, conseqüentemente, diminuição da resistência ao rolamento dos rodados pneumáticos.

Gadanha Júnior (1993) procurou avaliar o comportamento da resistência ao rolamento de um pneu agrícola diagonal com dimensões 18.4-34. Esse estudo foi realizado em solo preparado e o pneu foi submetido a três pressões de inflação (110, 152 e 193 kPa), três velocidades de deslocamento (1,33; 1,92 e 3,07 m.s⁻¹) e cinco condições de lastragem (9,3; 11,3; 13,5; 16,5 e 19,4 kN). Os dados mostraram que o aumento dessas variáveis resultou em aumento linear da resistência ao rolamento, sendo que a maior influência foi causada pela variável lastragem, seguida pela velocidade de deslocamento e com menor intensidade pela

pressão de inflação. O autor ainda sugere um modelo de ajuste relacionando resistência ao rolamento com as demais variáveis estudadas.

Sendo a resistência ao rolamento um parâmetro importante no estudo de dispositivos de tração, Kollen & Kuipers (1983) desenvolveram um estudo comparando rodado pneumático e esteira. Os autores chegaram à conclusão que a resistência ao rolamento é menor para as esteiras, em condição de campo, devido ao recalque ser menor.

4.3 Interação pneu/solo

Para melhor desempenho de uma máquina agrícola é necessário avaliar a interação entre o rodado e a superfície, expressa em termos de área de contato, tornando um parâmetro de importância fundamental (PLACKETI, 1985). O tamanho e a forma da área são determinados pelas propriedades estruturais do solo e do rodado. Como a maioria destes veículos é equipada com rodados pneumáticos, os problemas envolvendo a sua interação com o solo se tornam bastante complexos (CASTRO NETO, 2001).

No estudo da interação pneu/solo, existe a necessidade de descrever a área de contato entre os mesmos (HALLONBORG, 1996). A carga no pneu e a área resultam em pressão no solo, o que implica em alterações nas características físicas do mesmo.

O rodado pneumático, movendo-se em uma superfície deformável, deflete, assim como recalca, evidenciando a complexidade em estudar a interação dinâmica do pneu com o solo. A Figura 4 ilustra a deflexão da área de contato, segundo Koolen & Kuipers (1983), onde os autores concluíram que a profundidade do rastro (d) aumentou com a elevação da patinagem e com o decréscimo da resistência do solo. A razão L_1/L_2 diminui com aumento da pressão de inflação e da patinagem e com o decréscimo da resistência do solo. Deve-se notar que o ponto de maior recalque não ocorre na posição vertical central do pneu.

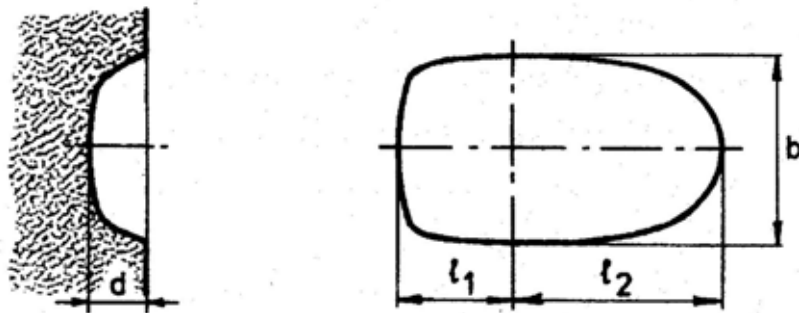


Figura 4. Deflexão da área de contato pneu-solo, segundo Koolen & Kuipers (1983). Fonte Castro Neto (2001).

Para que a área de contato fosse simétrica em relação a um eixo transversal perpendicular ao pneu, seria necessário que o tráfego ocorresse em uma superfície totalmente elástica (HALLONBORG, 1996), condição esta que não ocorre no caso do tráfego com fins agrícolas ou florestais. O tráfego "fora-de-estrada" provoca deformações plásticas no solo e, conseqüentemente, a área de contato não é simétrica, sendo maior para a parte da frente do pneu (WULFSOHN & UPADHYAYA, 1992a; WULFSOHN & UPADHYAYA, 1992b; SCHWANGHART, 1990). Se o pneu estiver operando em local com inclinação lateral ou for levado a uma constante inclinação lateral, a área de contato será assimétrica ao longo da linha longitudinal do pneu. Teoricamente, cada quadrante da área de contato poderá apresentar uma forma elíptica diferente (HALLONBORG, 1996).

4.3.1 Determinação da área de contato

Os métodos utilizados para a determinação do tamanho e forma da área de contato do pneu são baseados principalmente no resultado de ensaios conduzidos em condições estáticas, simulando a condição de um pneu em movimento (BLASZKIEWICS, 1990; KOMANDI, 1976; TAYLOR et al., 1980; GODBOLE et al., 1993).

Existem diversas metodologias para obter as impressões dos pneus na superfície de tráfego, uma delas é a aspersão de pó ou tinta nas extremidades do contato do pneu com um papel sensível, para promover a impressão das áreas de contato no referido

papel. Upadhyaya & Wulfsohn (1990a) realizaram experimento de campo com três pneumáticos de construção radial e a área de contato do pneu foi determinada utilizando-se um prato de aço coberto por papel carbono e folhas brancas, acima dos quais, o pneu era prensado, para promover a impressão das áreas nas referidas folhas.

O contato entre uma superfície rígida e um pneu pode ser descrita por um círculo, principalmente se o pneu for do tipo diagonal e apresentar alta pressão de inflação (HALLONBORG, 1996). Menor pressão de inflação dos pneus e maior rigidez do solo proporcionam geometria elíptica da área.

A área de contato (A) elíptica é calculada por:

$$A = (\pi/4).L.b \quad (1)$$

onde:

L: eixo maior da elipse;

b: eixo menor da elipse.

A impressão do pneu com o solo foi determinada por Godbole et al. (1993) assumindo geometria elíptica ou retangular do pneu, em contato com uma superfície rígida. Os autores afirmam que, na prática, a área de contato é diferente dessas geometrias, devido a variações no valor do recalque das diferentes superfícies, introduzindo um coeficiente de correção que assume valor maior que um para superfícies deformáveis e, obviamente, valor um para superfícies rígidas.

Por outro lado, baixas pressões de inflação ou altas cargas podem levar a uma sobrecarga nos pneus, provocando grandes deformações em solo mobilizado. Estas condições de baixa pressão e ou altas cargas proporcionam áreas de contato próximas de uma elipse, com a parte central da área apresentando tendência a ser retangular. Para representar esse fenômeno, Lyasko (1994) assumiu área de contato retangular com as bordas arredondadas. Esta aproximação levou à utilização de um coeficiente de correção η , que subtrai estas margens, sendo a área calculada por:

$$A = (\pi/4).L. b.[1-(2.\eta/\pi)] \quad (2)$$

sendo:

L: a dimensão do eixo maior da elipse circunscrita na área de contato;

b: a dimensão do eixo menor da elipse circunscrita na área de contato;

π : 3,1416

O valor de η depende da deformação do pneu, carga e pressão de inflação e pode ser nulo quando a largura da área for menor que a do pneu. Quando a largura da área for maior que a do pneu, o valor de η será obtido pela seguinte equação (UPADHYAYA & WULFSOHN, 1990b):

$$\eta = [2(1 - w/b)]^{0.5} - (w/b)[1 - (w/b)^2]^{0.5} \quad (3)$$

sendo:

w: largura da área de contato;

b: largura do pneu.

Santos (2003) avaliou as áreas de contato dos pneus diagonais (23.1-30), radiais (620/75R30) e baixa pressão (600/60-38) sob duas pressões de inflação (alta e baixa) e quatro cargas (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 kN) em dois tipos de solo (arenoso e argiloso). Diante dos parâmetros analisados, o pneu BPAF apresentou melhores resultados de área de contato, seguido pelo radial e por fim diagonal. As áreas de contato dos pneus foram maiores em solo arenoso e o método dos Elementos Finitos superestimou os valores de área de contato, quando comparado com o cálculo através da equação da elipse.

Castro Neto (2001) desenvolveu um sistema computadorizado para o cálculo da pressão de contato pneu/solo e enfatiza a praticidade e confiabilidade dos resultados obtidos por tal sistema.

Mazetto & Lanças (2000) avaliaram as áreas de contato de pneus BPAF (500/60 - 26.5), radial (14.9R26) e diagonal (14.9 - 26), sob duas pressões de inflação

(206,85 kPa e 68,90 kPa) e 6 cargas radiais (1; 5; 10; 15; 20; 25 kN). Os resultados relativos às áreas de contato mostraram que o pneu BPAF apresentou maior área em relação aos outros pneus ensaiados. Quanto a pressão de inflação, verificou-se que todos os pneus ensaiados apresentaram maiores áreas de contato para a pressão de 68,90 kPa, o mesmo acontecendo quando se aumentavam as cargas radiais aplicadas sobre os pneus agrícolas.

Mazetto et al (2003) realizaram um ensaio de três tipos de pneus; BPAF (500/60-26.5), radial (14.9R26) e diagonal (14.9-26), em tanque de solo, com o intuito de avaliar as áreas de contato, deformações elásticas, compactação e o recalque no solo. Os pneus foram inflados com as pressões ideais e submetidos às cargas radiais de 5, 10, 15 e 20 kN. Os resultados relativos às áreas de contato e deformações elásticas mostraram valores maiores para o pneu BPAF. Os recalques do pneu BPAF no solo foram menores, quando comparados aos outros rodados pneumáticos, resultando em menores compactações do solo.

4.3.2 Variáveis que afetam a área de contato

Sharma & Pandey (1996) afirmam que as características de eficiência de um rodado dependem, em grande parte, não somente da pressão de contato, mas também do tamanho e da forma da área de contato. Concluem que, para um rodado pneumático, a aproximação elíptica é o melhor estimador para a área de contato pneu-superfície.

Chancellor (1977) afirmou, de uma maneira geral, que a pressão entre um rodado pneumático e a superfície sobre a qual ele atua é aproximadamente igual à pressão de inflação do pneu. Assim, se a carga vertical que age no pneu aumenta e a pressão de inflação permanece constante, o pneu se deformará de tal forma que o produto da pressão média pela área de contato será igual à carga vertical.

Porterfield & Carpenter (1986), utilizando a pressão média de contato de um pneu em uma superfície rígida, encontraram que o nível de compactação superficial depende da pressão de contato, enquanto que a compactação profunda depende da área de contato, largura do pneu e da carga suportada pelo mesmo.

Como demonstrado em diversos estudos (BAILEY et al., 1996; ERBACH & KNOLL, 1992; BAILEY & BURT, 1988; RAPER et al., 1994; ARVIDSON & RISTIC, 1996), o aumento na pressão de inflação do pneu aumenta a tensão vertical no solo,

com conseqüentes incrementos na compactação do solo, o que enfatiza a importância de utilizar a menor pressão de inflação possível para cada combinação de pneu e carga no eixo do equipamento (ARVIDSON & RISTIC, 1996; LANÇAS, 1996b; LANÇAS & UPADHYAYA, 1997; BAILEY et al. 1996).

A densidade do solo na região de tráfego tende a aumentar com o aumento da pressão de inflação. O efeito da pressão de inflação se torna maior com o aumento da carga no eixo (ERBACH & KNOLL, 1992).

Para verificar a influência da pressão de inflação na compactação do solo, Munson et al. (1994), mediram a tensão no solo, por meio de transdutores instalados a várias profundidades, quando submetido ao tráfego de um trator equipado com pneus radiais, com três pressões de inflação, sem carga e com carga suficiente para provocar uma patinagem de 8%. Concluíram que o trator utilizando pneus com pressão de inflação de 48 kPa causou menor tensão no solo do que com pressão de inflação de 106,5 kPa o qual, por sua vez, causou menores tensões do que aquele com pressão de inflação de 165 kPa.

A variação da área de contato efetiva de um pneu, definida como a área de uma superfície rígida que realmente suporta a carga, é diretamente proporcional à carga e inversamente proporcional à pressão de inflação (ABEELS, 1976).

4.4 Deformação elástica dos rodados agrícolas

Nos últimos tempos, a modernização da agricultura leva à utilização de pneus mais largos (HALLONBORG, 1996). A utilização de pneus maiores e mais largos diminui os galopes ("power hop") dos tratores 4x2 TDA além de diminuir os problemas de compactação do solo, permitindo trabalhar com menores pressões de inflação para a mesma carga e melhorando a trafegabilidade (LANÇAS et al., 1998; LANÇAS & UPADHYAYA, 1997).

Segundo Wiley et al. (1992), o ajuste da pressão dos pneus radiais de acordo com o peso estático é fundamental para se obter uma adequada taxa de deformação do pneu. Sempre que possível, deve-se ter a maior flexibilidade do pneu, obtendo-se o melhor desempenho, a menor compactação do solo e menor sensibilidade ao "power hop" (galope do trator).

A elasticidade de rodados pneumáticos e sua deformação têm grande importância no estudo da capacidade de tração, estabilidade do trator, segurança e preservação da integridade física do operador. Kim & Rehkugler (1987) e McMullan et al. (1988) concluíram que a maior influência na deformação e elasticidade dos rodados pneumáticos, principalmente em superfícies rígidas, está relacionada com as dimensões, tipo de construção, rigidez de carcaça, pressão de inflação e da carga dinâmica sobre o mesmo.

Upadhyaya & Wulfsohn (1990a) realizaram experimento de campo com três pneumáticos de construção radial, cujas dimensões são 16.9R38, 18.4R38 e 24.5R32, três níveis de pressões de inflação dos pneus (83; 103,5 e 124 kPa) e três valores de carga aplicada na roda (17,8; 22,2 e 26,7 kN) para relacionar os valores de deformação elástica com as áreas de contato dos pneus e obter as equações que regem esse fenômeno. Para cada tratamento, a área de contato do pneu foi determinada utilizando-se um prato de aço coberto por papel carbono e folhas brancas, acima dos quais, o pneu era colocado (foi realizada uma medição estática).

Os resultados apresentaram como melhores equações para descrever a relação entre deformação dos pneus e área de contato, as que seguem:

$$\frac{L_c}{d} = 2\sqrt{\delta_z/d} \quad (4)$$

em que,

L_c = comprimento de contato entre o pneu e o solo;

L_w = largura de contato;

d = diâmetro do pneu, e

δ_z = deformação do pneu.

$$A_c = \frac{L_c \cdot L_w}{4} (\pi - 2\eta) \quad (5)$$

sendo:

$$\frac{L_w}{2R_2} = 2\xi \sqrt{\frac{\delta_z}{2R_2}} \quad (6)$$

com $\xi = 0,782$ e $R_2 =$ raio de contato pneu/solo.

O valor de η depende da deformação do pneu, carga e pressão de inflação e pode ser nulo quando a largura da área for menor que a do pneu. Quando a largura da área for maior que a do pneu, o valor de η será obtido pela seguinte equação:

$$\eta = [2(1 - w/b)]^{0,5} - (w/b)[1 - (w/b)^2]^{0,5} \quad (7)$$

sendo:

w: largura da área de contato;

b: largura do pneu.

Upadhyaya & Wulfsohn (1990b) estudaram a relação entre a deformação elástica e a área de contato em rodados radiais, em função da carga no rodado, a pressão de inflação e as dimensões dos pneus. Os autores concluíram que a deformação elástica influenciou a área de contato dos rodados pneumáticos, sendo que menores deformações proporcionaram área de contato elíptica e deformações maiores resultaram em áreas de contato retangulares com bordas curvas.

De acordo com Inoue et al. (1996), a elasticidade de pneus e a conseqüente deformação dos mesmos influenciam o comportamento do trator no que se diz respeito a vibrações, estabilidade lateral e capacidade de tração. Os autores estudaram a deformação lateral dos pneus diagonais 14.9-28 (R1) e 7.50-16 (F1), combinando três alturas de garras (R1) e frisos (F1), quatro pressões de inflação, quatro cargas verticais e cinco cargas laterais. Os resultados demonstraram que para os pneus dianteiros (F1), as deformações elásticas apresentaram maior influência da pressão de inflação, seguida da altura dos frisos e

por último pela carga vertical. Entretanto, para os pneus traseiros (R1), as deformações elásticas foram influenciadas pela altura das garras, seguida pela pressão de inflação e, finalmente, pela carga vertical.

Dias et al. (1993a), Dias et al. (1993b) e Dias et al. (1995) estudaram a elasticidade de pneumáticos agrícolas através da deformação horizontal e vertical dos pneus e apresentaram equações matemáticas que relacionaram as referidas variáveis em função da pressão de inflação e profundidade das garras.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material¹

5.1.1 Área experimental

A presente pesquisa foi realizada no Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agrícolas (NEMPA), nas dependências do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, Câmpus de Botucatu/SP.

5.1.2 Pneus

Os pneus ensaiados neste trabalho foram do tipo R1, recomendados para uso no eixo dianteiro de tratores com tração dianteira auxiliar (TDA), sendo um deles de configuração diagonal da Goodyear, fabricado no Brasil, outro radial da Goodyear, fabricado na França e o terceiro BPAF (baixa pressão e alta flutuação), produzido na Suécia pela Trelleborg, apresentando como principais características diferenciais, o tipo de construção, o

¹ As citações de marcas comerciais não implicam na recomendação de uso pelo autor.

índice de carga, a largura e a pressão de inflação. As características técnicas dos pneus estão descritas na Tabela 2 e podem ser visualizadas nas Figuras 5 e 6.

Tabela 2. Características técnicas dos pneus utilizados nos ensaios estáticos, conforme Goodyear (1994) e Trelleborg (2002).

Características	Pneus		
	BPAF	Radial	Diagonal
Dimensão	500/60-26.5	14.9R26	14.9-26
Lonas / Índice de Carga	12	10	10
Modelo	414 TL	Dyna Torque Radial	Dyna Torque II
Aro	AG 16.00x26.5	DW 13.00x26	DW 13.00x26
Profundidade das garras (mm)	50	49	49
Diâmetro (mm)	1260	1320	1334
Largura (mm)	500	375	376
Circunferência de rolamento (mm)	3755	3951	3974
Raio estático com carga (mm)	580	600	615
Carga máxima (kN)/Pressão de inflação (kPa) a 40 km/h	25,75/240	15/210	18,5/220
Carga máxima (kN)/Pressão de inflação (kPa) a 10 km/h	38,65/300	17,5/230	21,3/340



Figura 5. Ilustração frontal dos pneus Diagonal (A), Radial (B) e BPAF (C).



Figura 6. Ilustração lateral dos pneus Diagonal (A), Radial (B) e BPAF (C).

5.1.3 Prensa hidráulica

A prensa hidráulica, constituída de perfis e tubos de aço carbono, apresenta um eixo acionado por um pistão hidráulico, onde cada pneu agrícola foi fixado, com a finalidade de impor cargas concentradas sobre o referido eixo, simulando assim, as interações entre máquinas e seus rodados pneumáticos. A prensa hidráulica possui em seu interior um carro móvel, que permite adaptações em sua estrutura, a fim de caracterizar diferentes superfícies de contato dos pneus, rígida ou deformável (SANTOS, 1999; MAZETTO & LANÇAS, 2000; MAZETTO et al., 2001). A prensa hidráulica e os componentes podem ser visualizados na Figura 7.

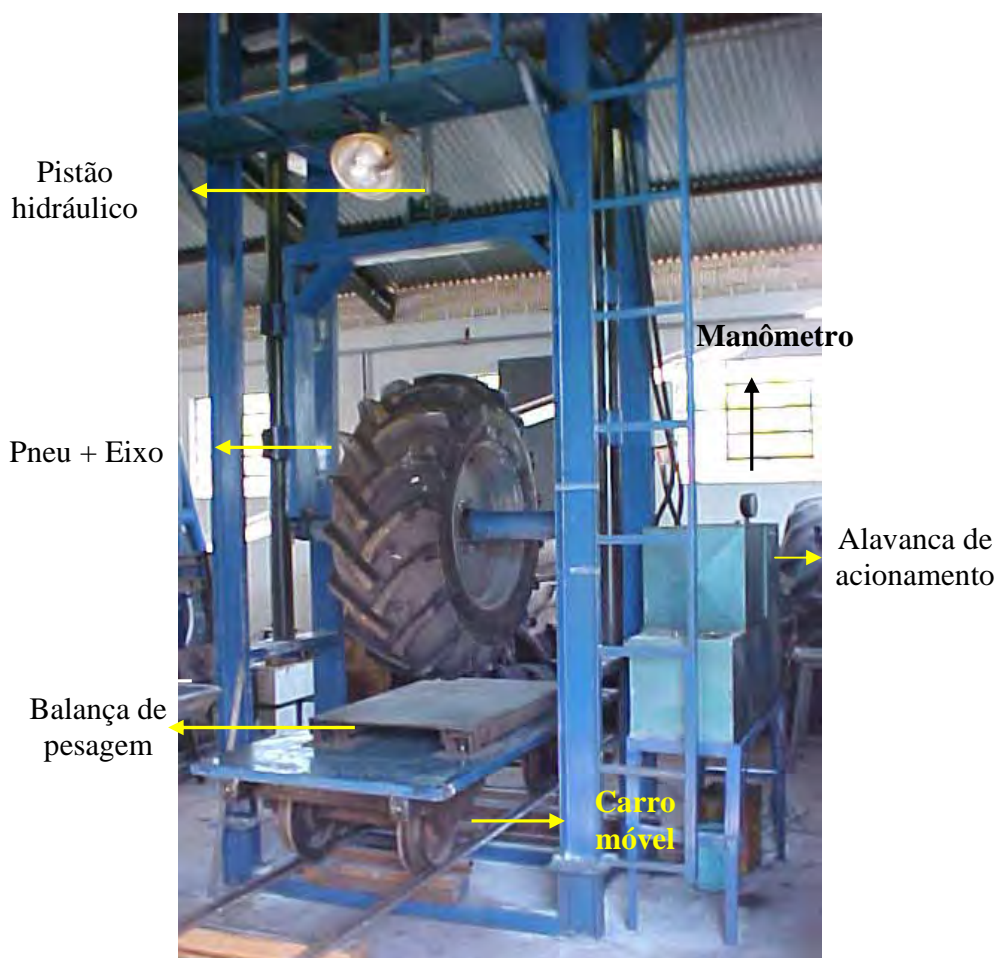


Figura 7. Prensa hidráulica.

5.1.4 Tanque de solo

O tanque de solo foi construído com chapas e perfis de aço, para ser adaptado ao carro móvel da prensa hidráulica, com a finalidade de simular e avaliar o comportamento dos rodados pneumáticos em superfície deformável.

O tanque apresenta as seguintes dimensões: 1,0 m de largura, 2,0 m de comprimento e 0,70 m de altura. O tanque de solo pode ser visualizado na Figura 8.



Figura 8. Tanque de solo

5.1.5 Solo

Os ensaios foram realizados em uma amostra de Latossolo Vermelho, textura média, apresentando $0,0804 \text{ kg.kg}^{-1}$ (8,04%) de teor de água. A Tabela 3 apresenta as características físicas da amostra de solo utilizada no ensaio, obtida segundo metodologia da Embrapa (1979).

Tabela 3. Análise física da amostra de Latossolo Vermelho.

Areia	Argila	Silte	Argila Nat.	Textura do Solo	Densidade das Partículas	Densidade do Solo
(%)	(%)	(%)	(%)		(g.cm^{-3})	(g.cm^{-3})
65	32	3	2	Média	2,76	1,48

5.1.6 Pórtico e talha

Uma talha com capacidade de 30 kN marca Koch, modelo SC3, foi anexada a um pórtico construído de perfis e vigas de aço, com o intuito de proporcionar a transferência do solo para o interior do tanque, conforme mostra a Figura 9.



Figura 9. Pórtico e talha.

5.1.7 Massa modelável

A massa modelável é constituída de gesso industrial e óleo vegetal (“massa de vidraceiro”) e foi utilizada para estampar a área de contato dos pneus.

5.1.8 Gesso

O gesso foi utilizado para obter a impressão dos rodados pneumáticos em superfície rígida, já que por apresentar pequena granulometria ocupava todos os espaços, delimitando a área de contato dos pneus.

5.1.9 Papel carbono e de seda

Papel carbono de tecido e papel de seda foram utilizados para caracterizar as impressões dos pneus agrícolas em superfície rígida.

5.1.10 Balança de pesagem

A balança de pesagem, tipo plataforma, fabricada pela J-Star Eletronics, foi utilizada para determinar a massa de solo a ser adicionada ao tanque, bem como a aferição das cargas impostas aos pneus agrícolas pela prensa hidráulica. As especificações da balança estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4. Principais características da balança eletrônica.

Características	Descrição
Marca	J-Star Eletronics
Modelo	6000
Distribuidor	Casale do Brasil S.A.
Alimentação	110V com conversor para 12V
Capacidade bruta	33.240N
Painel indicador de peso digital	P/N 146771
Precisão em fundo de escala	1%

5.1.11 Célula de carga

Para calibração do manômetro da prensa hidráulica e da balança de pesagem foi utilizada uma célula de carga marca Interface, modelo ST 5K, com capacidade de 50000 N e aferida pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia), sendo as leituras das respectivas cargas realizadas através de um indicador digital marca Presys, modelo DMY – 2030, ilustrado na Figura 10.



Figura 10. Célula de carga e indicador digital.

5.1.12 Quadros de madeira

Para manipulação e padronização das dimensões dos moldes de massa foram utilizados dois quadros de madeira, sendo um deles utilizado sobre as áreas de contato menores, por apresentar 0,50 m de comprimento e largura e 0,05 m de altura e outro sobre as áreas de contato maiores com dimensões 0,80 m de comprimento e largura e 0,05 m de altura, conforme mostra a Figura 11.



Figura 11. Quadros de madeira.

5.1.13 Perfilômetro

O perfilômetro foi construído para determinação dos recalques dos rodados pneumáticos, tendo 0,95 m de largura, 1,95 m de comprimento e hastes de 0,38 m de comprimento. O mesmo apresenta 17 hastes no comprimento e 13 na largura, distanciadas 0,15 m, sendo o mesmo, acoplado à estrutura do tanque de solo. A Figura 12 ilustra o perfilômetro.



Figura 12. Perfilômetro.

5.1.14 Medidor de pressão dos pneus

A pressão de inflação dos rodados pneumáticos foi aferida por um medidor de pressão para até 380 kPa (55 psi).

A Figura 13 ilustra o calibrador de pressão de inflação dos pneus.



Figura 13. Calibrador de pressão (manômetro).

5.1.15 Equipamentos e acessórios

Nesse estudo foram utilizados os seguintes equipamentos e acessórios:

- Câmara fotográfica digital, Mavica Sony Mvc–FD85, para gravar e armazenar as imagens da impressão dos rodados pneumáticos nas diferentes superfícies.
- Caixas de madeira para acondicionar a massa modelável e o gesso em seu interior, para obter a impressão dos rodados.
- Trena metálica e escala de aço graduada para realizar as leituras de deformações dos pneus e dimensões das áreas de contato.
- Espátula e régua metálica para promover o nivelamento da massa modelável e do solo.
- Capa plástica para isolar a massa dos pneus agrícolas.
- Cilindro metálico para promover o acondicionamento do solo, bem como seu nivelamento.
- Lâmina de lixa colocada sobre a superfície rígida para promover maior atrito entre a superfície e os pneus, com a finalidade de realçar a impressão dos rodados.
- Pá, enxada e peneira com malha para manipulação e peneiramento do solo.

5.1.16 Programas computacionais

Os programas computacionais utilizados foram:

- AutoCad 2000 para calcular a área de contato pneu/superfície.
- Planilha Excel para compilação do banco de dados.

5.2 Métodos

5.2.1 Calibração dos sensores

A balança de pesagem e o manômetro da prensa hidráulica foram calibrados através de uma célula de carga. A célula de carga foi colocada sob o pneu agrícola,

acoplado na prensa hidráulica, e acima da balança de pesagem. Várias cargas foram aplicadas sobre o pneu e, simultaneamente, foram registradas as leituras das referidas cargas na célula, na balança de pesagem e no manômetro da prensa, para compará-las por meio de regressão. A Figura 14 ilustra a calibração dos sensores.

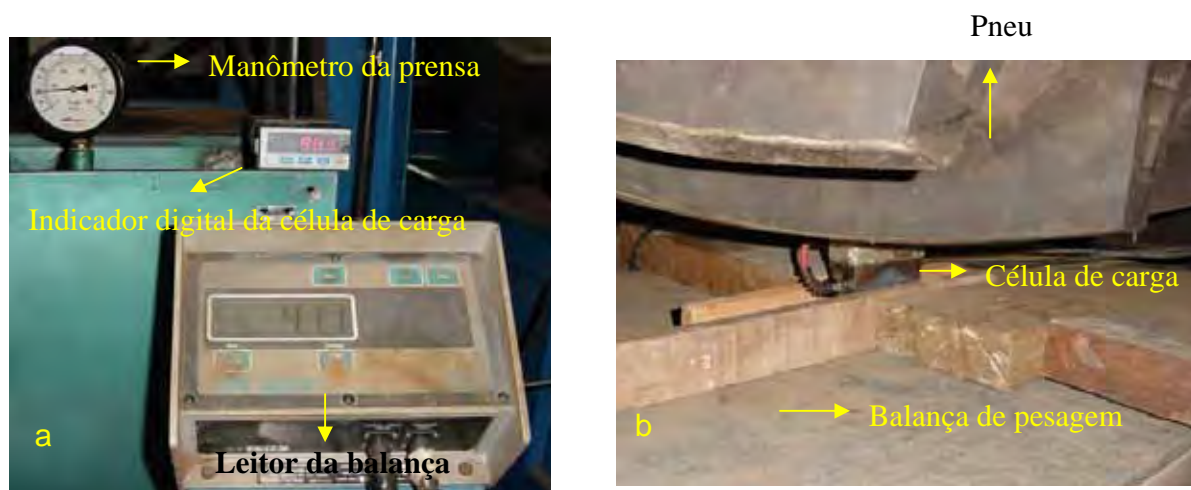


Figura 14. Leitores dos sensores (a) e os elementos envolvidos na calibração (b).

5.2.2 Aplicação da carga aos pneus

A aplicação de cargas concentradas aos pneus foi realizada pela prensa hidráulica. As leituras dessas cargas foram feitas pelo manômetro, quando a superfície de contato era deformável. Para a superfície rígida, as leituras foram realizadas através de uma balança de pesagem, localizada sobre o carrinho da prensa e abaixo do pneu.

5.2.3 Obtenção da impressão dos pneus em superfície deformável

A impressão dos pneus sobre uma superfície deformável foi obtida através da aplicação de cargas aos rodados pela prensa hidráulica, sobre um tanque preenchido com solo, localizado sob a referida prensa, com a finalidade de simular o comportamento dos rodados em condições de solo preparado. A Figura 15 mostra a prensa e o tanque de solo.



Figura 15. Tanque de solo adaptado à prensa.

Antes de o tanque estar preenchido de solo, foi construído um suporte de madeira de 0,20 m de altura para ser inserido na base do referido tanque, perfazendo 0,40 m de profundidade e capacidade volumétrica de $0,741 \text{ m}^3$. O tanque de solo foi dividido em quatro camadas de 0,10 m, sendo que três delas foram preenchidas com 250 kg de solo e a última com 230 kg. O volume de 741 dm^3 do tanque foi preenchido com 980 kg da amostra de solo, obtendo uma densidade final de $1,32 \text{ g.cm}^{-3}$.

Uma balança de pesagem foi utilizada para aferição da massa de solo e uma caixa de madeira foi construída para armazená-lo e transferi-lo ao tanque. A referida caixa apresentava as dimensões adequadas para o armazenamento do solo necessário ao preenchimento de uma camada no tanque, conforme mostra a Figura 16.



Figura 16. Determinação da massa do solo pela balança.

Após a leitura da massa do solo, a caixa foi suspensa por um pórtico com uma talha para promover o preenchimento das camadas do tanque com solo. A Figura 17 apresenta a transferência do solo para o tanque.



Figura 17. Quadro suspenso pelo pórtico (a), preenchimento do tanque (b) e camada de solo dentro do tanque (c).

Para cada camada de solo a ser inserida no tanque, realizava-se o nivelamento por meio de uma régua e o acondicionamento através da passagem de um rolo compactador com massa de 12 kg, com a finalidade de uniformizar e aumentar a densidade do solo, para iniciar o processo de prensagem e obter as impressões dos pneus. A Figura 18 ilustra o nivelamento e acondicionamento do solo.

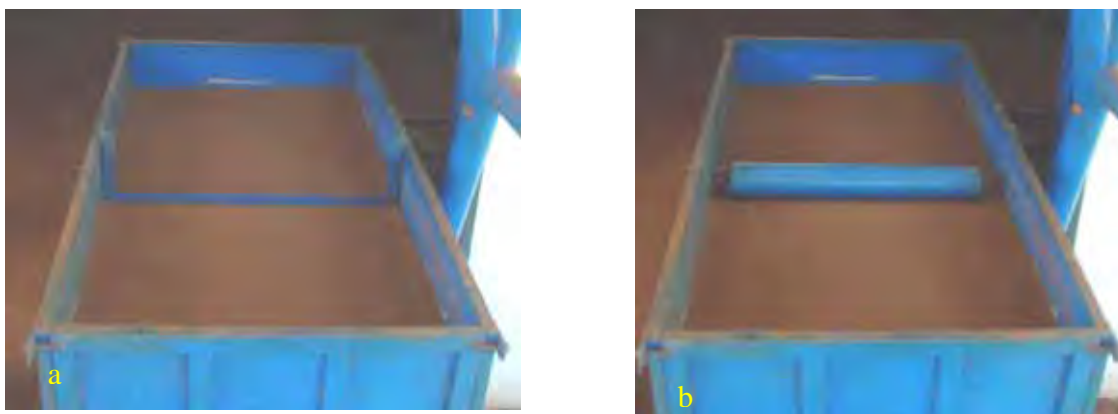


Figura 18. Nivelamento (a) e acondicionamento (b) do solo.

Após a obtenção e avaliação das impressões dos pneus, o solo do tanque foi descarregado e manipulado, para ser inserido novamente dentro do tanque, repetindo-se o processo de carregamento. A Figura 19 apresenta o referido processo.



Figura 19. Solo descarregado do tanque.

5.2.4 Obtenção da impressão dos pneus em superfície rígida

As áreas de contato dos pneus sobre superfície rígida, que corresponde à interação dos rodados sobre pistas de asfalto ou concreto, foram obtidas por diferentes metodologias a serem descritas nos itens subseqüentes.

5.2.4.1 Utilização do pó de gesso

Os pneus foram prensados sobre uma caixa de madeira colocada sobre o carro móvel, seguindo os procedimentos de carga e pressão de inflação dos rodados pneumáticos. Após cada procedimento de prensagem, foi aspergido pó de gesso ao redor do contato pneu/superfície rígida, fazendo com que permanecesse estampado a impressão dos pneus na referida caixa, permitindo assim, seu registro. A figura 20 mostra a prensa hidráulica adaptada à referida metodologia.



Figura 20. Prensa adaptada aos acessórios (a) e execução da metodologia (b).

5.2.4.2 Utilização do papel carbono

A impressão dos rodados sobre a superfície rígida foi obtida seguindo a metodologia descrita por Upadhyaya & Wulfsohn (1990), onde os pneus foram prensados sobre papel carbono, fixado sobre o carro móvel, fazendo com que o mesmo estampasse sobre a folha de seda a área de contato característica de cada parcela do experimento. Sob a folha de seda foram colocadas lâminas de lixa, com a finalidade de alterar a rugosidade da superfície para realçar as áreas de contato. A Figura 21 ilustra a metodologia.



Figura 21. Acessórios adaptados à prensa.

5.2.4.3 Utilização da massa modelável

A massa modelável foi manipulada dentro de caixas de madeira que apresentavam, em seu interior, quadros com dimensões conhecidas, para confecção dos moldes de massa nivelados e padronizados. As caixas de madeira com os moldes de massa foram ajustados sobre o carro móvel, localizado sob a prensa hidráulica, para obter as impressões dos rodados. Antes de iniciar a prensagem do pneu, uma capa plástica foi colocada sobre a massa, com a finalidade de evitar a aderência e permitir a impermeabilização entre os dois meios de contato. A Figura 22 ilustra a massa pronta para caracterização da impressão do pneu.



Figura 22. Massa pronta para estampagem da área de contato do pneu.

5.2.5 Determinação das áreas de contato a partir da impressão

Para cada parcela do experimento foi obtido um perfil característico de deformação do pneu agrícola e das áreas de contato, devido ao processo de prensagem do rodado sobre as superfícies rígida e deformável. Os cálculos das áreas foram realizados por duas metodologias: digitalização das áreas, conforme relatado por Mazetto & Lanças (2000) e através da equação da elipse (HALLONBORG, 1996). A Figura 23 apresenta as áreas de contato obtidas pelas diferentes metodologias.



Figura 23. Áreas de contato obtidas em superfície deformável (a) e rígida (massa – b; papel carbono – c; pó – d).

Após cada prensagem, um quadro de madeira padronizado foi colocado e ajustado sobre as superfícies, para ser fotografado junto com a área de contato do pneu, com a finalidade de corrigir as possíveis distorções focais da câmera fotográfica digital. Foram obtidas fotos de cada área de contato, utilizando-se uma plataforma fixa e elevada na estrutura da respectiva prensa hidráulica, conforme pode ser visualizado na Figura 24.



Figura 24. Plataforma e máquina fotográfica da prensa.

Numa etapa final, as fotos digitais foram transferidas para um microcomputador. As leituras das áreas de contato foram obtidas utilizando o programa computacional AutoCAD 2000, fornecendo valores para serem ajustados na equação de determinação das áreas (Mazetto & Lanças, 2000):

$$A_{rp} = \frac{A_{rq} \cdot A_{pf}}{A_{qf}} \quad (8)$$

em que,

A_{rp} - Área de contato do pneu (cm²)

A_{rq} - Área do quadro de madeira (cm²)

A_{pf} - Área do pneu na foto (cm²)

A_{qf} - Área do quadro na foto (cm²)

A Figura 25 ilustra como foram obtidos os valores das áreas de contato e das dimensões geométricas do quadro.

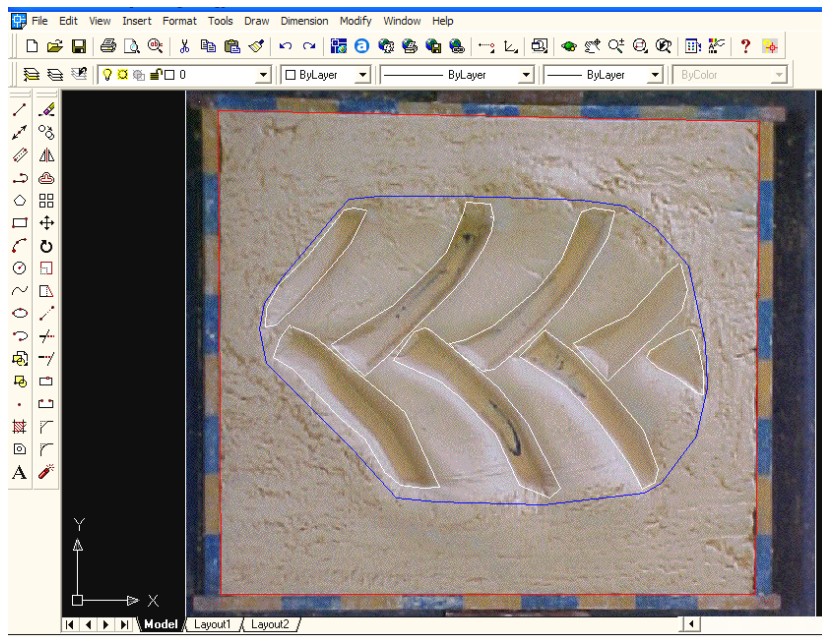


Figura 25. Cálculo das áreas no programa AutoCad 2000.

5.2.6 Determinação das áreas de contato a partir da equação da elipse

Conforme mencionado por Hallonborg (1996), a área de contato entre pneu/solo pode ser obtida por meio da equação da elipse, permitindo assim, correlacionar os métodos de determinação das áreas de contato. A equação da elipse está expressa a seguir:

$$A = L.b.0,78 \quad (9)$$

em que,

L - eixo principal maior da elipse (cm)

b - eixo principal menor da elipse (cm)

Os valores de b e L foram obtidos, por uma trena métrica, nas extremidades do eixo maior e menor da área de contato, como pode ser observado na Figura 26.



Figura 26. Determinação dos valores do eixo menor (a) e maior da elipse (b).

5.2.7 Deformações elásticas dos pneus agrícolas em superfície rígida

Para a determinação das deformações elásticas dos pneus foi acoplada uma escala graduada na estrutura da prensa hidráulica, conforme mostra a Figura 27.



Figura 27. Escala graduada acoplada na prensa (a) e leitura da deformação do pneu (b).

Devido à condição de superfície rígida e deformável que os pneus foram prensados, obtiveram-se perfis característicos de deformações dos pneus, segundo os procedimentos de carregamentos adotados, com as respectivas combinações de pressões de inflação, conforme a Figura 28.



Figura 28. Detalhe da deformação elástica sofrida pelo pneu agrícola.

As deformações elásticas dos pneus foram obtidas realizando-se a leitura das deformações iniciais de cada pneu, que corresponde ao seu próprio peso, e as

deformações devido às cargas aplicadas ao seu eixo, esta última, obtida pela diferença da primeira.

5.2.8 Deformação elástica dos pneus em superfície deformável

Para obter as deformações elásticas dos pneus agrícolas, em superfície deformável, foi necessário determinar o recalque dos rodados no solo (profundidade de penetração), com o auxílio de um perfilômetro, já que a escala graduada, anexada a prensa hidráulica, fornece o valor referente à soma da deformação e do recalque do pneu, ao receber a aplicação de cargas concentradas.

$$De = L_D - R_S \quad (10)$$

sendo:

De: deformação do pneu (m);

L_D : deformação e recalque do pneu (m);

R_S : recalque (m).

O recalque do pneu, condizente com a profundidade máxima de penetração do rodado, foi obtido pelo desnível da haste central do perfilômetro na área de contato, conforme mostra a Figura 29.

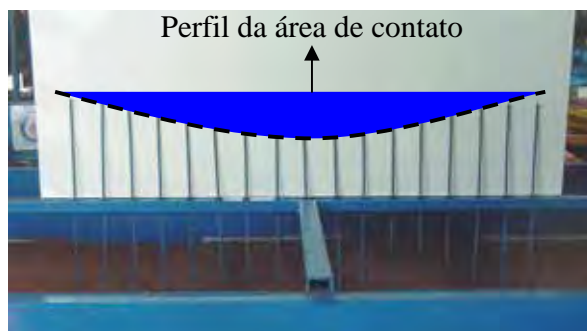


Figura 29. Perfil da área de contato obtido por perfilometria.

5.2.9 Pressões de inflação dos pneus agrícolas

Os pneus agrícolas foram inflados com as pressões de inflação alta, intermediária e baixa para cada tipo de pneu, conforme recomendação dos fabricantes para a maior carga aplicada aos mesmos. As pressões de inflação para cada tipo de pneu estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5. Pressões de inflação alta, intermediária, baixa e recomendada para cada tipo de pneu, segundo Trelleborg (2002) e Goodyear (1994).

Pneus	Pressões de Inflação kPa (psi)			
	Recomendada	Alta	Intermediária	Baixa
BPAF	103,3 kPa (15 psi)	206,7 kPa (30 psi)	103,3 kPa (15 psi)	68,9 kPa (10 psi)
Radial	186,1 kPa (27 psi)	186,1 kPa (27 psi)	137,8 kPa (20 psi)	68,9 kPa (10 psi)
Diagonal	206,7 kPa (30 psi)	206,7 kPa (30 psi)	137,8 kPa (20 psi)	68,9 kPa (10 psi)

5.2.10 Cargas concentradas

As cargas radiais atribuídas aos pneus agrícolas, pela prensa hidráulica, foram de 5, 10, 15 e 20 kN, de forma crescente e gradativa, correspondendo às cargas mínima e máxima que comumente são aplicadas sobre os pneus dianteiros dos tratores.

5.2.11 Análise estatística

Com o objetivo de calibrar os sensores da prensa hidráulica e da balança de pesagem, os dados foram ajustados por regressão com auxílio de planilha eletrônica Excel e programa estatístico Sas, buscando um modelo de equação que melhor os representasse.

No experimento, as variáveis áreas de contato e deformação elástica dos pneus, em superfícies rígidas (pó, papel carbono e massa modelável), foram analisadas considerando-se o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial, tendo como fatores 3 modelos de pneus (BPAF, diagonal e radial), inflados com 3 pressões de inflação

(máxima, intermediária e mínima) e submetidos a 4 cargas (5; 10; 15; 20 kN) com 4 repetições.

As áreas de contato, deformações elásticas e recalque no solo dos rodados, em superfície deformável, foram analisados considerando o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial, tendo como fatores 3 modelos de pneus (BPAF, diagonal e radial), inflados com as pressões ideais para cada tipo de pneu e submetidos a 4 cargas (5; 10; 15; 20 kN) com 4 repetições.

Os resultados do experimento foram tabulados e interpretados estatisticamente, por meio de análise de variância e ao teste de comparação de médias de Tukey a 5% de probabilidade, conforme citação de Banzatto & Kronka (1995).

As áreas de contato dos rodados pneumáticos (equação da elipse e digitalização das áreas) foram comparadas por meio de correlação e regressão, com auxílio da planilha eletrônica Excel e programa estatístico Sas.

As áreas de contato e as deformações elásticas dos pneus em diferentes superfícies rígidas (pó; papel carbono e massa) foram analisadas por meio de correlação e estudado um modelo de ajuste de regressão que melhor explicasse o comportamento das variáveis.

As variáveis área de contato e deformação elástica dos pneus em superfície rígida (massa) e deformável (solo) foram comparadas por correlação e análise de regressão por meio do programa estatístico Sas, para caracterização das curvas e equações que melhor explicasse o comportamento das variáveis.

Para a análise comparativa das áreas em cada tratamento foi padronizada a metodologia de cálculo das mesmas, nomeando o método da digitalização das áreas para representar o valor da variável.

Para a análise comparativa das áreas e deformações elásticas dos pneus em diferentes superfícies foi nomeada a massa para representar a superfície rígida e o solo como superfície deformável.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo estão apresentados e discutidos os resultados de calibração dos sensores e das variáveis comparativas.

6.1 Calibração dos sensores

Os valores de carga atribuídos à balança de pesagem e aferidos pela célula de carga, bem como a curva de calibração e os coeficientes de determinação estão apresentados na Figura 30.

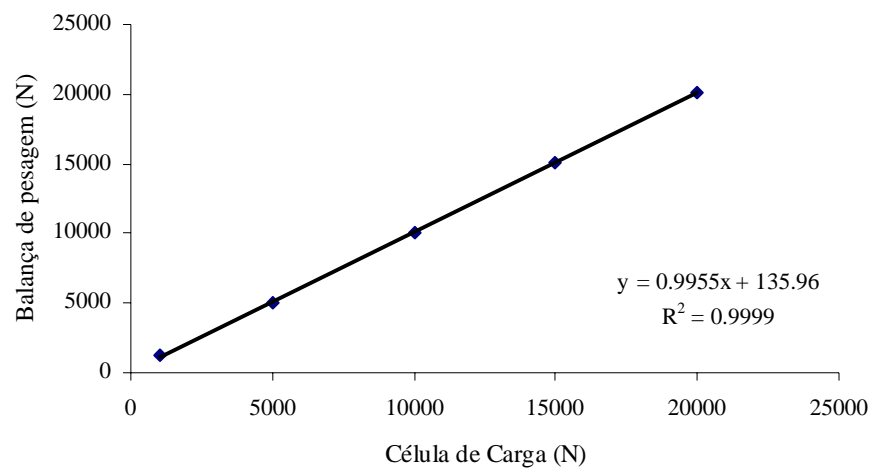


Figura 30. Curva de calibração da balança de pesagem.

Os valores de carga atribuídos ao manômetro da prensa hidráulica e aferidos pela célula de carga, bem como a curva de calibração e os coeficientes de determinação estão apresentados na Figura 31.

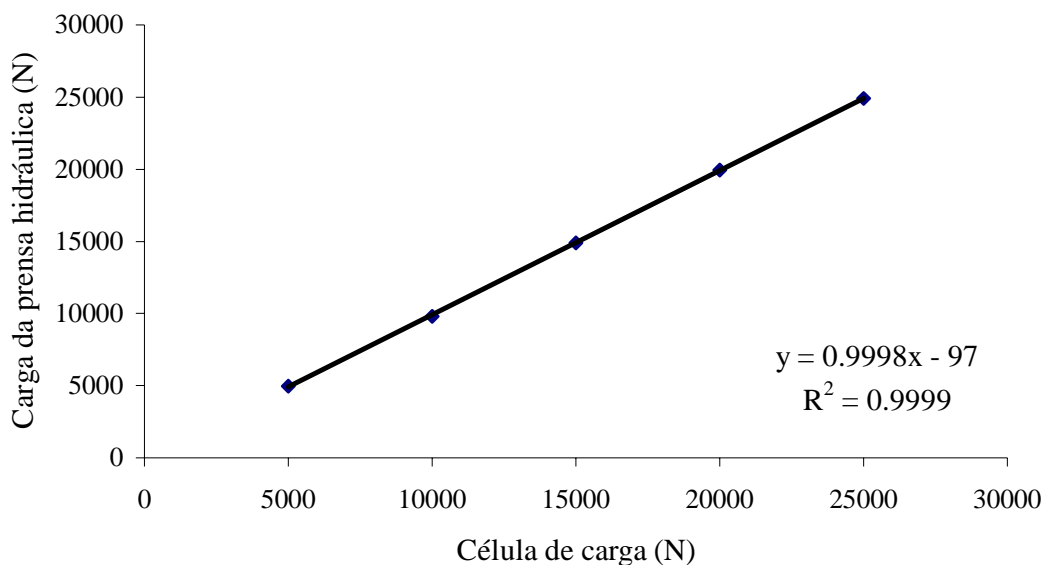


Figura 31. Curva de calibração do manômetro da prensa hidráulica.

As curvas de calibração da balança de pesagem e do manômetro da prensa hidráulica mostraram correlação positiva, sendo que os coeficientes de determinação foram próximos de 1 o que garantiu grande precisão da referida calibração.

6.2 Análise de correlação entre as metodologias de cálculo das áreas de contato

Na análise de correlação entre as duas metodologias de cálculo das áreas de contato, equação da elipse e digitalização das áreas, obteve-se um coeficiente de 0,97853 entre as metodologias empregadas, para um nível de probabilidade inferior a 1% de significância e correspondendo a 480 observações, evidenciando que o método da equação da elipse permite estimar com precisão as áreas de contato dos pneus. Esse comportamento confere com Santos (1999) que estudou as referidas metodologias de cálculo das áreas e não

obteve diferença estatística significativa entre as mesmas. Mazetto & Lanças (2000) obtiveram coeficiente de correlação entre as metodologias de cálculo das áreas de 0,979 em superfície rígida e Mazetto et al. (2001) obtiveram um coeficiente de 0,852 em superfície deformável.

A análise de regressão das metodologias de cálculo das áreas de contato, equação da elipse e digitalização das áreas, permitiu a obtenção de um modelo de equação que melhor explicasse o comportamento da variável em função das metodologias de obtenção da mesma. A Figura 32 ilustra a curva de regressão e a equação de melhor ajuste para a variável área obtida pelas duas metodologias de cálculo, a 1% de significância.

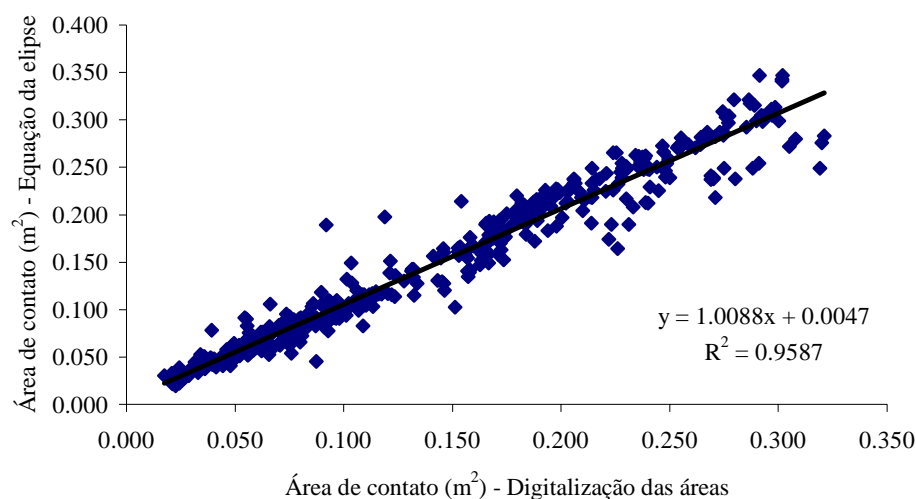


Figura 32. Modelo de regressão das metodologias de cálculo das áreas de contato.

6.3 Área de contato em superfície rígida

A Tabela 6 apresenta os coeficientes de correlação para a variável área de contato obtida pelo método do pó, carbono e massa, bem como o nível de significância de cada coeficiente, correspondente a 144 observações.

Tabela 6. Síntese das análises de correlação para a variável área de contato obtida por diferentes métodos.

Métodos	Coefficiente de Correlação - R	Teste T para R
Massa e pó	0,925	P < 0,01
Massa e carbono	0,863	P < 0,01
Carbono e pó	0,929	P < 0,01

P < 0,01: probabilidade inferior a 1% de significância

As Figuras 33, 34 e 35 representam os modelos de regressão e as equações de melhor ajuste para a variável área obtida pelo método do pó, carbono e massa, a 1% de significância.

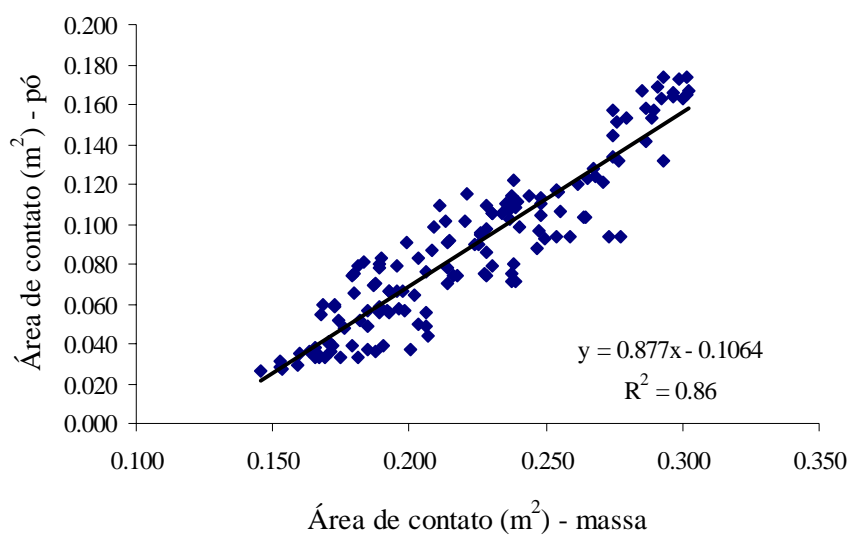


Figura 33. Modelo de regressão da área de contato obtida pelo método da massa e do pó.

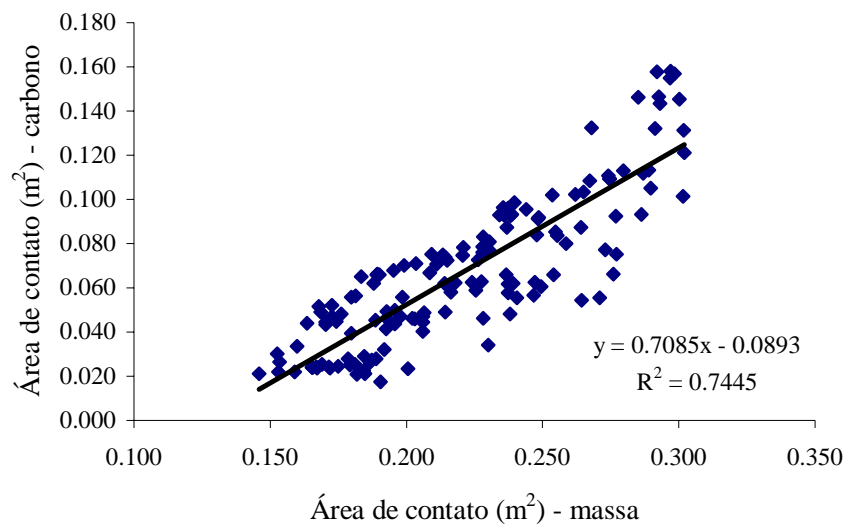


Figura 34. Modelo de regressão da área de contato obtida pelo método da massa e do carbono.

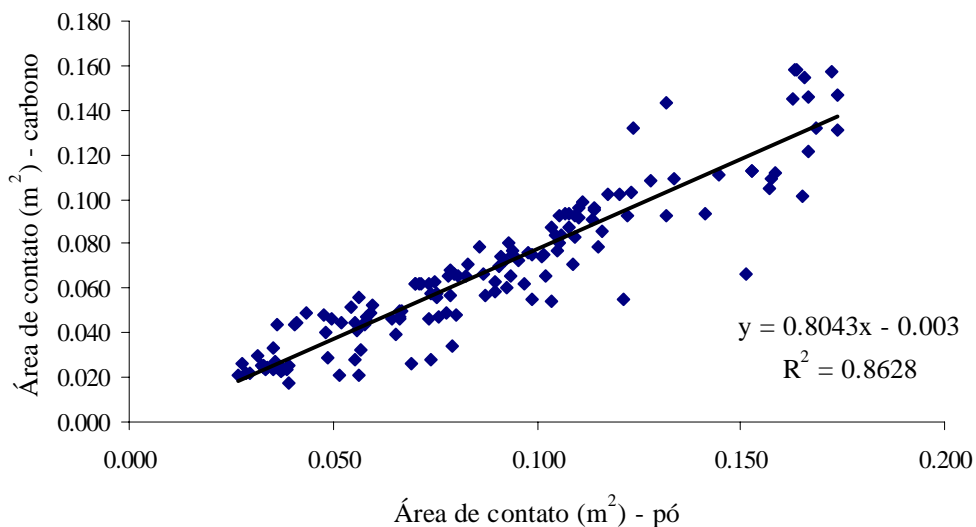


Figura 35. Modelo de regressão da área de contato obtida pelo método do carbono e do pó.

Diante dos coeficientes de correlação e os modelos de regressão, os métodos do pó, carbono e massa podem representar as áreas de contato dos pneus agrícolas, sendo que a massa proporciona maiores valores de área, pois permite a impressão de toda banda de rodagem dos pneus, ao contrário dos outros métodos que restringe a impressão apenas das garras.

6.4 Deformação elástica em superfície rígida

A Tabela 7 apresenta os coeficientes de correlação para a variável deformação elástica obtida pelo método do pó, carbono e massa, bem como o nível de significância de cada coeficiente, correspondente a 144 observações.

Tabela 7. Síntese das análises de correlação para a variável deformação elástica obtida por diferentes métodos.

Métodos	Coefficiente de Correlação R	Teste T para R
Massa e pó	0,994	P < 0,01
Massa e carbono	0,994	P < 0,01
Carbono e pó	0,991	P < 0,01

P < 0,01: probabilidade inferior a 1% de significância

As Figuras 36, 37 e 38 representam os modelos de regressão e as equações de melhor ajuste para a variável deformação elástica obtida pelo método do pó, carbono e massa, a 1% de significância.

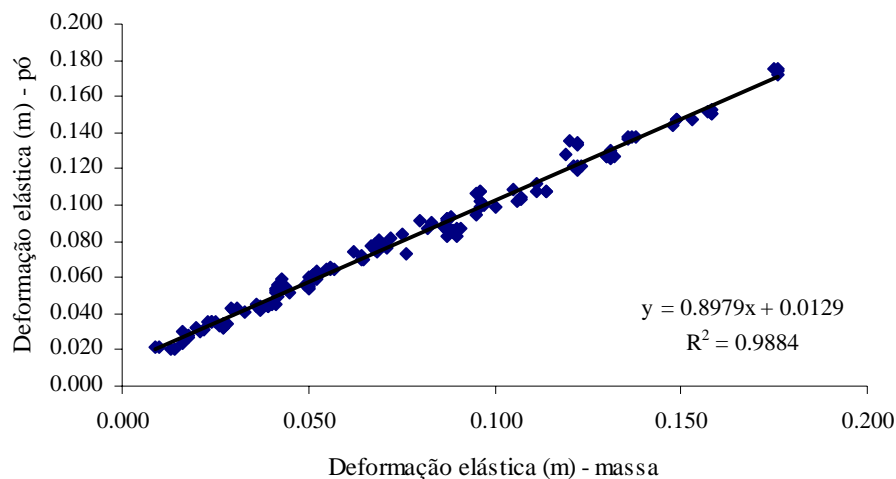


Figura 36. Modelo de regressão da deformação elástica obtida pelo método da massa e do pó.

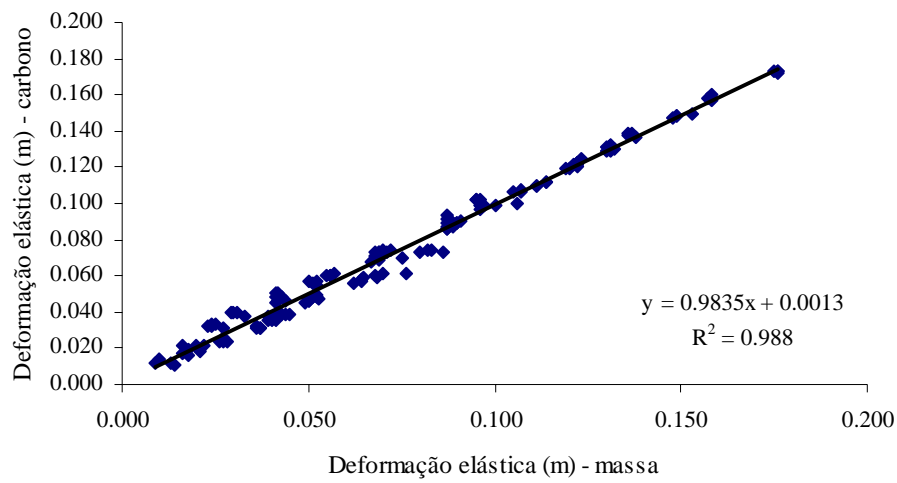


Figura 37. Modelo de regressão da deformação elástica obtida pelo método da massa e do carbono.

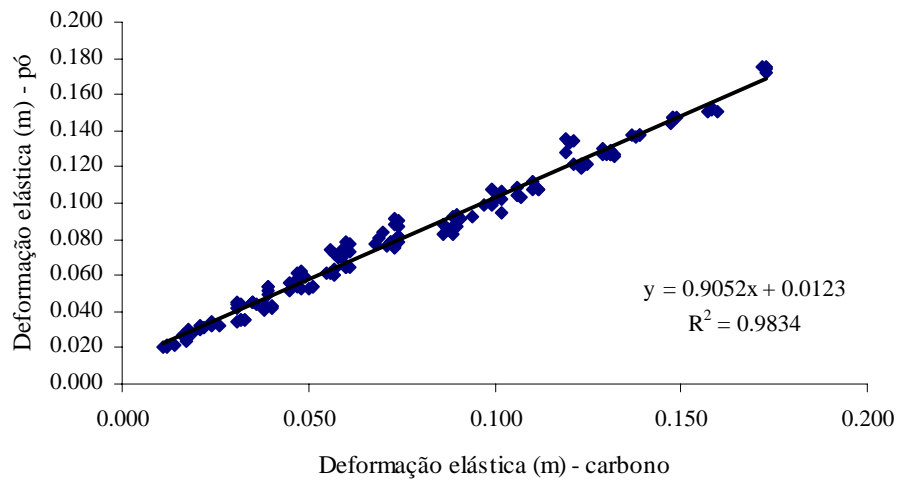


Figura 38. Modelo de regressão da deformação elástica obtida pelo método do carbono e do pó.

Diante dos coeficientes de correlação e os modelos de regressão, os métodos do pó, carbono e massa podem representar com precisão as deformações elásticas dos pneus agrícolas.

6.5 Área de contato em superfície rígida e deformável

Na análise de correlação da variável área de contato determinada em diferentes superfícies, rígida e deformável, obteve-se um coeficiente de 0,915 entre as metodologias empregadas, para um nível de probabilidade inferior a 1% de significância e correspondendo a 48 observações.

A Figura 39 representa o modelo de regressão e a equação de melhor ajuste para a variável área obtida em superfície rígida e deformável, a 1% de significância. Os valores de área de contato obtidos em superfície rígida foram maiores em relação a deformável, diferindo do estudo realizado por Godbole et al. (1993) que obtiveram menores áreas em superfície rígida, isso porque os autores levaram em consideração apenas o recalque, desprezando as deformações elásticas dos pneus.

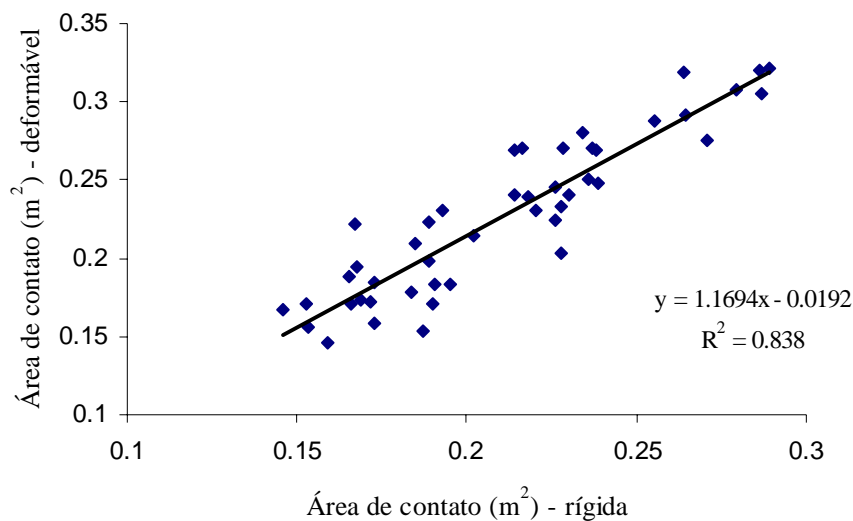


Figura 39. Modelo de regressão da área de contato obtida em superfícies rígida e deformável.

6.6 Deformação elástica em superfície rígida e deformável

Na análise de correlação da variável deformação elástica determinada em diferentes superfícies, rígida e deformável, obteve-se um coeficiente de 0,281 entre as metodologias empregadas, para um nível de probabilidade de 5,29% de significância e

correspondendo a 48 observações. O baixo índice de correlação entre as deformações elásticas obtidas em diferentes superfícies confere com o estudo realizado por Hallonborg (1996) que evidencia a complexidade em analisar a interação do pneu em superfície deformável, já que existe a influência de inúmeros fatores, tal como o recalque.

A Figura 40 representa a dispersão dos valores da variável deformação elástica obtidos em superfície rígida e deformável, impossibilitando o ajuste de um modelo de regressão que explicasse o comportamento da variável para todos os pneus estudados. As deformações elásticas apresentam duas tendências, sendo a primeira formada pelo conjunto de dados representando os pneus BPAF e diagonal, enquanto a segunda o pneu radial que apresenta maior valor de deformação devido aos fatores intrínsecos a construção da carcaça do mesmo. Diante disso, a avaliação da deformação elástica dos pneus radiais em diferentes superfícies deve ser realizada separadamente dos pneus diagonais e BPAF.

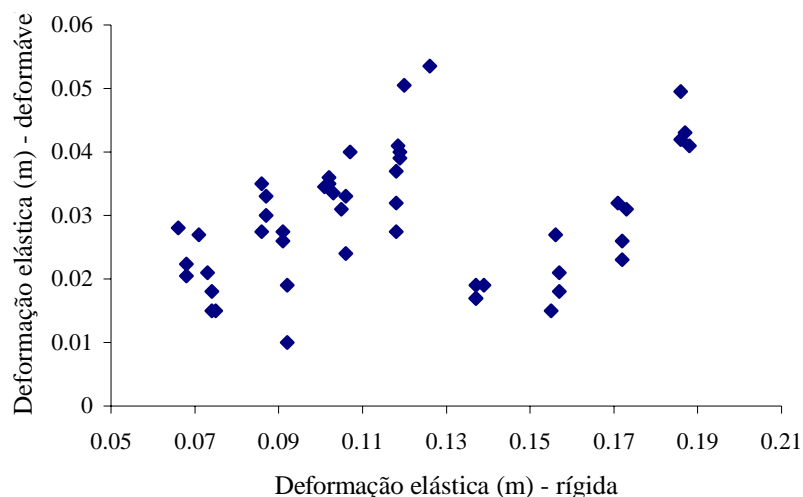


Figura 40. Dispersão dos dados de deformação elástica, obtidos em superfícies rígida e deformável.

6.7 Síntese dos resultados da análise estatística das variáveis comparativas em superfície rígida

A síntese da análise estatística é apresentada para grupos de variáveis na Tabela 8. Nessa tabela, os dados referentes aos fatores pneu, carga e pressão de inflação

representam médias de 48, 36 e 48 observações, respectivamente. Nas colunas a ausência de letras implica que ocorreu interação significativa entre os fatores, tendo assim, outro quadro de desdobramento.

Tabela 8. Síntese da análise de variância e o teste de médias para a variável área de contato e deformação elástica dos pneus agrícolas.

Fatores	Área de Contato (m ²)	Deformação elástica (m)
PNEU (P)		
BPAF	0,238	0,043
Radial	0,222	0,125
Diagonal	0,204	0,063
PRESSÃO DE INFLAÇÃO (I)		
Baixa	0,241	0,092
Intermediária	0,219	0,075
Alta	0,205	0,064
CARGA (C)		
5 kN	0,175	0,047
10 kN	0,206	0,069
15 kN	0,239	0,088
20 kN	0,267	0,105
TESTE F		
P	394,04*	33182,7*
I	165,87*	3547,59*
C	1582,48*	8447,33*
PxI	14,21*	116,12*
PxC	10,06*	35,42*
IxC	25,75*	182,8*
PxIxC	2,41*	5,67*
C.V. %	2,73	2,10

*: significativo (P<0,01)

C.V.: coeficiente de variação

6.7.1 Interação entre os fatores pressão de inflação e pneu para a variável área de contato

Pela Tabela 8 nota-se que o fator pneu influenciou significativamente o fator pressão de inflação para a variável área de contato. A Tabela 9 apresenta os dados dessa interação e cada valor representa uma média de 16 observações.

Tabela 9. Interação entre os fatores pressão de inflação e pneu para a variável área de contato (m²).

Pneu	Pressão de inflação		
	Alta	Intermediária	Baixa
BPAF	0,224 A c	0,241 A b	0,251 A a
Radial	0,205 B c	0,217 B b	0,245 B a
Diagonal	0,185 C c	0,199 C b	0,228 C a

- Em cada coluna, para cada fator, as médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
- Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

6.7.1.1 Análise do fator pneu dentro de cada fator pressão de inflação

Analisando-se a Tabela 9, notou-se que a variável área de contato apresentou diferença estatística significativa para cada pneu nas três pressões de inflação, sendo que o pneu BPAF apresentou maior área em relação ao radial e, este, maior que o diagonal. Esses resultados conferem com Mazetto & Lanças (2000) que também evidenciaram maiores valores da variável para o pneu BPAF.

6.7.1.2 Análise do fator pressão de inflação dentro de cada fator pneu

Pela Tabela 9 observa-se que para os fatores pressão de inflação houve diferença estatística significativa em todos os pneus ensaiados, sendo que à medida que se diminui a pressão de inflação obtêm-se maiores áreas de contato para todos os pneus estudados. Esse comportamento esta de acordo com Abeels (1976), onde o autor define que os valores de área de contato são proporcionais à carga incidente sobre os rodados e inversamente proporcional à pressão de inflação dos pneus.

6.7.2 Interação entre os fatores pneu e carga para a variável área de contato

Pela Tabela 8 nota-se que o fator pneu influenciou significativamente o fator carga para a variável área de contato. A Tabela 10 apresenta os dados dessa interação e cada valor representa uma média de 12 observações.

Tabela 10. Interação entre os fatores pneu e carga (kN) para a variável área de contato (m²).

Pneu	Cargas (kN)			
	5	10	15	20
BPAF	0,187 a	0,223 a	0,261 a	0,284 a
Radial	0,175 b	0,207 b	0,243 b	0,264 b
Diagonal	0,162 c	0,188 c	0,213 c	0,253 c

- Em cada coluna, para cada fator, as médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

6.7.2.1 Análise do fator pneu dentro de cada fator carga

Pela Tabela 10 observa-se que a variável área apresentou diferença significativa para todos os pneus ensaiados quando submetidos a aplicação de todas as cargas, sendo que o valor da variável foi maior para o pneu BPAF, sofrendo um decréscimo para o radial e menor para o diagonal.

6.7.2.2 Análise do fator carga dentro de cada fator pneu

Como houve interação significativa entre os fatores pneu e carga, procurou-se ajustar um modelo de regressão que melhor explicasse o comportamento da variável área em função das cargas para cada pneu ensaiado. O comportamento das áreas em função das cargas está de acordo com Santos (1999) e Mazetto & Lanças (2000) que obtiveram proporcionalidade da variável em função dos níveis crescentes de cargas. A Figura 41 ilustra os modelos de regressões e suas equações, a 1% de significância, para os pneus BPAF, diagonal e radial.

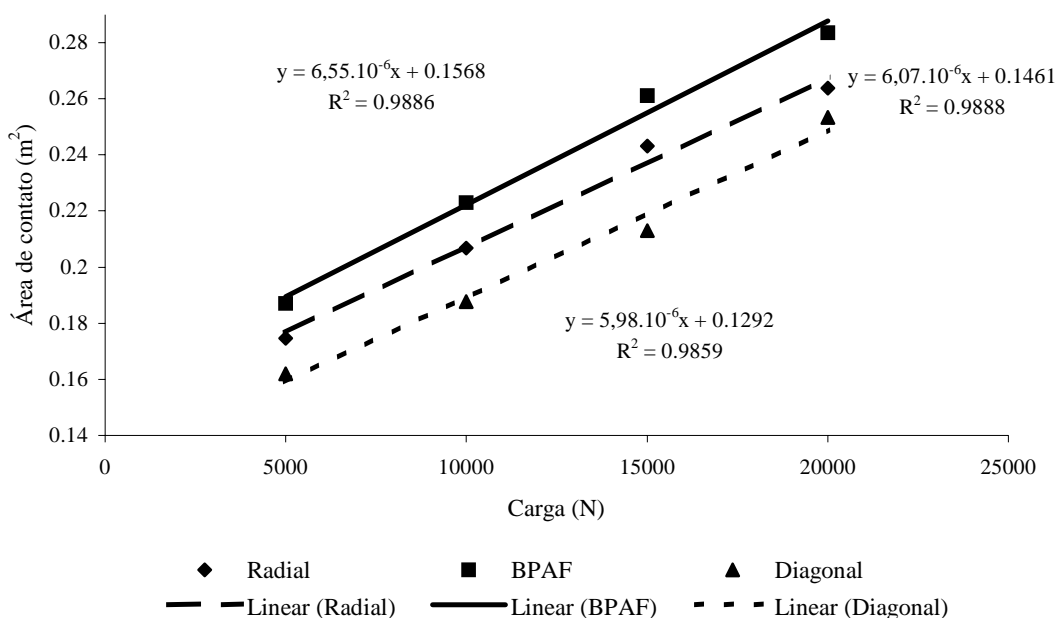


Figura 41. Modelos de regressão das áreas em função das cargas para o pneu BPAF, diagonal e radial.

Observando os coeficientes angulares dos modelos de regressão da Figura 41, o pneu BPAF foi mais susceptível ao aumento de carga em termos de área de contato, seguido pelo radial e, por fim, o diagonal.

6.7.3 Interação entre os fatores pressão de inflação e carga para a variável área de contato

Pela Tabela 8 nota-se que o fator pressão de inflação influenciou significativamente o fator carga para a variável área de contato. A Tabela 11 apresenta os dados dessa interação e cada valor representa uma média de 12 observações.

Tabela 11. Interação entre os fatores pressão de inflação e carga (kN) para a variável área de contato (m²).

Pressão	Cargas (kN)			
	5	10	15	20
	Área de Contato (m ²)			
Alta	0,169 b	0,191 c	0,216 c	0,243 c
Intermediária	0,173 b	0,203 b	0,238 b	0,262 b
Baixa	0,183 a	0,224 a	0,263 a	0,296 a

- Em cada coluna, para cada fator, as médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

6.7.3.1 Análise do fator pressão dentro de cada fator carga

Pela Tabela 11 percebe-se que a variável área apresentou diferença significativa para todas as pressões em cargas maiores que 10 kN, enquanto que para a carga de 5 kN as pressões intermediárias e altas não diferiram estatisticamente para a referida variável. Para os valores de área que foram estatisticamente diferentes para a mesma carga em função das pressões, observou-se que à medida que se diminui a pressão obtêm-se maiores valores de área. Os resultados desse trabalho confirmam com a pesquisa desenvolvida por

Hallonborg (1996) que obteve menores valores da área de contato para as altas pressões de inflação, já que as mesmas proporcionam geometria circular das áreas, enquanto que as baixas pressões descrevem geometria elíptica.

6.7.3.2 Análise do fator carga dentro de cada fator pressão

Como houve interação significativa entre os fatores pressão e carga, como pode ser observado na Tabela 8, procurou-se ajustar um modelo de regressão que melhor explicasse o comportamento da variável área em função das cargas para cada pressão estudada. Os modelos de regressão equivalem aos encontrados por Mazetto & Lanças (2000), porém os autores estudaram maiores quantidades de cargas. A Figura 42 ilustra os modelos de regressões e suas equações, a 1% de significância, para as pressões de inflação alta, intermediária e baixa.

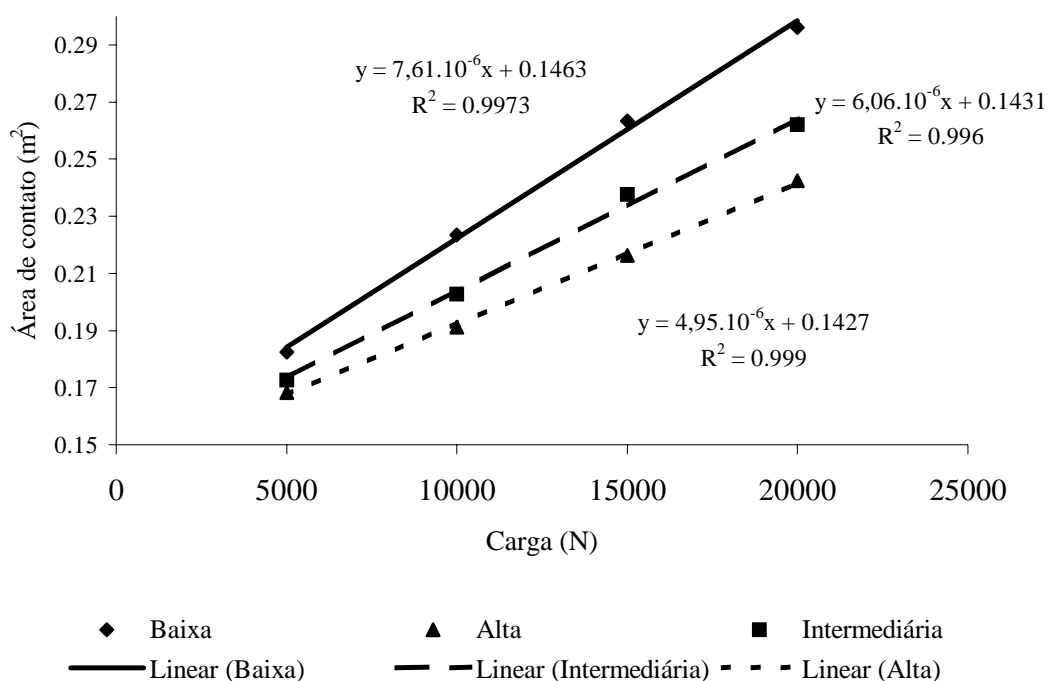


Figura 42. Modelos de regressão linear das áreas em função das cargas para a pressão de inflação alta, intermediária e baixa.

Observando os coeficientes angulares dos modelos de regressão da Figura 42, as baixas pressões de inflação foram mais susceptíveis ao aumento de carga em termos de área de contato, seguido pela intermediária e, por fim, a alta.

6.7.4 Interação entre os fatores pneu, pressão de inflação e carga para a variável área de contato

De acordo com os dados da Tabela 8, percebe-se que houve interação tripla entre os fatores pneu, pressão e carga para a variável área de contato, porém neste trabalho estudou-se o desdobramento apenas da interação dupla, pois o autor Pimentel Gomes (1987) não recomenda o desdobramento da interação tripla.

6.7.5 Interação entre os fatores pressão de inflação e pneu para a variável deformação elástica

Pela Tabela 8 nota-se que o fator pneu influenciou significativamente o fator pressão de inflação para a variável deformação elástica. A Tabela 12 apresenta os dados dessa interação e cada valor representa uma média de 16 observações.

Tabela 12. Interação entre os fatores pressão de inflação e pneu para a variável deformação elástica (m).

Pneu	Pressão de inflação		
	Alta	Intermediária	Baixa
	Deformação Elástica(m)		
BPAF	0,032 C c	0,044 C b	0,053 C a
Radial	0,113 A c	0,121 A b	0,140 A a
Diagonal	0,048 B c	0,060 B b	0,082 B a

- Em cada coluna, para cada fator, as médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
- Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

6.7.5.1 Análise do fator pneu dentro de cada fator pressão de inflação

Analisando-se a Tabela 12, notou-se que para o fator pneu a variável deformação elástica foi estatisticamente diferente em todos os pneus ensaiados, sendo que o valor da variável foi maior para o pneu radial, sofrendo um decréscimo para o diagonal e menor para o BPAF. Esse comportamento confere com Upadhyaya & Wulfsohn (1990b) que observaram maiores deformações dos pneus radiais, em comparação aos pneus diagonais, principalmente em pressões baixas.

6.7.5.2 Análise do fator pressão de inflação dentro de cada fator pneu

Pela Tabela 12 observa-se que para o fator pressão de inflação houve diferença estatística para a variável deformação elástica em todos os pneus ensaiados, havendo uma elevação dos valores da variável conforme decresciam as pressões de inflação dos pneus. Esse comportamento confere com Inoue et al. (1996) que observaram maiores deformações dos pneus em pressões de inflação baixas, porém os autores estudaram apenas pneus diagonais.

6.7.6 Interação entre os fatores pneu e carga para a variável deformação elástica

Pela Tabela 12 nota-se que o fator pneu influenciou significativamente o fator carga para a variável deformação elástica. A Tabela 13 apresenta os dados dessa interação e cada valor representa uma média de 12 observações.

Tabela 13. Interação entre os fatores pneu e carga (kN) para a variável deformação elástica (m).

Pneu	Cargas (kN)			
	5	10	15	20
	Deformação Elástica (m)			
BPAF	0,017 c	0,036 c	0,052 c	0,068 c
Radial	0,092 a	0,117 a	0,137 a	0,154 a
Diagonal	0,032 b	0,055 b	0,074 b	0,092 b

- Em cada coluna, para cada fator, as médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

6.7.6.1 Análise do fator pneu dentro de cada fator carga

Pela Tabela 13 observa-se que a variável deformação elástica apresentou diferença estatística significativa para todos os pneus ensaiados quando submetidos à aplicação de todas as cargas. O pneu radial apresentou maiores valores de deformação elástica, seguido pelo pneu diagonal e, por fim, o BPAF.

6.7.6.2 Análise do fator carga dentro de cada fator pneu

Como houve interação significativa entre os fatores pneu e carga, como pode ser observado na Tabela 8, procurou-se ajustar um modelo de regressão que melhor explicasse o comportamento das deformações elásticas para cada pneu ensaiado. Os resultados conferem com Mazetto & Lanças (2000), Santos (1999) e Upadhyaya & Wulfsohn (1990b) que evidenciaram maiores deformações elásticas dos pneus para maiores níveis de cargas, porém os últimos autores estudaram apenas o comportamento dos pneus radiais. A Figura 43 ilustra os modelos de regressões e suas equações, a 1% de significância, para os pneus BPAF, diagonal e radial.

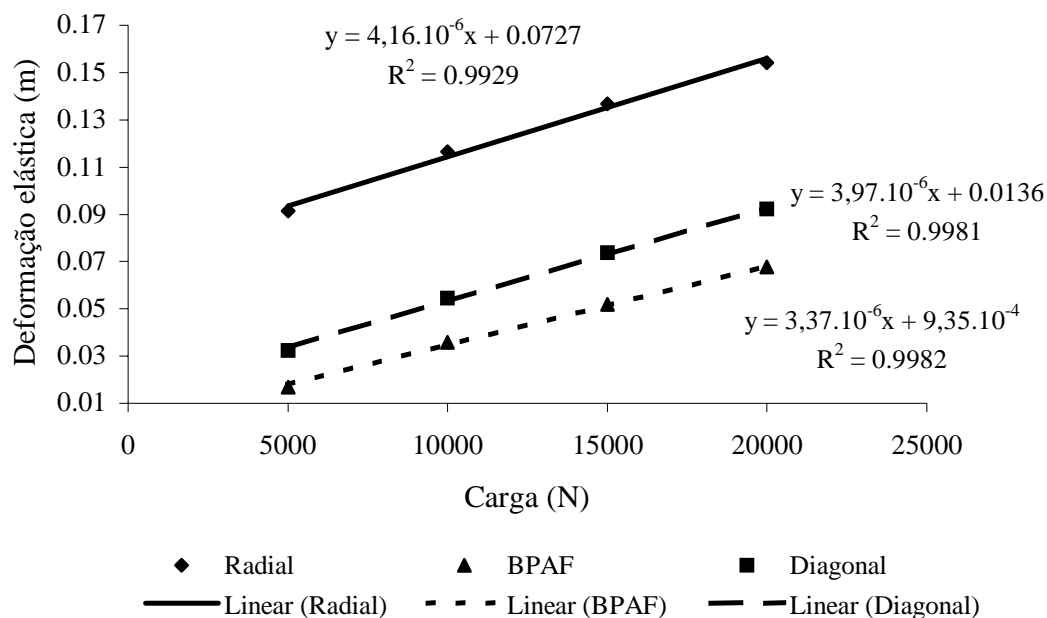


Figura 43. Modelos de regressão das deformações elásticas em função das cargas para o pneu BPAF, diagonal e radial.

Observando os coeficientes angulares dos modelos de regressão da Figura 43, o pneu radial foi mais susceptível ao aumento de carga em termos de deformação elástica, seguido pelo diagonal e, por fim, o BPAF.

6.7.7 Interação entre os fatores pressão de inflação e carga para a variável deformação elástica

Pela Tabela 8 nota-se que o fator pressão de inflação influenciou significativamente o fator carga para a variável deformação elástica. O Quadro 12 apresenta os dados dessa interação e cada valor representa uma média de 12 observações.

Tabela 14. Interação entre os fatores pressão de inflação e carga (kN) para a variável deformação elástica (m).

Pressão	Cargas (kN)			
	5	10	15	20
	Deformação elástica (m)			
Alta	0,041 c	0,058 c	0,073 c	0,085 c
Intermediária	0,046 b	0,067 b	0,084 b	0,103 b
Baixa	0,054 a	0,082 a	0,106 a	0,126 a

- Em cada coluna, para cada fator, as médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

6.7.7.1 Análise do fator pressão de inflação dentro de cada fator carga

Pela Tabela 14 percebe-se que a variável deformação elástica apresentou diferença estatística significativa para todas as pressões de inflação dos pneus quando submetidos à aplicação de todas as cargas. Os valores de deformação elástica foram maiores à medida que se diminuía a pressão de inflação dos pneus. Esse comportamento confere com Dias et al. (1995), Mazetto & Lanças (2000) e Castro Neto (2001).

6.7.7.2 Análise do fator carga dentro de cada fator pressão de inflação

Como houve interação significativa entre os fatores pressão e carga, como pode ser observado na Tabela 8, procurou-se ajustar um modelo de regressão que melhor explicasse o comportamento das cargas para cada pressão estudada. A Figura 44 ilustra os modelos de regressões e suas equações, a 1% de significância, para as pressões de inflação alta, intermediária e baixa.

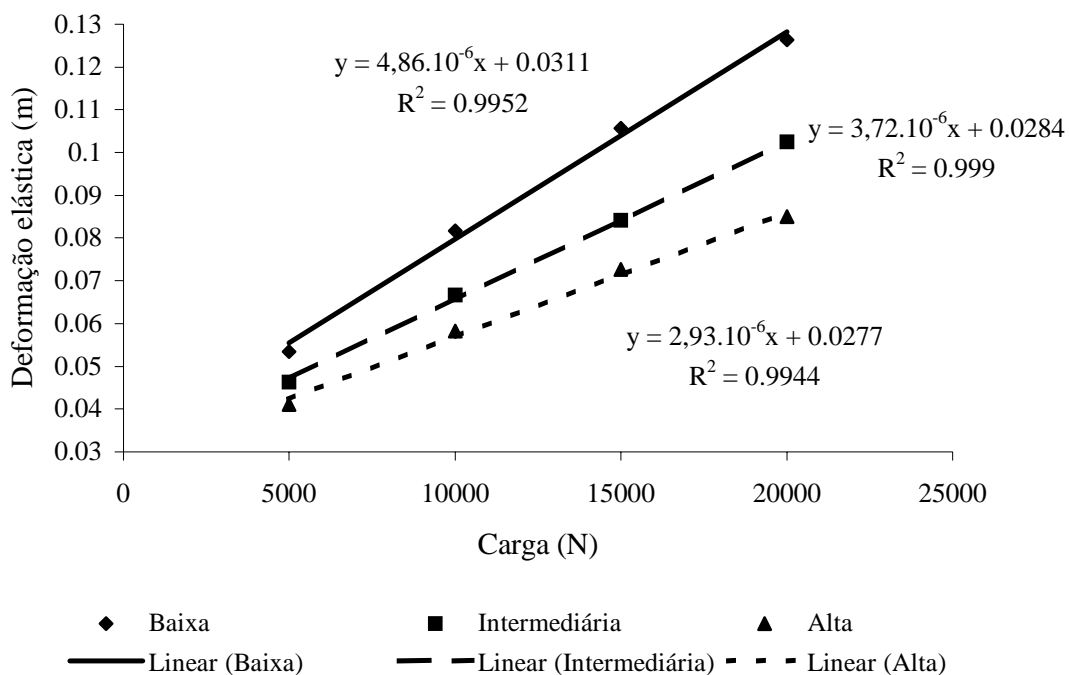


Figura 44. Modelos de regressão das deformações elásticas em função das cargas para a pressão de inflação alta, intermediária e baixa.

Observando os coeficientes angulares dos modelos de regressão da Figura 44, as baixas pressões de inflação foram mais susceptíveis ao aumento de carga em termos de deformação elástica, seguido pela intermediária e, por fim, a alta.

6.7.8 Interação entre os fatores pneu, pressão de inflação e carga para a variável deformação elástica

De acordo com os dados da Tabela 8, percebe-se que houve interação tripla entre os fatores pneu, pressão e carga para a variável deformação elástica, porém neste trabalho estudou-se o desdobramento apenas da interação dupla, pois o autor Pimentel Gomes não recomenda o desdobramento da interação tripla.

6.8 Síntese dos resultados da análise estatística das variáveis comparativas para superfície deformável

A síntese da análise estatística é apresentada para grupos de variáveis na Tabela 15. Nessa tabela, os dados referentes aos fatores pneu e carga representam médias de 16 e 12 observações, respectivamente. Na coluna com ausência de letras implica que ocorreu interação significativa entre os fatores, tendo assim, outro quadro de desdobramento. As pressões de inflação utilizadas nos pneus foram às recomendadas pelos fabricantes, sendo assim, não foi considerada como fator na análise estatística.

Tabela 15. Síntese da análise de variância e o teste de médias para as variáveis área de contato, deformação elástica e perfil do recalque do pneu no solo.

Fatores	Área de Contato (m ²)	Deformação elástica do pneu (m)	Recalque (m)
PNEU (P)			
BPAF	0,257	0,034 a	0,0515 b
Radial	0,223	0,0275 b	0,0624 a
Diagonal	0,186	0,0261 b	0,0607 a
CARGA (C)			
5 kN	0,1693	0,0199 c	0,0443 d
10 kN	0,2121	0,0241 c	0,0557 c
15 kN	0,2405	0,0316 b	0,0630 b
20 kN	0,267	0,0413 a	0,0698 a
TESTE F			
P	30,89 *	11,50 *	32,31 *
C	32,20 *	42,97 *	84,99 *
PxC	4,64 *	1,65 NS	1,65 NS
C.V. %	11,48	17	7,067

Em cada coluna, para cada fator, as médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

NS: não significativo (P > 0,05)

*: significativo (P < 0,01)

C.V.: coeficiente de variação

6.8.1 Interação entre os fatores pneu e carga para a variável área de contato

Pela Tabela 15 nota-se que o fator pneu influenciou significativamente o fator carga para a variável área de contato. A Tabela 16 apresenta os dados dessa interação e cada valor representa uma média de 4 observações.

Tabela 16. Interação entre os fatores pneu e carga (kN) para a variável área de contato (m²).

Pneu	Cargas (kN)			
	5	10	15	20
BPAF	0,1598 a	0,2623 a	0,2933 a	0,3135 a
Radial	0,1883 a	0,1968 b	0,2458 b	0,262 b
Diagonal	0,16 a	0,1773 b	0,1825 c	0,2255 b

- Em cada coluna, para cada fator, as médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

6.8.1.1 Análise do fator pneu dentro de cada fator carga

Pela Tabela 16 observa-se que a variável área apresentou diferença estatística significativa para todos os pneus ensaiados quando submetidos a carga de 15 kN, sendo que o valor da variável foi maior para o pneu BPAF, sofrendo um decréscimo para o pneu radial e menor para o pneu diagonal. A carga radial de 5 kN não apresentou diferença estatística significativa da variável área para todos os pneus ensaiados, sendo que as cargas de 10 kN e 20 kN apresentaram valores da variável maior para o pneu BPAF, sofrendo um decréscimo para o pneu radial e diagonal. Esse comportamento confere com Santos (2003) e Mazetto et al. (2003) que observaram maiores áreas de contato para o pneu BPAF.

6.8.1.2 Análise do fator carga dentro de cada fator pneu

Como houve interação significativa entre os fatores pneu e carga, como pode ser observado na Tabela 15, procurou-se ajustar um modelo de regressão que melhor explicasse o comportamento das cargas para cada pneu ensaiado. Esse comportamento confere com o estudo realizado por Mazetto et al. (2003) e Abeels (1976) que definem a variação da área de contato de um pneu é diretamente proporcional à carga e inversamente proporcional à pressão de inflação. A Figura 45 ilustra os modelos de regressões e suas equações, a 6,95%, 6,44% e 3,67% de significância, para os pneus BPAF, diagonal e radial.

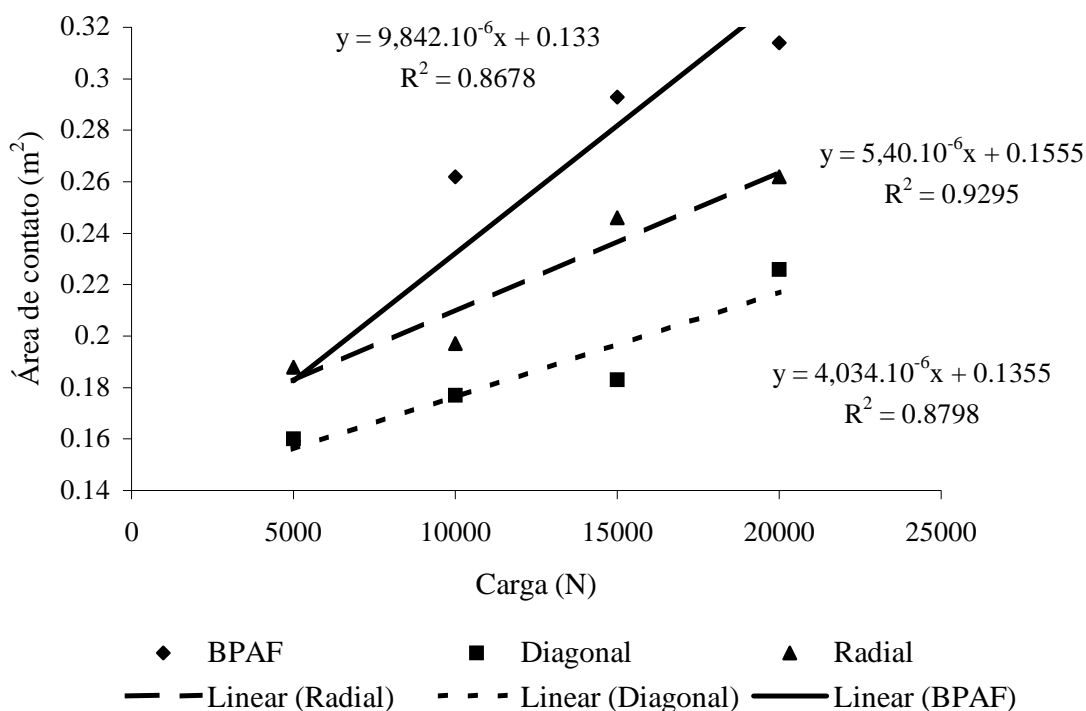


Figura 45. Modelos de regressão linear das áreas em função das cargas para os pneus BPAF, diagonal e radial.

Observando os coeficientes angulares dos modelos de regressão da Figura 45, o pneu BPAF foi mais susceptível ao aumento de carga em termos de área de contato, seguido pelo radial e, por fim, o diagonal em superfície deformável.

6.8.2 Análise do fator pneu para a variável deformação elástica

Analisando-se a Tabela 15 observa-se que o pneu BPAF apresentou diferença estatística significativa em relação aos outros pneus ensaiados para a variável deformação elástica, sendo que os pneus radiais e diagonais apresentaram menores valores de deformação elástica quando comparados ao pneu BPAF. Esses resultados assemelham-se aos de Mazetto et al. (2003).

6.8.3 Análise do fator carga para a variável deformação elástica

Pela Tabela 15 nota-se que as cargas de 20 kN e 15 kN apresentaram diferença estatística significativa em relação às outras cargas para a variável deformação elástica, sendo que a carga de 20 kN apresentou valores superiores de deformação elástica em relação a de 15 kN, sofrendo um decréscimo para a de 10 kN e 5 kN.

6.8.4 Análise do fator pneu para a variável recalque

Analisando-se a Tabela 15 observa-se que o pneu BPAF apresentou diferença estatística significativa em relação aos outros pneus ensaiados para a variável perfil do recalque do pneu no solo, sendo que os pneus radiais e diagonais apresentaram maiores valores do perfil do recalque quando comparados com o pneu BPAF, explicando as maiores deformações elásticas para esse tipo de pneu, em relação aos demais rodados.

6.8.5 Análise do fator carga para a variável recalque

Pela Tabela 15 nota-se que a variável perfil do recalque do pneu no solo apresentou diferença significativa para todas as cargas avaliadas, sendo que o valor da variável foi maior para carga de 20 kN, sofrendo decréscimos conforme diminuía-se as cargas aplicadas sobre os pneus agrícolas. Esse comportamento confere com Barger et al. (1966) que observaram maiores recalques dos pneus quando se elevaram a lastragem dos mesmos.

7 Conclusões

Com base nos resultados obtidos, nas análises realizadas e para as condições em que este experimento foi conduzido, pode-se concluir que:

A metodologia de cálculo das áreas de contato através da equação da elipse mostrou-se confiável e prática para obter as áreas de contato dos pneus agrícolas.

Os métodos para obter a impressão das áreas de contato como o pó, carbono e massa podem ser utilizados para obtenção das áreas de contato em superfície rígida.

As áreas de contato dos pneus em superfície deformável apresentaram correlações estatísticas significativas com as áreas obtidas em superfície rígida, ao contrário dos valores de deformações elásticas que não apresentaram correlações estatísticas significativas, evidenciando a importância de avaliar a variável individualmente para cada tipo de pneu.

O pneu radial apresentou maior deformação elástica em superfície rígida, enquanto que o pneu BPAF mostrou maior deformação e menor recalque em superfície deformável, em comparação aos outros pneus ensaiados.

O pneu BPAF e as baixas pressões de inflação dos rodados foram mais susceptíveis à variação da carga, estando diretamente correlacionado com a área de contato.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEELS, P.R.J. Tire deflection and contact studies. *J. Terramechanics*, v.13, n.3, p.183-196, 1976.

ARVIDSSON, J.; RISTIC, S. Soil stress and compaction effects for four tractor tyres. *J. Terramechanics*, v.33, n.5, p.223-232, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PNEUS E AROS. *Livro de normas técnicas*. São Paulo, 1994. 108p.

ATARES, P.V.; BLANCA, A.L. *Tratores y motores agrícolas*. Madrid: Grupo Mundi-Prensa, 1996. 395-413p.

BAILEY, A.C.; BURT, E.C. Soil stress states under various tire loadings. *Trans. ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.31, n.3, p.672-682, 1988.

BAILEY, A.C.; RAPER, R.L.; WAY, T.R. et al. Soil stresses under a tractor tire at various loads and inflation pressures. *J. Terramechanics*, v.33, n.1, p.1-11, 1996.

BALASTREIRE, L.A. *Máquinas agrícolas*. São Paulo: Manole, 1990. 310p.

BANZATTO, D.A; KRONKA, S.N. *Experimentação agrícola*. Jaboticabal: FUNEP, 1995. 247p.

BARGUER, E.L.; LILJEDAHN, J.B.; CARLETON, W.M. et al. *Tratores e seus motores*. São Paulo: Edgar Blucher, 1963. 398p.

BASHFORD, L.L.; AL – AHMED, S.; JENANE, C. Effects of tire and pressure on tractive performance. In: ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.), 1992, St. Joseph. (Paper 92-1011)

BLASZKIEWICZ, Z. A method for the determination of the contact area between a tyre and the ground. *J. Terramechanics*, v.27, n.4, p.263-282, 1990.

BURT, E.C.; BAILEY, A.C. Load and inflation pressure effects on tires. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.25, p.881-884, 1982.

CASTRO NETO, P. *Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas*. 2001. 155f. Tese (Doutorado em Agronomia, Área de Concentração em Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CHANCELLOR, W. J. *Compaction of soil by agricultural equipment*. Davis: Division of Agric. Science of UCD, 1977. 53p.

CORDEIRO, M.A.L. *Desempenho de trator agrícola em função do pneu, da lastragem e da velocidade de deslocamento*. 2000. 153f. Tese (Doutorado em Agronomia, Área de Concentração em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CORDEIRO, M.A.L. *Estudo do efeito de lastragem no desempenho de um trator agrícola*. 1994. 112f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CORRÊA, I.M. *Desempenho operacional de pneus radiais e diagonais em função da pressão de inflação, da condição de superfície do solo e da condição de acionamento da tração dianteira*. 2000. 121f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CORRÊA, I.M.; YANAI, K.; MAZIERO, J.V.G. et al. Trator agrícola equipado alternadamente com pneu radial de baixa pressão e pneu diagonal: desempenho comparativo. *Eng. Agrícola*, v.17, n.2, p.64-70, 1997.

DIAS, G.P.; LIMA, J.S.S.; ESCOBEDO, J.F. Estabilidade lateral de tratores agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22., 1993, Ilhéus. *Anais...* Ilhéus: SBEA, 1993a. v.3, p.1838-1846.

DIAS, G.P.; LIMA, J.S.S.; FREITAS, M.C. Constantes elásticas de pneus de tratores agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22., 1993, Ilhéus. *Anais...* Ilhéus: SBEA, 1993b. p.1847-1856.

DIAS, G.P.; LIMA, J.S.S.; FREITAS, M.C. et al. Constantes elásticas de pneus de tratores agrícolas como função de pressão de enchimento e da altura de garras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa. *Resumos...* Viçosa: SBEA, 1995. p.331.

EMBRAPA. *Manual e métodos de análise de solos*. Rio de Janeiro, 1979.

ERBACH, D.C.; KNOLL, K.K. Inflation pressure effect on soil compaction. In: ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.), 1992, Nashville. (Paper 92-1582)

FRANZ, C.A. *Avaliação do desempenho de pneumáticos para tratores com diferentes níveis de desgaste*. 1988. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Mecanização Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GADANHA JÚNIOR, C.D. *Avaliação do comportamento da resistência ao rolamento em função da lastragem, pressão de inflação e velocidade de um pneu diagonal agrícola em um solo preparado*. 1993. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Máquinas Agrícolas) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GODBOLE, R., ALCOCK, R., HETTIARATCHI, D. The prediction of tractive performance on soil surfaces. *J. Terramechanics*, v.30, n.6, p.443-459, 1993.

GOODYEAR. *Farm tire handbook*. 1994. 88p.

GRISSO, R., TAYLOR, R., WAY, T. et al. Tractive performance of 18.4R46 and 18.4R42 radial tractor tires. In: ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.), 1991, St. Joseph. (Paper 91-1589)

HALLONBORG, U. Super ellipse as tyre-ground contact area. *J. Terramechanics*, v.33, n.3, p.125-132, 1996.

INOUE, G.H.; DIAS, G. P.; QUEIROZ, D.M. et al. Efeito da pressão de enchimento e desgastes das garras e frisos na elasticidade lateral de pneus de tratores agrícolas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA RURAL, 2., 1996, Neuquen. *Memorias...* Neuquen: INTA, 1996. p.142-146.

KIM, K.U.; REHKUGLER, G.E. A review of tractor dynamics and stability. *Trans. ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.30, p.615-623, 1987.

KOMANDI, G. The determination of the deflection, contact area, dimensions, and load carrying capacity for driven pneumatic tires operating on concrete pavement. *J. Terramechanics*, v.3, n.1, p.14-20, 1976.

KOOLEN, A.J.; KUIPERS, H. *Agricultural soil mechanics*. Wageningen: Spring-Verlag, 1983. 241p.

LANÇAS, K.P. *Desempenho operacional de pneus radiais em função da pressão de inflação, da lastragem e do deslizamento das rodas de tratores agrícolas*. 1996. 172f. Tese (Livre Docência em Mecânica Aplicada/Engenharia Rural) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

LANÇAS, K.P., SANTOS FILHO, A.G., UPADHYAYA, S.K. Soil compaction evaluation in function of soil conditions, tire characteristics, and wheel slip. In: EURAGENG, 1998, Oslo. *Proc...* Oslo, 1998. (Paper, 98-A-031).

LANÇAS, K.P.; UPADHYAYA, S.K. *Pneus radiais para tratores, guia para seleção correta da pressão de inflação*. Botucatu: FCA/UNESP, 1997. 33p. (Bol. Tec. Energia na Agricultura).

LILJEDAHN, J.B.; TURQUIST, P.K.; SMITH, D.W. et al. *Tractor and their power units*. 4 ed. New York: AVI, 1989. 463p.

LOPES, A. *Desempenho de um trator agrícola em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de deslocamento em um solo argiloso*. 2000. 131f. Tese (Doutorado em Agronomia/Área de Concentração em Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

LOPES, A. *Desgaste em pneus do rodado motriz de trator agrícola em função do deslizamento*. 1996. 33f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Mecanização Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

LYASKO, M.I. The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tire on a rigid surface. *J. Terramechanics*, v.31, n.4, p.239-246, 1994.

MAGALHÃES, A.C.; LOPES, A.; DIAS, G.P. et al. Desempenho do rodado motriz em função da altura das garras dos pneus para um solo P V Câmbico, fase terraço, arado e gradeado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, 1995, Viçosa, MG. *Resumos...* Viçosa: SBEA, 1995. p.368.

MAZETTO, F.R.; LANÇAS, K.P. Determinação da área de contato de pneus agrícolas utilizando uma prensa hidráulica estática. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12., 2000, São José do Rio Preto, *Resumos...* São José do Rio Preto: Universidade Estadual Paulista, 2000. p.260.

MAZETTO, F.R.; LANÇAS, K.P.; COSTA, E.M. Avaliação da área de contato de pneus agrícolas em tanque de solo, utilizando uma prensa hidráulica. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13., 2001, Bauru, *Resumos...* Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2001.

MAZETTO, F.R.; LANÇAS, K.P.; NAGAOKA, A.K. et al. Avaliação da área de contato, deformação elástica, recalque e compactação do solo de diferentes tipos de pneus agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia, *Anais...* Goiânia: SBEA, 2003.

McKIBBEN, E.G. Effect of drawbar pull upon the effective weight on front and rear wheels of farm tractor. *Agric.Eng.*, v.9, n.8, p.243-245, 1928.

MCMULLAN, T.A.G.; PLACKETT, C.W.; PEACHEY, R. The behavior of tractor drive tyres at low inflation pressures when reacting side force. *J. Agric. Res.*, v.39, p.221-229, 1988.

MIALHE, L.G. *Manual de mecanização agrícola*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1974. 301p.

MIALHE, L.G. *Máquinas motoras na agricultura*. São Paulo: Edusp, 1980. 367p.

MILAN, M. *Avaliação de desempenho de 4 modelos de pneumáticos agrícolas em solo de textura média*. 1986. 119f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MUNSON, K.L.; ERBACH, D.C.; BERN, C.J. Tire inflation pressure and soil compaction. In: ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.), 1994, Kansas City. (Paper 94-1052)

NAGAOKA, A.K. *Desenvolvimento e avaliação do desempenho de um equipamento para ensaio dinâmico de rodado agrícola individual*. 2001. 206f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

PIMENTEL GOMES, F.A. *A estatística moderna na pesquisa agropecuária*. 3 ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. 162 p.

PLACKETI, C.W. A review of force prediction methods of off-road wheels. *J. Agric. Eng. Res.*, v.31, p.1-29, 1985.

PORTERFIELD, J.W.; CARPENTER, T.G. Soil compaction: an index of potential compaction for agricultural tires. *Trans. ASAE*, St. Joseph, v.29, n.4, p.917-22, 1986.

POTIER, M. *Pneus: la pression baisse*. *Agri-Decideur*, n.26, p.15-28, 1990.

RAGHAVAN, G.S.V.; McKYES, E.; CHASSÉ, M. Effect of wheel slip on soil compaction. *J. Agric. Eng. Res.*, Karnal, v.22, p.79-83, 1977.

RAPER,R.L.; BAILEY,A.C.; BURT,E.C.; JOHNSON,C.E. Prediction of soil stresses caused by tire inflation pressures and dynamic loads. In: ASAE (Am.Soc.Agric.Eng), 1994, Atlanta.

SÁNCHEZ, V., RENEDO, G. *Dinámica y mecánica de suelos*. Madrid: Ediciones Agrotecnicas, 1996. p.269-303.

SANTOS, P. I. B. *Determinação da área de contato de um pneu agrícola utilizando o método dos elementos finitos e o método da prensa hidráulica*. 1999. 171f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

SANTOS, P. I. B. *Método dos elementos finitos para determinação da área de contato, entre um rodado e uma superfície deformável*. 2003. 203f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

SCHWANGHART, H. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ISTVS, 10., 1990, Kobe, Japão. *Proceedings...* Kobe, Japão, 1990. p.193-204.

SERAUT, A. *Le pneumatique basse pression*. Antony: CEMAGREF, n.50, 1990. 33-37p.

SHARMA, A.K.; PANDEY, K.P. A review on contact area measurement of pneumatic tyre on rigid and deformable surfaces. *J. Terramechanics*, v.33, n.5, p.253-264, 1996.

TAYLOR, J.H. Lug angle effect on traction performance of pneumatic tractor tires. *Trans. ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.16, p.16-18, 1973.

TAYLOR, J.H.; BURT, E.C.; BAILEY, A.C. Effect of total load on subsurface soil compaction. *Trans. ASAE (Am.Soc.Agric.Eng)*, v.23, n.1-3, p.568-570, 1980.

TAYLOR, J.H., BURT, E.C., BAILEY, A.C. Radial tire performance in firm and soft soils. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng)*, v.19, n.6, p.1062-1064, 1976.

TAYLOR, J.H.; VANDERBERG, G.E.; REED, I.F. Effect of diameter on performance of powered tractor. *Trans. ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.10, n.6, p.838-842, 1967.

THANDEN, T.J. Operating characteristics of radial-ply tractor tires. *Trans ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.5, n.2, p.109-110, 1962.

TRELLEBORG. *Agricultural tyres manual*. 2002. 20p.

UPADHYAYA, S.K.; WULFSOHN, D. An overview of traction research at University of California, Davis. *Calif.Agric.* v.43, n.2, p.15-17, 1989.

UPADHYAYA, S.K.; WULFSOHN, D. Review of traction prediction equations. In: ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.), 1990a, St. Joseph. (Paper 90-1573)

UPADHYAYA, S.K.; WULFSOHN, D. Relationship between tire deflection characteristics and 2-D tire contact area. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.33, p.25-29, 1990b.

VASEY, G.H.; NAYLOR, I.T. Field tests on 14.0-30 tractor tyres. *J Agric. Eng. Res.*, v.3, p.1-8, 1958.

WILEY, J.C.; ROMIG, B.E.; ANDERSON, L.V.; ZOZ, F. M. Optimizing dynamic stability and performance of tractors with radial tires. In: ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.), 1992, St. Joseph. (Paper 92-1586)

WITTCOTT, H.A.; REUBEN, B. G. *Industrial organic chemicals in perspective*. New York: John Wiley, 1980. v.2, 502p.

WULFSOHN, D.; UPADHYAYA, S.K. Determination of dynamic three-dimensional soil-tyre contact profile. *J. Terramechanics*, v.29, n.4/5, p.433-464, 1992a.

WULFSOHN, D.; UPADHYAYA, S.K. Prediction of traction and soil compaction using three-dimensional soil-tyre contact profile. *J. Terramechanics*, v.29, n.6, p.541-564, 1992b.

WULFSOHN, D.; UPADHYAYA, S. K. Characteristics of radial ply and bias ply tires. In: ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.), 1996, St. Joseph. (Paper 86-1057)

WULFSOHN, D.; UPADHYAYA, S.K.; CHANCELLOR, W.J. Tractive characteristics of radial ply and bias ply tires in a California soil. *J. Terramechanics*, v.25, n.2 p.111-134, 1998.

YANAI, K. *Influência da pressão de inflação e da carga sobre o rodado no desempenho operacional de trator com e sem o acionamento da tração dianteira auxiliar*. 1994. 69f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

APÊNDICE

Apêndice 1. Lista de abreviaturas dos tratamentos.

P1	pneu BPAF
P2	pneu diagonal
P3	pneu radial
L1	carga de 5000 N
L2	carga de 10000 N
L3	carga de 15000 N
L4	carga de 20000 N
I1	pressão de inflação alta
I2	pressão de inflação média
I3	pressão de inflação baixa
M1	superfície rígida: massa
M2	superfície rígida: pó
M3	superfície rígida: carbono
M4	superfície deformável: solo

Apêndice 2. Dados originais da área de contato dos pneus agrícolas obtidos pela equação da elipse e digitalização das áreas.

Tratamentos	Observações							
	Digitalização das áreas (m ²)				Equação da elipse (m ²)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
P1L1I1M1	0.175	0.200	0.184	0.181	0.201	0.197	0.202	0.205
P1L2I1M1	0.206	0.206	0.206	0.206	0.233	0.233	0.237	0.237
P1L3I1M1	0.239	0.237	0.249	0.237	0.252	0.255	0.259	0.257
P1L4I1M1	0.277	0.254	0.273	0.259	0.304	0.272	0.287	0.274
P1L1I2M1	0.190	0.182	0.187	0.185	0.214	0.212	0.213	0.204
P1L2I2M1	0.230	0.238	0.228	0.214	0.251	0.248	0.249	0.249
P1L3I2M1	0.271	0.264	0.255	0.264	0.283	0.282	0.281	0.274
P1L4I2M1	0.286	0.287	0.280	0.289	0.321	0.317	0.321	0.315
P1L1I3M1	0.196	0.180	0.192	0.192	0.217	0.220	0.216	0.222
P1L2I3M1	0.247	0.247	0.224	0.225	0.266	0.273	0.266	0.266
P1L3I3M1	0.290	0.276	0.274	0.277	0.299	0.303	0.309	0.297
P1L4I3M1	0.302	0.302	0.291	0.302	0.343	0.341	0.347	0.347
P1L1I1M2	0.033	0.038	0.037	0.033	0.037	0.042	0.042	0.035
P1L2I1M2	0.044	0.056	0.076	0.048	0.050	0.059	0.054	0.055
P1L3I1M2	0.071	0.076	0.093	0.072	0.075	0.081	0.077	0.077
P1L4I1M2	0.094	0.094	0.094	0.093	0.108	0.104	0.102	0.097
P1L1I2M2	0.039	0.052	0.036	0.057	0.078	0.062	0.051	0.057
P1L2I2M2	0.079	0.080	0.074	0.078	0.090	0.091	0.090	0.086
P1L3I2M2	0.121	0.104	0.106	0.104	0.151	0.149	0.120	0.128
P1L4I2M2	0.141	0.158	0.153	0.153	0.156	0.166	0.161	0.161

Tratamentos	Observações							
	Digitalização das áreas (m ²)				Equação da elipse (m ²)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
P1L1I3M2	0.058	0.066	0.057	0.056	0.064	0.053	0.074	0.052
P1L2I3M2	0.097	0.087	0.090	0.090	0.110	0.045	0.105	0.118
P1L3I3M2	0.157	0.151	0.145	0.132	0.154	0.102	0.154	0.143
P1L4I3M2	0.174	0.165	0.168	0.167	0.176	0.168	0.175	0.178
P1L1I1M3	0.024	0.023	0.022	0.025	0.022	0.024	0.020	0.025
P1L2I1M3	0.049	0.044	0.047	0.040	0.052	0.050	0.048	0.048
P1L3I1M3	0.062	0.058	0.061	0.062	0.066	0.066	0.062	0.063
P1L4I1M3	0.075	0.066	0.077	0.080	0.082	0.082	0.089	0.082
P1L1I2M3	0.017	0.021	0.027	0.021	0.030	0.033	0.030	0.030
P1L2I2M3	0.034	0.048	0.046	0.049	0.053	0.055	0.058	0.060
P1L3I2M3	0.055	0.054	0.084	0.087	0.090	0.091	0.090	0.091
P1L4I2M3	0.093	0.112	0.113	0.113	0.110	0.116	0.116	0.117
P1L1I3M3	0.044	0.039	0.032	0.041	0.047	0.042	0.040	0.041
P1L2I3M3	0.062	0.057	0.063	0.059	0.074	0.067	0.073	0.067
P1L3I3M3	0.105	0.066	0.111	0.092	0.105	0.106	0.110	0.107
P1L4I3M3	0.131	0.102	0.132	0.121	0.141	0.132	0.134	0.139
P1L1I1M4	0,183	0,092	0,154	0,210	0,210	0,189	0,214	0,204
P1L2I1M4	0,241	0,269	0,270	0,269	0,229	0,241	0,238	0,237
P1L3I1M4	0,275	0,291	0,288	0,319	0,249	0,254	0,249	0,249
P1L4I1M4	0,320	0,305	0,308	0,321	0,276	0,272	0,280	0,283
P2L1I1M1	0.146	0.153	0.159	0.154	0.164	0.157	0.168	0.166
P2L2I1M1	0.168	0.173	0.169	0.173	0.177	0.176	0.179	0.185
P2L3I1M1	0.183	0.189	0.190	0.195	0.190	0.198	0.203	0.209
P2L4I1M1	0.228	0.221	0.226	0.226	0.239	0.224	0.233	0.164

Tratamentos	Observações							
	Digitalização das áreas (m ²)				Equação da elipse (m ²)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
P2L1I2M1	0.153	0.160	0.164	0.165	0.165	0.167	0.159	0.172
P2L2I2M1	0.180	0.181	0.189	0.188	0.201	0.198	0.208	0.206
P2L3I2M1	0.213	0.209	0.204	0.215	0.218	0.218	0.227	0.226
P2L4I2M1	0.249	0.248	0.236	0.235	0.254	0.253	0.251	0.251
P2L1I3M1	0.170	0.176	0.170	0.174	0.180	0.187	0.185	0.177
P2L2I3M1	0.211	0.199	0.208	0.214	0.216	0.223	0.224	0.218
P2L3I3M1	0.244	0.240	0.238	0.237	0.251	0.248	0.259	0.261
P2L4I3M1	0.285	0.293	0.300	0.293	0.292	0.298	0.299	0.304
P2L1I1M2	0.027	0.029	0.029	0.028	0.028	0.030	0.038	0.033
P2L2I1M2	0.054	0.059	0.059	0.058	0.063	0.064	0.059	0.057
P2L3I1M2	0.081	0.078	0.083	0.079	0.072	0.074	0.081	0.086
P2L4I1M2	0.098	0.101	0.096	0.099	0.091	0.094	0.091	0.091
P2L1I2M2	0.032	0.035	0.036	0.033	0.045	0.043	0.043	0.034
P2L2I2M2	0.076	0.079	0.080	0.070	0.067	0.070	0.066	0.064
P2L3I2M2	0.102	0.099	0.083	0.092	0.101	0.095	0.095	0.088
P2L4I2M2	0.110	0.113	0.107	0.110	0.109	0.103	0.099	0.104
P2L1I3M2	0.041	0.048	0.040	0.052	0.039	0.041	0.041	0.052
P2L2I3M2	0.109	0.091	0.087	0.091	0.083	0.086	0.083	0.082
P2L3I3M2	0.114	0.111	0.122	0.114	0.114	0.110	0.116	0.113
P2L4I3M2	0.167	0.174	0.163	0.132	0.149	0.152	0.147	0.143
P2L1I1M3	0.021	0.022	0.022	0.027	0.021	0.025	0.025	0.028
P2L2I1M3	0.052	0.052	0.049	0.047	0.052	0.051	0.050	0.050
P2L3I1M3	0.065	0.066	0.066	0.068	0.060	0.060	0.059	0.060
P2L4I1M3	0.076	0.075	0.073	0.074	0.072	0.070	0.070	0.071

Tratamentos	Observações							
	Digitalização das áreas (m ²)				Equação da elipse (m ²)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
P2L1I2M3	0.030	0.033	0.044	0.024	0.037	0.038	0.044	0.038
P2L2I2M3	0.056	0.056	0.066	0.062	0.056	0.053	0.060	0.057
P2L3I2M3	0.075	0.075	0.071	0.072	0.063	0.067	0.065	0.069
P2L4I2M3	0.092	0.091	0.094	0.096	0.088	0.091	0.090	0.091
P2L1I3M3	0.044	0.048	0.043	0.045	0.041	0.045	0.043	0.043
P2L2I3M3	0.071	0.070	0.067	0.074	0.062	0.063	0.061	0.066
P2L3I3M3	0.095	0.099	0.093	0.096	0.094	0.098	0.086	0.093
P2L4I3M3	0.146	0.146	0.145	0.143	0.128	0.120	0.130	0.131
P2L1I1M4	0,167	0,171	0,146	0,156	0,159	0,158	0,160	0,157
P2L2I1M4	0,194	0,158	0,173	0,184	0,183	0,176	0,175	0,179
P2L3I1M4	0,178	0,198	0,171	0,183	0,190	0,188	0,191	0,195
P2L4I1M4	0,203	0,230	0,245	0,224	0,224	0,217	0,225	0,226
P3L1I1M1	0.166	0.171	0.165	0.167	0.191	0.194	0.190	0.190
P3L2I1M1	0.203	0.193	0.202	0.189	0.214	0.211	0.212	0.216
P3L3I1M1	0.214	0.216	0.218	0.228	0.233	0.237	0.238	0.245
P3L4I1M1	0.234	0.236	0.237	0.239	0.263	0.261	0.259	0.262
P3L1I2M1	0.167	0.169	0.172	0.179	0.193	0.193	0.194	0.196
P3L2I2M1	0.199	0.193	0.198	0.196	0.227	0.226	0.227	0.221
P3L3I2M1	0.241	0.237	0.230	0.248	0.247	0.256	0.249	0.246
P3L4I2M1	0.255	0.265	0.254	0.262	0.271	0.276	0.271	0.271
P3L1I3M1	0.179	0.185	0.189	0.187	0.204	0.198	0.193	0.202
P3L2I3M1	0.231	0.228	0.221	0.228	0.249	0.249	0.244	0.254
P3L3I3M1	0.267	0.275	0.268	0.275	0.287	0.287	0.283	0.284
P3L4I3M1	0.292	0.297	0.297	0.298	0.305	0.312	0.305	0.314

Tratamentos	Observações							
	Digitalização das áreas (m ²)				Equação da elipse (m ²)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
P3L1I1M2	0.035	0.036	0.038	0.034	0.040	0.037	0.044	0.043
P3L2I1M2	0.050	0.066	0.064	0.058	0.064	0.074	0.072	0.072
P3L3I1M2	0.070	0.074	0.074	0.075	0.083	0.086	0.095	0.092
P3L4I1M2	0.106	0.109	0.108	0.108	0.104	0.107	0.109	0.103
P3L1I2M2	0.034	0.033	0.039	0.039	0.040	0.040	0.049	0.049
P3L2I2M2	0.056	0.067	0.066	0.067	0.075	0.074	0.080	0.076
P3L3I2M2	0.099	0.102	0.106	0.105	0.103	0.103	0.106	0.108
P3L4I2M2	0.116	0.123	0.117	0.120	0.117	0.114	0.116	0.117
P3L1I3M2	0.074	0.049	0.055	0.069	0.077	0.061	0.068	0.079
P3L2I3M2	0.105	0.109	0.115	0.086	0.106	0.105	0.119	0.106
P3L3I3M2	0.128	0.134	0.124	0.157	0.130	0.128	0.136	0.135
P3L4I3M2	0.163	0.166	0.164	0.172	0.152	0.158	0.159	0.163
P3L1I1M3	0.024	0.024	0.024	0.024	0.027	0.025	0.025	0.026
P3L2I1M3	0.046	0.046	0.046	0.045	0.053	0.054	0.053	0.051
P3L3I1M3	0.062	0.058	0.062	0.063	0.076	0.071	0.074	0.076
P3L4I1M3	0.093	0.093	0.087	0.093	0.092	0.089	0.089	0.092
P3L1I2M3	0.024	0.025	0.024	0.025	0.028	0.028	0.028	0.027
P3L2I2M3	0.056	0.049	0.047	0.050	0.067	0.056	0.057	0.058
P3L3I2M3	0.055	0.066	0.081	0.084	0.083	0.081	0.082	0.085
P3L4I2M3	0.085	0.103	0.102	0.102	0.103	0.104	0.104	0.106
P3L1I3M3	0.028	0.029	0.028	0.026	0.033	0.034	0.033	0.027
P3L2I3M3	0.077	0.083	0.078	0.078	0.083	0.084	0.078	0.087
P3L3I3M3	0.108	0.109	0.132	0.109	0.115	0.112	0.115	0.115
P3L4I3M3	0.158	0.155	0.158	0.157	0.140	0.159	0.142	0.140

Tratamentos	Observações							
	Digitalização das áreas (m ²)				Equação da elipse (m ²)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
P3L1I1M4	0,171	0,171	0,188	0,222	0,173	0,170	0,172	0,174
P3L2I1M4	0,219	0,231	0,214	0,223	0,198	0,190	0,191	0,190
P3L3I1M4	0,240	0,271	0,239	0,233	0,212	0,218	0,213	0,208
P3L4I1M4	0,280	0,250	0,270	0,248	0,238	0,239	0,239	0,240

Apêndice 3. Dados originais da deformação elástica dos pneus e recalque no solo.

Tratamentos	Observações							
	Deformação elástica (m)				Recalque (m)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
P1L1I1M1	0.009	0.010	0.014	0.013	-	-	-	-
P1L2I1M1	0.027	0.027	0.027	0.028	-	-	-	-
P1L3I1M1	0.039	0.040	0.041	0.039	-	-	-	-
P1L4I1M1	0.050	0.049	0.050	0.050	-	-	-	-
P1L1I2M1	0.016	0.021	0.018	0.018	-	-	-	-
P1L2I2M1	0.037	0.036	0.036	0.037	-	-	-	-
P1L3I2M1	0.051	0.052	0.053	0.052	-	-	-	-
P1L4I2M1	0.069	0.076	0.070	0.068	-	-	-	-
P1L1I3M1	0.026	0.020	0.016	0.022	-	-	-	-
P1L2I3M1	0.045	0.044	0.042	0.043	-	-	-	-
P1L3I3M1	0.062	0.064	0.065	0.064	-	-	-	-
P1L4I3M1	0.082	0.086	0.080	0.083	-	-	-	-
P1L1I1M2	0.022	0.022	0.020	0.020	-	-	-	-
P1L2I1M2	0.032	0.034	0.032	0.034	-	-	-	-
P1L3I1M2	0.044	0.045	0.045	0.044	-	-	-	-
P1L4I1M2	0.056	0.056	0.055	0.054	-	-	-	-
P1L1I2M2	0.024	0.030	0.027	0.028	-	-	-	-
P1L2I2M2	0.044	0.044	0.045	0.042	-	-	-	-
P1L3I2M2	0.061	0.059	0.061	0.062	-	-	-	-
P1L4I2M2	0.074	0.073	0.077	0.078	-	-	-	-
P1L1I3M2	0.033	0.032	0.030	0.031	-	-	-	-
P1L2I3M2	0.052	0.054	0.050	0.054	-	-	-	-
P1L3I3M2	0.074	0.072	0.070	0.070	-	-	-	-
P1L4I3M2	0.087	0.088	0.091	0.090	-	-	-	-

Tratamentos	Observações							
	Deformação elástica (m)				Recalque (m)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
P1L1I1M3	0.012	0.014	0.011	0.012	-	-	-	-
P1L2I1M3	0.026	0.031	0.024	0.024	-	-	-	-
P1L3I1M3	0.036	0.035	0.035	0.038	-	-	-	-
P1L4I1M3	0.046	0.045	0.046	0.047	-	-	-	-
P1L1I2M3	0.017	0.018	0.016	0.019	-	-	-	-
P1L2I2M3	0.031	0.032	0.031	0.031	-	-	-	-
P1L3I2M3	0.048	0.049	0.047	0.048	-	-	-	-
P1L4I2M3	0.059	0.061	0.061	0.060	-	-	-	-
P1L1I3M3	0.024	0.021	0.021	0.022	-	-	-	-
P1L2I3M3	0.039	0.039	0.039	0.039	-	-	-	-
P1L3I3M3	0.056	0.057	0.059	0.058	-	-	-	-
P1L4I3M3	0.074	0.073	0.073	0.074	-	-	-	-
P1L1I1M4	0,028	0,027	0,022	0,020	0,036	0,033	0,039	0,042
P1L2I1M4	0,030	0,027	0,035	0,033	0,051	0,047	0,048	0,051
P1L3I1M4	0,034	0,035	0,033	0,036	0,061	0,057	0,056	0,056
P1L4I1M4	0,041	0,053	0,050	0,037	0,066	0,057	0,056	0,067
P2L1I1M1	0.023	0.024	0.025	0.024	-	-	-	-
P2L2I1M1	0.041	0.042	0.042	0.041	-	-	-	-
P2L3I1M1	0.055	0.056	0.056	0.057	-	-	-	-
P2L4I1M1	0.068	0.069	0.068	0.069	-	-	-	-
P2L1I2M1	0.030	0.031	0.029	0.033	-	-	-	-
P2L2I2M1	0.050	0.051	0.052	0.052	-	-	-	-
P2L3I2M1	0.069	0.070	0.069	0.071	-	-	-	-
P2L4I2M1	0.087	0.088	0.087	0.087	-	-	-	-

Tratamentos	Observações							
	Deformação elástica (m)				Recalque (m)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
P2L1I3M1	0.041	0.044	0.042	0.043	-	-	-	-
P2L2I3M1	0.067	0.069	0.075	0.072	-	-	-	-
P2L3I3M1	0.096	0.095	0.096	0.096	-	-	-	-
P2L4I3M1	0.119	0.120	0.122	0.122	-	-	-	-
P2L1I1M2	0.035	0.036	0.035	0.036	-	-	-	-
P2L2I1M2	0.054	0.054	0.053	0.053	-	-	-	-
P2L3I1M2	0.064	0.065	0.066	0.065	-	-	-	-
P2L4I1M2	0.075	0.078	0.076	0.076	-	-	-	-
P2L1I2M2	0.042	0.043	0.043	0.041	-	-	-	-
P2L2I2M2	0.060	0.061	0.063	0.061	-	-	-	-
P2L3I2M2	0.077	0.078	0.078	0.076	-	-	-	-
P2L4I2M2	0.091	0.094	0.092	0.093	-	-	-	-
P2L1I3M2	0.052	0.055	0.056	0.059	-	-	-	-
P2L2I3M2	0.077	0.081	0.084	0.082	-	-	-	-
P2L3I3M2	0.102	0.106	0.108	0.108	-	-	-	-
P2L4I3M2	0.128	0.135	0.134	0.133	-	-	-	-
P2L1I1M3	0.032	0.033	0.033	0.032	-	-	-	-
P2L2I1M3	0.051	0.051	0.050	0.048	-	-	-	-
P2L3I1M3	0.060	0.060	0.060	0.061	-	-	-	-
P2L4I1M3	0.073	0.072	0.071	0.073	-	-	-	-
P2L1I2M3	0.040	0.040	0.040	0.038	-	-	-	-
P2L2I2M3	0.057	0.056	0.057	0.055	-	-	-	-
P2L3I2M3	0.073	0.074	0.072	0.073	-	-	-	-
P2L4I2M3	0.091	0.090	0.089	0.094	-	-	-	-

Tratamentos	Observações							
	Deformação elástica (m)				Recalque (m)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
P2L1I3M3	0.045	0.046	0.046	0.048	-	-	-	-
P2L2I3M3	0.068	0.069	0.070	0.074	-	-	-	-
P2L3I3M3	0.102	0.102	0.099	0.099	-	-	-	-
P2L4I3M3	0.119	0.119	0.121	0.120	-	-	-	-
P2L1I1M4	0,021	0,015	0,015	0,018	0,048	0,051	0,054	0,044
P2L2I1M4	0,026	0,019	0,010	0,027	0,057	0,058	0,065	0,058
P2L3I1M4	0,031	0,033	0,024	0,040	0,066	0,059	0,068	0,055
P2L4I1M4	0,027	0,040	0,032	0,039	0,077	0,064	0,074	0,072
P3L1I1M1	0.087	0.087	0.087	0.089	-	-	-	-
P3L2I1M1	0.106	0.105	0.107	0.107	-	-	-	-
P3L3I1M1	0.122	0.121	0.122	0.123	-	-	-	-
P3L4I1M1	0.136	0.137	0.138	0.136	-	-	-	-
P3L1I2M1	0.090	0.089	0.090	0.091	-	-	-	-
P3L2I2M1	0.114	0.111	0.111	0.114	-	-	-	-
P3L3I2M1	0.131	0.132	0.131	0.130	-	-	-	-
P3L4I2M1	0.148	0.149	0.149	0.153	-	-	-	-
P3L1I3M1	0.100	0.095	0.097	0.096	-	-	-	-
P3L2I3M1	0.130	0.131	0.131	0.131	-	-	-	-
P3L3I3M1	0.158	0.158	0.158	0.157	-	-	-	-
P3L4I3M1	0.176	0.176	0.175	0.176	-	-	-	-
P3L1I1M2	0.088	0.083	0.086	0.086	-	-	-	-
P3L2I1M2	0.102	0.109	0.103	0.104	-	-	-	-
P3L3I1M2	0.119	0.121	0.121	0.121	-	-	-	-
P3L4I1M2	0.137	0.138	0.138	0.138	-	-	-	-

Tratamentos	Observações							
	Deformação elástica (m)				Recalque (m)			
	Repetições				Repetições			
	1	2	3	4	1	2	3	4
P3L1I2M2	0.083	0.085	0.087	0.087	-	-	-	-
P3L2I2M2	0.107	0.112	0.108	0.108	-	-	-	-
P3L3I2M2	0.126	0.127	0.127	0.127	-	-	-	-
P3L4I2M2	0.144	0.147	0.147	0.147	-	-	-	-
P3L1I3M2	0.099	0.095	0.100	0.099	-	-	-	-
P3L2I3M2	0.127	0.127	0.130	0.129	-	-	-	-
P3L3I3M2	0.151	0.153	0.151	0.152	-	-	-	-
P3L4I3M2	0.172	0.175	0.175	0.174	-	-	-	-
P3L1I1M3	0.086	0.086	0.087	0.087	-	-	-	-
P3L2I1M3	0.100	0.106	0.107	0.106	-	-	-	-
P3L3I1M3	0.123	0.121	0.123	0.125	-	-	-	-
P3L4I1M3	0.138	0.139	0.137	0.139	-	-	-	-
P3L1I2M3	0.089	0.089	0.089	0.090	-	-	-	-
P3L2I2M3	0.112	0.110	0.110	0.112	-	-	-	-
P3L3I2M3	0.132	0.130	0.132	0.131	-	-	-	-
P3L4I2M3	0.147	0.148	0.148	0.149	-	-	-	-
P3L1I3M3	0.099	0.102	0.099	0.097	-	-	-	-
P3L2I3M3	0.129	0.131	0.129	0.131	-	-	-	-
P3L3I3M3	0.157	0.158	0.160	0.158	-	-	-	-
P3L4I3M3	0.173	0.172	0.173	0.173	-	-	-	-
P3L1I1M4	0,017	0,019	0,017	0,019	0,050	0,040	0,048	0,046
P3L2I1M4	0,027	0,015	0,021	0,018	0,051	0,059	0,062	0,061
P3L3I1M4	0,026	0,032	0,023	0,031	0,071	0,068	0,071	0,068
P3L4I1M4	0,042	0,043	0,041	0,049	0,077	0,075	0,076	0,075