



DEFORMAÇÕES ELÁSTICAS E ÁREAS DE CONTATO DE PNEUS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS UTILIZANDO PRENSA HIDRÁULICA EM SUPERFÍCIE RÍGIDA

Edward Victor Aleixo¹, Saulo Philipe Sebastião Guerra², Marcelo Scantamburlo Denadai³ & Emanuel Rangel Spadim⁴

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo avaliar a área de contato e os deslocamentos vertical e horizontal de dois pneus BPAF (baixa pressão e alta flutuação), um agrícola e um florestal, em superfície rígida. O pneu agrícola foi submetido aos seguintes tratamentos de pressões e cargas: 48,2 kPa e 25 kN, 193 kPa e 50 kN, 234,4 kPa e 50 kN, 344,7 kPa e 50 kN. No pneu florestal foram realizados os tratamentos de pressões e cargas: 158,5 kPa e 35 kN, 241,3 kPa e 50 kN, 379,2 kPa e 50 kN e 496,4 kPa e 50 kN. As áreas de contato dos pneus nas diferentes pressões de inflação e cargas foram demarcadas com prensa hidráulica sobre folhas de papel fixadas em superfície rígida, e as mesmas foram determinadas através de imagens utilizando o software ImageJ. Para obtenção dos valores dos deslocamentos horizontal e vertical utilizou-se dois sensores do tipo potenciômetros lineares. Observou-se que o aumento da pressão de inflação promoveu redução da área de contato e do deslocamento vertical e horizontal em ambos os tipos de pneus. Quando mensurado o deslocamento vertical, o pneu agrícola apresentou valores mais elevados quando comparado ao pneu florestal. No deslocamento horizontal, o pneu agrícola apresentou menor valor em relação ao florestal, e, não houve diferença entre os dois pneus em relação a pressão mínima. Considerando-se a área de contato houve redução da mesma nos dois pneus. A alta pressão de inflação acarretou em maior rigidez em ambos os tipos de pneu, mesmo havendo diferenças em seus compostos de borracha, reduzindo também sua área de contato com a superfície. O pneu agrícola assemelha-se ao florestal quando submetido à alta pressão de inflação.

PALAVRAS-CHAVE: deslocamento, pressão de inflação, carga; borracha.

ELASTIC DEFORMATIONS AND CONTACT AREAS OF AGRICULTURAL AND FORESTRY TIRES USING A HYDRAULIC PRESS IN HARD SURFACE

ABSTRACT: The present study had as objective to evaluate the contact area, vertical and horizontal displacement of two BPAF (low pressure and high fluctuation) tires, one forestry and other agricultural, in rigid surface. The agricultural tire was submitted to the following pressure and loads treatments: 48,2 kPa and 25 kN, 193 kPa and 50 kN, 234,4 kPa, and 50 kN, 344,7 kPa and 50 kN. While the forestry tire was submitted to pressure and loads treatments as follow: 158,5 kPa and 35 kN, 241,3 kPa and 50 kN, 379,2 kPa, and 50 kN e 496,4 kPa and 50 kN. The contact areas of the tires at different inflation pressures and loads were demarcated with hydraulic press on paper sheets fixed on a rigid surface, and these were determined through images using software ImageJ. To obtain the values of horizontal and vertical offsets, two linear potentiometers sensors were used. It was observed that the increase in the inflation pressure promoted reduction of the contact area and the vertical and horizontal displacement in both types of tires. When the vertical displacement was measured, the agricultural tire presented higher values when compared to the forest tire. In the horizontal displacement, the agricultural tire presented less value in relation to the forest, and, there was no difference between the two tires in relation to the minimum pressure. Considering the contact area there was reduction of the same in the two tires. The high inflation pressure resulted in greater rigidity in both types of tire, even though there were differences in its rubber compounds, also reducing its area of contact with the surface. The agricultural tire resembles the forest when subjected to high inflation pressure.

KEYWORDS: displacement, inflation pressure, load; rubber.

1 INTRODUÇÃO

O sistema de rodado de um trator é o elemento responsável pela sustentação, propulsão, direcionamento e desenvolvimento de força na barra de tração, o que

confere a este componente uma significativa relevância (LOPES et al., 2003).

Pneus agrícolas são o elo entre o trator e o solo, além de serem também responsáveis pelo tracionamento que o trator irá proporcionar para o arraste das demais máquinas

^{1 2 3 4 5} Faculdade de Ciências Agronômicas- FCA/UNESP, Botucatu/SP. E-mails: victor.aleixo10@hotmail.com ; ssguerra@fca.unesp.br ; msdenadai@fca.unesp.br ; spadim@gmail.com

e implementos agrícolas, realizando, assim, as operações no campo (GABRIEL FILHO et al., 2010).

Segundo Sakai et al. (2008), os pneus florestais são responsáveis por transmitir o torque da máquina ao solo. Sua estrutura é resistente contra perfurações e tem a capacidade de proporcionar maior agilidade de deslocamento dentro do talhão de colheita florestal e, por sua vez, confere maior conforto ao operador, quando comparada com máquinas de esteiras metálicas.

De acordo com Márquez (2011), o pneu é formado por uma mistura de borracha sobre uma estrutura de fios em camadas. Os fios se estendem de um lado a outro do pneu enrolando-se a um resistente arame de aço recoberto com cobre, o que facilita a aderência da borracha ao arame que forma o talão. Este conjunto de camadas forma o que se conhece como “carcaça”, que suporta a carga e assegura resistência e flexibilidade.

Os pneus agrícolas apresentam diferenças estruturais quando comparados aos pneus florestais. Os pneus florestais em sua totalidade possuem estrutura diagonal cintada, ou seja, estrutura diagonal têxtil na carcaça com uma ou mais cintas de aço sob a banda de rodagem para proteção e aumento da resistência contra perfurações e cortes (BORGHI, 2012).

Segundo Cambi et al. (2014), os pneus florestais utilizam alta pressão de inflação porque devem suportar grande quantidade de massa da máquina em que estão instalados, trabalham em terrenos irregulares com presença de tocos e pedras que facilmente podem causar danos, como arrancamentos de borracha e perfurações.

Grecenko e Prikner (2014) afirmam que a pressão de inflação dos pneus pode afetar o desempenho de tração, alterar a área de contato do pneu com a superfície, diminuir a área de contato do pneu com o solo. A variação da pressão de inflação é um fator crítico na determinação de tração dos pneus e pode gerar compactação nos horizontes do solo, bem como, influenciar no índice de patinação dos rodados, pois a potência gerada pelo motor não é utilizada para realização de tração pela máquina. Esses efeitos limitam o poder de tração e desempenho dos pneus.

Com a utilização adequada da pressão de inflação e capacidade de carga (lastro), pode-se obter um rendimento maior e um prolongamento da vida útil do pneu, além disso, minimizam-se os problemas de perda de tração, aumento de patinação e consumo de combustível, segundo Spagnolo et al. (2012). O referido autor avaliou o consumo de combustível de um trator agrícola operando com pneus novos e desgastados e observou que o consumo de combustível foi menor para os pneus novos, devido a presença de maior altura de garra nesses pneus.

A área de contato de um pneumático é um parâmetro chave para a determinação do tamanho da impressão (*footprint*) e da carga que o pneu está aplicando no solo. Através da verificação da intensidade desta impressão

pode-se calcular uma estimativa da compactação do solo. A medida que aumenta a área de contato do pneu com o solo, através do uso de pneus com maior largura da banda de rodagem, ou até mesmo com a utilização de menor pressão de inflação e lateral mais flexível, há uma distribuição de maneira uniforme da carga do rodado sobre o solo, consequentemente a resistência ao rolamento e o consumo de combustível reduzem (DISERENS, 2009).

No momento em que se realiza a montagem do pneu no aro e se procede o enchimento, este alcança as dimensões estabelecidas por projeto inicial, sendo simplificada constituída por um diâmetro total e uma largura de pneu. No entanto, quando o pneu é instalado no trator, a carga que gravita sobre ele causa uma deformação, produzindo-se um achatamento de 5 a 10 cm na lateral do pneu, sendo este fato denominado deformação ou deslocamento horizontal, de maneira que a superfície de contato aumenta assumindo uma forma elíptica em pneus diagonais ou forma quase retangular em pneus radiais (CUETO, 2013).

Barbosa (2012) ensaiou dois pneus, com garra (CG) e sem garra (SG) na banda de rodagem, com medidas de 400/60-15.5, aplicando uma carga de 29 kN. O ensaio dos pneus foi realizado em uma superfície rígida e um dos parâmetros avaliados foi a deformação total dos pneus. O autor concluiu que o pneu (CG) apresentou maior deformação em consequência de sua menor rigidez estrutural, sendo que o pneu (CG) teve uma deformação total de 58 mm e o pneu (SG) teve uma deformação total de 50 mm.

Visando demonstrar a importância das características dos pneus agrícolas e florestais, principalmente aquelas relacionadas ao tipo de material empregado em sua construção, e como estas diferenças estruturais podem influenciar o desempenho das máquinas, foi desenvolvida esta pesquisa, com o objetivo de avaliar a área de contato e o deslocamento horizontal e vertical de um pneu agrícola e um florestal, em função das pressões de inflação e aplicação de cargas sobre uma superfície rígida.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agroflorestais (NEMPA), da Faculdade de Ciências Agronômicas FCA-UNESP, Fazenda Experimental Lageado, Câmpus de Botucatu – SP.

As coordenadas geográficas, onde a prensa hidráulica utilizada para ensaio de pneus está fixada, são altitude 813 m, latitude 22° 51' 88" S e longitude 48° 26' 22" O.

Foram ensaiados dois modelos de pneus, sendo um para uso agrícola BPAF (baixa pressão e alta flutuação) e outro pneu BPAF recomendado para serviços florestais, ambos importados e fabricados pela mesma empresa. Esses modelos de pneus podem ser utilizados em reboques e máquinas agrícolas e florestais, em eixo de tração ou eixo livre e possuem a mesma largura da banda de rodagem, diâmetro do aro e índice de velocidade. O pneu florestal

possui cintas de aço e uma maior quantidade de composto de borracha, o que lhe confere resistência a furos e arrancamentos, fato que o difere do pneu agrícola, já que o mesmo não possui cintas de aço. As características de cada pneu estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características técnicas do pneu agrícola e florestal

Características	Pneus	
	BPAF Agrícola	BPAF Florestal
Dimensão	600/55-26.5	600/55-26.5
Fabricante	Trelleborg ¹	Trelleborg ¹
Modelo	Twin T421	Twin Forestry T428 SB*
Índice de velocidade	166	165
Índice de carga	A8	A8
Largura da banda (mm)	638	630
Diâmetro externo (mm)	1379	1374
Circunferência de rolamento (mm)	3970	4020
Massa do pneu (kg)	132	180
Raio estático com carga (mm)	595	625
Uso de câmara de ar	Não	Sim
Aro permitido	AG	AG
	20.00x26.5	20.00x26.5

* SB: Cintas de aço

¹ A citação de marcas e modelos de produtos comerciais não indicam recomendação dos autores

A prensa hidráulica foi utilizada para realizar aplicação das cargas sobre os pneus em uma superfície rígida e obtenção do deslocamento horizontal, vertical e área de contato dos pneus, simulando assim, as interações entre as máquinas e seus rodados e a superfície rígida. Sua constituição é de perfis e tubos de aço carbono e seu acionamento ocorre por meio de um sistema hidráulico, regulado por um software de computador ou manualmente pelo uso de botões. O funcionamento é promovido por um conjunto motor-bomba, alimentado por corrente elétrica. Em seu interior, existe um eixo horizontal, onde são acoplados os pneus para os ensaios, com o intuito de impor cargas concentradas. Entre o pistão hidráulico e a estrutura que serve de suporte para o eixo onde são acoplados os pneus, foi instalada uma célula de carga que coleta as informações de cargas aplicadas nos pneus. No interior da prensa, há uma estrutura metálica que suporta uma superfície plana constituída de aço carbono e, é sobre esta superfície, que se coloca o papel onde o pneu imprimirá sua área de contato (“footprint”). Na Figura 1 é possível visualizar a estrutura da prensa hidráulica utilizada para o ensaio dos pneus.



Figura 1 - Prensa hidráulica e superfície rígida utilizada no ensaio de pneus

Foram instalados na prensa hidráulica de ensaio de pneus, dois potenciômetros com escala de deslocamento, da marca Kyowa, modelo DT 100 A, com capacidade máxima de 100 mm de leitura. Um potenciômetro foi instalado horizontalmente e o outro verticalmente em relação a posição do pneu, com o intuito de coletar os deslocamentos horizontal e vertical do pneu, conforme ilustram as figuras 2 e 3, respectivamente.



Figura 2 – Aferição do deslocamento horizontal pelo potenciômetro



Figura 3 - Aferição do deslocamento vertical pelo potenciômetro

Uma folha de papel com 900 mm de comprimento e 900 mm de largura foi colocada sobre a superfície rígida para obtenção da impressão dos pneus. Nesta mesma folha de papel foi colocado um papel milimétrico utilizado como escala.

A banda de rodagem do pneu agrícola e florestal foi pintada com tinta (tinta de carimbo) a fim de que as áreas de contato dos pneus ficassem impressas nas folhas de papel. Para registrar e armazenar as imagens das impressões dos pneus deixadas na folha de papel foi utilizada uma câmera fotográfica digital da marca Nikon, modelo D 3200 de 24.2 megapixels. Para coleta, armazenagem e processamento dos dados obtidos foram utilizados os programas ImageJ, realizando o cálculo da área de contato do pneu com a superfície e, LabView, programa computacional da prensa hidráulica que controla a aplicação de carga, coleta e armazenagem de dados adquiridos.

Para a leitura das cargas aplicadas aos pneumáticos foi instalada uma célula de carga, entre o pistão hidráulico e a estrutura que suporta o eixo onde é acoplado o pneu e, por

meio de sinais elétricos contínuos enviados pela célula foi possível quantificar e armazenar as cargas aplicadas através das informações obtidas pelo programa de computador. Os deslocamentos horizontal e vertical foram obtidos por sensores instalados, respectivamente, na lateral do pneu e na prensa. O programa LabView, instalado no computador da prensa, controla a quantidade e intensidade da carga aplicada e em seguida armazena os dados, o que é repetido sucessivamente até se alcançar a carga máxima programada no ensaio.

Antes de iniciar a aplicação das cargas sobre os pneus, os potenciômetros foram ajustados e aferidos quanto à posição correta e aos valores de carga aplicada.

Para os pneus agrícola e florestal foram utilizadas quatro pressões de inflação recomendadas pelo fabricante, de acordo com a carga aplicada, o que significa que para cada pressão de inflação foi aplicada uma carga que o pneu suporta. As cargas aplicadas pela prensa nos pneus foram impostas gradativamente, correspondendo às cargas mínima e máxima que o pneu sofre, de acordo com o trabalho desenvolvido pela máquina onde ele está montado. A recomendação do fabricante é que os pneus florestais utilizem pressões de inflação superiores às utilizadas nos pneus agrícolas devido ao fato destes pneus possuírem uma estrutura mais resistente quando comparados aos agrícolas. As pressões de inflação do pneu agrícola e florestal foram classificadas como mínima, intermediária, nominal e alta. Nas Tabelas 2 e 3 estão descritas as pressões de inflação e as cargas aplicadas nos pneus agrícola e florestal, respectivamente.

Tabela 2 - Pressões de inflação, segundo o fabricante, de acordo com a carga aplicada sobre o pneu agrícola.

Classificação	Pressões de inflação kPa (psi)	Carga aplicada kN (kgf)
Mínima	48,2 kPa (7 psi)	25 kN (2500 Kgf)
Intermediária	193 kPa (28 psi)	50 kN (5000 Kgf)
Nominal	234,4 kPa (34 psi)	50 kN (5000 Kgf)
Alta	344,7 kPa (50 psi)	50 kN (5000 Kgf)

Tabela 3 - Pressões de inflação, segundo o fabricante, de acordo com a carga aplicada sobre o pneu florestal.

Classificação	Pressões de inflação kPa (psi)	Carga aplicada kN (kgf)
Mínima	158,5 kPa (23 psi)	35 kN (3500 Kgf)
Intermediária	241,3 kPa (35 psi)	50 kN (5000 Kgf)
Nominal	379,2 kPa (55 psi)	50 kN (5000 Kgf)
Alta	496,4 kPa (72 psi)	50 kN (5000 Kgf)

No experimento as variáveis deslocamento vertical, deslocamento horizontal e área de contato dos pneus em superfície rígida foram analisadas considerando-se o delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial tendo como fatores dois tipos de pneu (agrícola e

florestal), inflados com quatro pressões, de acordo com o manual do fabricante, e 6 repetições, conforme descritos nas Tabelas 2 e 3.

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. O software utilizado para a análise de variância foi o MINITAB 17.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O procedimento de análise de variância com um fator depende da estimativa da dispersão indica que há um fator ou característica que distingue cada um dos pneus, neste caso avaliado pela tabela de análise de variância ANOVA. De acordo com os resultados obtidos, observou-se que há variabilidade entre os pneus agrícola e florestal, onde o valor quadrado médio encontrado, a um nível de significância de 5%, para o deslocamento vertical foi de 873,1, para o deslocamento horizontal 1072,76 e área de contato foi 0,264, sendo considerados significativos estatisticamente. Por sua vez, o valor do deslocamento vertical e horizontal em função da pressão de inflação foi de 75,8 e 65,13, respectivamente, e 0,79 para a área de contato. Quando se avaliou o tipo de pneu simultaneamente com a pressão de inflação, os valores encontrados para deslocamento vertical, horizontal e área de contato foram, respectivamente, 1137,8 1581,53 e 0,756, sendo estes valores também considerados significativos estatisticamente. Desta forma, os pneus agrícola e florestal sofreram influência das pressões utilizadas, sendo o pneu florestal menos sensível às variações de pressão, o que pode ser em detrimento de sua estrutura rígida, uma vez que o mesmo possui cintas de aço e maior quantidade de borracha em sua composição. Os valores acima referidos estão ilustrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise de variância para as variáveis deslocamento vertical, deslocamento horizontal e área de contato.

Causas de variação	GL	QM		
		DV	DH	AC
Pneu	1	873,1*	1072,76*	0,264*
Pressão	3	75,8*	65,13*	0,79*
Pneu/Pressão	4	1137,8*	1,0	0,756*
CV (%)		2,84	2,87	2,96

GL: graus de liberdade; QM: quadrados médios; CV: coeficiente de variação. (*) significativo ao nível 5% de probabilidade pelo teste F.

AC = área de contato

DV = deslocamento vertical

DH = deslocamento horizontal

Na Tabela 5 estão representados os valores médios de deslocamento vertical dos pneus agrícola e florestal. Nota-se que com o aumento da pressão de inflação, da mínima

para a máxima, ocorreu a redução do deslocamento vertical dos pneus. Esse comportamento é condizente com Inoue et al. (1996) que observaram maiores deslocamentos do pneu agrícola em pressões de inflação consideradas baixas. Castro Neto (2001) e Dias et al. (1995) também obtiveram resultados semelhantes para pneu agrícola.

O ar contido na parte interna do pneu reduz a deformação das estruturas do mesmo. Segundo Barbosa e Magalhães (2015), a alta pressão interna do pneu minimiza o deslocamento da estrutura interna, mesmo com aplicação de alta carga sobre o mesmo, e seu diâmetro externo não se modifica.

O pneu florestal apresentou menor deslocamento vertical em todas as pressões de inflação quando comparado ao pneu agrícola, o que pode ser explicado pelo fato do fabricante recomendar alta pressão de trabalho e sua estrutura ser mais rígida devido a utilização de compostos resistentes de borracha e cintas de aço. De acordo com Cuong et al. (2014), o deslocamento vertical e a área de contato da banda de rodagem com a superfície diminuem significativamente à medida que há um aumento da pressão de inflação; segundo o autor a forma construtiva e os materiais utilizados na construção do pneu interferem nos parâmetros avaliados.

O aumento da pressão de inflação do pneu florestal resultou na redução do deslocamento vertical, o que também foi observado no pneu agrícola. O maior deslocamento vertical do pneu florestal foi obtido com a pressão de inflação intermediária. Na pressão de inflação mínima, a carga aplicada no pneu foi menor, o que resultou em menor deslocamento vertical quando comparada com a pressão intermediária. Este comportamento confere com Stoilov e Kostadinov (2009), que avaliaram os deslocamentos e a área de contato de um pneu florestal e concluíram que, o uso da mínima pressão de inflação combinada com a baixa aplicação de carga reduz o deslocamento do pneu.

Tabela 5 - Valores médios de deslocamento vertical do pneu agrícola e florestal.

Pressão de Inflação	Agrícola (mm)	Florestal (mm)
Alta	62,155±0,426 Da	41,667±0,516 Db
Nominal	76,61±0,707 Ca	46,558±0,232 Cb
Intermediária	78,875±0,538 Ba	55,67±1,262 Ab
Mínima	86,915±0,887 Aa	52,763±0,769 Bb

- 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.

Os valores médios do deslocamento horizontal do pneu agrícola e florestal estão representados na Tabela 6. Quando se submeteu os pneus agrícola e florestal à elevadas pressões de inflação, ocorreu a redução do deslocamento horizontal, o que também foi observado no deslocamento vertical. Estes comportamentos dos pneus agrícola e florestal conferem com os resultados obtidos por Taghavifar e Mardani (2013) que avaliaram as deformações e área de contato de um pneu diagonal, e verificaram que com o aumento da pressão de inflação ocorreu uma redução das deformações laterais e da área de contato e aumento da resistência ao rolamento. Segundo os autores, o deslocamento horizontal e vertical tem relação direta com área de contato.

Na mínima pressão de inflação não houve diferença estatística significativa entre pneu agrícola e florestal, mesmo as estruturas dos pneus sendo distintas. Isto pode ser conferido ao fato que, o uso da mínima pressão de inflação e baixa aplicação de carga no pneu florestal torna o seu deslocamento horizontal igual ao do pneu agrícola. Nas demais pressões de inflação avaliadas neste trabalho houve diferença estatística significativa entre o pneu agrícola e florestal e estes resultados conferem com o estudo elaborado por McMullan et al. (1988), que realizaram um ensaio comparativo entre pneu agrícola e florestal e concluíram que tipo de construção, rigidez de carcaça, pressão de inflação e a carga dinâmica influenciam no deslocamento elástico dos pneumáticos e apenas na mínima pressão de inflação o tipo construtivo e a rigidez da carcaça não influenciaram nos valores do deslocamento horizontal.

O pneu agrícola, nas pressões intermediária (28 psi, segundo fabricante) e nominal (pressão recomendada, segundo fabricante, para trabalho de acordo com a carga aplicada = 34 psi) e submetido à mesma carga, não apresentou diferença estatística, concluindo que o aumento da pressão de 193 kPa para 234,4 kPa não interferiu no deslocamento; porém, o aumento da pressão de inflação nominal para alta reduziu o deslocamento horizontal. O resultado obtido é condizente com o descrito por Weissbach (2003), uma vez que o autor concluiu que o aumento da pressão de inflação, classificada nominal e alta, de 150 kPa para 180 kPa causou a redução de 10% no deslocamento horizontal do pneu BPAF agrícola.

De acordo com a Tabela 6 pode-se notar que os pneus agrícola e florestal, em algumas pressões de inflação, não apresentaram diferença estatística significativa para o deslocamento horizontal. No pneu agrícola mesmo com o aumento da pressão de inflação da intermediária para nominal, a pressão de inflação não interferiu nos valores de deslocamento horizontal. O pneu florestal apresentou comportamento semelhante ao pneu agrícola na pressão nominal e alta, isso comprova que, acima de uma determinada pressão de inflação, neste caso 379,2 kPa, a pressão não influencia na deformação devido às características de sua carcaça.

Tabela 6 - Valores médios de deslocamento horizontal do pneu agrícola e florestal.

Pressão de Inflação	Agrícola (mm)	Florestal (mm)
Alta	3,612±0,469 Cb	17,697±0,038 Ba
Nominal	7,295±0,271 Bb	17,907±0,319 Ba
Intermediária	7,295±0,249 Bb	19,452±0,312 Aa
Mínima	15,785±0,897 Ab	16,752±0,195 Cb

- 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.

O resultado obtido, para área de contato, com o pneu florestal, confere com o descrito por Jun et al. (2004). Os autores ensaiaram um pneu florestal na medida 600/55-26.5, nas pressões de inflação de 100 e 240 kPa. e concluíram que a redução da pressão de inflação juntamente com a aplicação de cargas ocasionou aumento da área de contato.

No pneu agrícola o comportamento em relação área de contato está de acordo com Mazetto et al. (2004) avaliando pneus BPAF, radial e diagonal, os quais perceberam que à medida que se diminui a pressão de inflação obtêm-se maiores áreas de contato para todos os pneus estudados. Este resultado também foi obtido por Pytka et al. (2006) e Elwaleed et al. (2006). Segundo os autores, a redução da pressão de inflação em pneus agrícolas provoca o aumento da área de contato dos mesmos e a redução da pressão de inflação juntamente com aplicação de altas cargas proporciona o aumento das deformações laterais, o que ocasiona a elevação da área de contato. Diserens (2009) ressalta que o efeito da redução de pressão de inflação em aumentar a área de contato, só é garantido para altas cargas, diferindo dos resultados obtidos no presente trabalho, onde a maior área de contato do pneu agrícola foi obtida com a aplicação da mínima carga em função da mínima pressão de inflação.

Diserens et al. (2011) e Mohsenimanesh e Ward (2010) ensaiaram dois pneus, um BPAF e um radial com as mesmas dimensões. Os autores concluíram que com o aumento da pressão de inflação, ocorre redução na área de contato dos pneus com o solo. Segundo estes autores, a alta pressão de inflação utilizada nos pneus causou a redução das deformações laterais, tornando o pneu mais rígido e menos flexível.

Considerando os dois pneus, o agrícola apresenta maior discrepância nos valores das áreas de contato, de acordo com as pressões de inflação utilizadas, concluindo que a alteração da pressão de inflação interfere de forma significativa na área de contato do pneu agrícola. No pneu florestal, os valores da área de contato não apresentaram alta variação entre as pressões de inflação utilizadas. Os intervalos entre os resultados das áreas de contato foram menores, sendo que na pressão mínima e intermediária não houve diferença estatística significativa. Assim, a

variação da pressão de inflação causou pouca influência na área de contato do pneu florestal, o que pode ser em detrimento das cintas de aço que envolvem a estrutura interna do pneu.

O pneu agrícola na mínima pressão de inflação apresentou a maior área de contato em relação as demais pressões de inflação estudadas. Este comportamento do pneu agrícola também foi descrito por Corrêa (2000) que avaliou o desempenho de um trator agrícola em função da pressão de inflação dos pneus e concluiu que pressões mais baixas resultam no aumento da área de contato do pneu conferindo-lhe melhor capacidade tratativa. Naranjo et al. (2014) também concordam com os resultados obtidos por Corrêa (2000), onde os autores afirmam que o uso da baixa pressão de inflação proporciona aumento da capacidade de força na barra de tração de um trator, pelo fato do pneu possuir maior área de contato com o solo.

Na Tabela 7 observa-se que para a área de contato avaliada no pneu agrícola e florestal houve diferença estatística significativa na pressão mínima, intermediária e nominal e os resultados obtidos nestas pressões de inflação mostram que a diferença de estrutura dos pneus influencia nos valores médios da área de contato. Na alta pressão de inflação não houve diferença estática significava entre os dois pneus, isto pode ser explicado pelo fato do pneu agrícola, sob alta pressão de inflação, possuir uma grande quantidade de ar comprimido entre a sua parte interna e o aro.

Tabela 7 - Valores médios da área de contato do pneu agrícola e florestal.

Pressão de Inflação	Agrícola (m ²)	Florestal (m ²)
Alta	0,128±0,096 Ba	0,115±0,014 Ba
Nominal	0,164±0,015 ABa	0,133±0,069 ABb
Intermediária	0,183±0,021 ABa	0,144±0,023 Ab
Mínima	0,235±0,019 Aa	0,131±0,016 ABb

- 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.

- 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.

4 CONCLUSÃO

A estrutura do pneu influencia na variação das pressões. O pneu agrícola é mais sensível à essas variações e, determinados valores de pressão, não interferem sobre o deslocamento.

O uso da alta pressão de inflação nos pneus agrícola e florestal não altera a área de contato em ambos, mesmo havendo diferenças estruturais entre eles.

5 REFERÊNCIAS

BARBOSA, L. A. P. **Compactação do solo gerada por pneus de alta flutuação de eixo livre e trativo**. 2012. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mestrado em Engenharia Agrícola/Máquinas Agrícolas) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

BARBOSA, L. A. P., MAGALHÃES, P. S. G. Tire tread pattern design trigger on stress distribution over rigid surfaces and soil compaction. **Journal of Terramechanics**, v. 58, p. 27-38, 2015.

BORGHI, G. Análise dos pneus florestais. Curitiba. Universidade Federal do Paraná. 2012. Disponível em: <http://www.colheitademadeira.com.br/informativos/298/estudo-tecnico-estrutural-150;-analise-dos-pneus-florestais.html>. Acesso em: 18 ago. 2013.

CAMBI, M.; CERTINI, G.; NERI, F.; MARCHI, E. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. **Forest Ecology and Management**, v. 338, p. 124-138, 2014.

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/Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

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 Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

CUETO, O. G.; CORONEL, C. E. I.; MORFA, C. A. R.; SOSA, G. U.; GÓMEZ, L. H. H.; CALDERÓN, G. U.; SUÁREZ M. H. Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 146-152, 2013.

CUONG, D. M.; ZHU, S.; NGOC, N. T. Study on the variation characteristics of vertical equivalent damping ratio of tire-soil system using semi-empirical model. **Journal of Terramechanics**, v. 51, p. 67-80, 2014.

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.

DISERENS, E.; DÉFOSSEZ, P.; DUBOISSET, A.; ALAOU, A. Prediction of the contact area of agricultural

traction tyres on firm. **Biosystems Engineering**, v. 110, p. 73-82, 2011.

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

ELWALEED, A. K.; YAHYA, A.; ZOHADIE, M.; AHMAD, D.; KHEIRALLA, A. F. Effect of inflation pressure on motion resistance ratio of a high-lug agricultural tyre. **Journal of terramechanics**, v. 43, p. 69-84, 2006.

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

GRECENKO, A.; PRIKNER, P. Tire rating based on soil compaction capacity. **Journal of Terramechanics**, v. 58, p. 77-92, 2014.

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.

JUN, H. G.; WAY, T. R.; LOFGREN, B.; LANDSTROM, L.; BAILEY, A. C.; BURT, E. C. MCDONALD, T. P. Dynamic load and inflation pressure effects on contact pressures of a forestry forwarder tire. **Journal of Terramechanics**, v. 41, p. 209-222, 2004.

LOPES, A.; LANÇAS, K. P, FURLANI, C. E. A.; NAGAOKA, A. K.; CASTRO NETO, P., GROTTA, D. C. C.. Consumo de combustível de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho. **Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande**. v. 7, n. 2, p. 382-386, 2003.

MAZETTO, F. R. **Avaliação das metodologias de determinação das áreas de contato e deformações elásticas de pneus agrícolas em função das pressões de inflação e cargas radiais**. 2004. 96f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

MÁRQUEZ, L. **Tractores agrícolas: Tecnología y utilizacion**. 1. Ed. Madrid: B&H Editores, 2011.843 p.

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.

MOHSEMANESH, A.; WARD, S. M. Estimation of a three-dimensional tyre footprint using dynamic soil-tyre

contact pressures. **Journal of Terramechanics**, v. 47, p. 415-421, 2010.

NARANJO, S. D.; SANDU, C.; TAHERI, S. Experimental testing of the off-road instrumented tire on soft soil. **Journal of Terramechanics**, v. 56, p. 119-137, 2014.

PYTKA, J.; DABROWSKI, J.; ZAJAC, M.; TARKOWSKI, P. Effects of reduced inflation pressure and vehicle loading on off-road traction and soil stress and deformation state. **Journal of terramechanics**, v. 43, p. 469-485, 2006.

SAKAI, H.; NORDFJELL, T.; SUADICANI, K.; TALBOT, B.; BOLLEHUUS, E. Soil compaction on forest soils from different kinds of tires and tracks and possibility of accurate estimate. **Croat. Journal**, v. 29, p. 15-27, 2008.

SPAGNOLO, R. T.; VOLPATO, C. E. S.; BARBOSA, J. A.; PALMA, M. A. Z.; BARROS, M. M. Fuel consumption of a tractor in function of wear, of ballasting and tire inflation pressure. **Engenharia Agrícola. Jaboticabal, SP**, v. 32, n. 2, p. 131-139, 2012.

STOILOV, S.; KOSTADINOV, G. D. Effect of weight distribution on the slip efficiency of a four wheel drive skidder. **Biosystems Engineering**, v.04, p. 486-492, 2009.

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

WEISSBACH, M. On-the-move monitoring of soil-tyre interaction on soft soil using wireless data acquisition. **Soil Cutting and Tillage**. v. 4 , n. 3, p. 8-16, 2003.