

## EFEITO DE CARGAS APLICADAS E PRESSÃO DE INFLAÇÃO NO DESEMPENHO DE PNEU AGRÍCOLA

ALDIR CARPES MARQUES FILHO<sup>1</sup>, MURILO BATISTTUZZI MARTINS<sup>2</sup>  
ARTHUR GABRIEL CALDAS LOPES<sup>3</sup>, LUCAS SANTOS SANTANA<sup>4</sup>, KLÉBER PEREIRA LANÇAS<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Prof. Dr. Mecanização Agrícola, Depto. Engenharia Agrícola, DEA/UFLA, Lavras-MG. aldir@ufla.br

<sup>2</sup> Prof. Dr. Mecanização Agrícola, Depto. Agricultura, DEA/UEMS, Cassilândia-MS.

<sup>3</sup> Prof. Dr. Mecanização Agrícola, Depto. Engenharia Biossistemas, DEA/UFG, Goiânia-GO.

<sup>4</sup> Prof. Dr. Máquinas Agrícolas, Depto. Engenharia Agrícola, UFVJM, Unai-MG.

<sup>5</sup> Prof. Dr. Mecânica Agrícola, Depto. Engenharia Rural, ENR/UNESP, Botucatu-SP.

Apresentado no  
LIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2024  
6 a 8 de agosto de 2024 – Natal – RN, Brasil

**RESUMO:** Os ensaios de pneus agrícolas são fundamentais para a determinação das características de interação máquina-solo. Este estudo avaliou o desempenho de pneu agrícola sob diferentes cargas aplicadas e pressões de inflação. Utilizou-se um pneu diagonal de trator agrícola, modelo F2R-1(12.4-24/6lonas). O pneu foi submetido às cargas de 800, 1000, 1200, 1400 e 1600kgf com 110, 165 e 220kPa de inflação. Analisou-se a área total de contato em superfície rígida (cm<sup>2</sup>), deformação lateral (cm) e deformação vertical (cm) do pneu. Os resultados passaram por análises de correlação linear de Pearson para as variáveis de pressão, área de contato e avaliação de deformações laterais e verticais. Resultados evidenciaram que o incremento de cargas aumentou linearmente a área de contato entre pneu-superfície ( $r^2=0.95$ ). Porém, o incremento de pressão interna de inflação, reduz a superfície de contato. Ao duplicar a carga aplicada, de 800 para 1600kgf, a área de contato cresce em média 50.5% e, ao duplicar a pressão de inflação, de 110 para 220kPa, a área de contato decresce 15.5%. O ajuste correto de pressão interna de inflação e carga sobre os rodados é fundamental para alcançar maior eficiência dos sistemas mecanizados, melhorando a qualidade das operações agrícolas e reduzindo os impactos nos solos.

**PALAVRAS-CHAVE:** footprint, tratores agrícolas, tração.

## EFFECT OF APPLIED LOADS AND INFLATION PRESSURE ON AGRICULTURAL TIRE PERFORMANCE

**ABSTRACT:** Agricultural tire tests are essential for determining machine-soil interaction characteristics. This study evaluated the performance of agricultural tires under different applied loads and inflation pressures. A bias tire from an agricultural tractor, model F2R-1 (12.4-24/6 plies), was used. The tire was subjected to loads of 800, 1000, 1200, 1400 and 1600kgf with 110, 165 e 220kPa inflation. The total contact area on a rigid surface (cm<sup>2</sup>), lateral deformation (cm), and vertical deformation (cm) of the tire were analyzed. The results underwent Pearson linear correlation analysis for the variables of pressure and contact area and assessment of lateral and vertical deformations. Results showed that the increase in load linearly increased the tire-surface contact area ( $r^2=0.95$ ). However, the increase in internal inflation pressure reduces the contact surface. When doubling the applied load, from 800 to 1600kgf, the contact area increases by an average of 50.5%; however, when doubling the inflation pressure, from 110 to 220kPa, the contact area decreases by 15.5%. The correct adjustment of internal inflation pressure and load on the wheelsets is essential to achieving

greater efficiency in mechanized systems, improving the quality of agricultural operations, and reducing impacts on the soil.

**KEYWORDS:** footprint, agricultural tractor, traction.

**INTRODUÇÃO:** Os rodados representam altos custos nos processos produtivos agrícolas, além de impactarem severamente a estrutura física dos solos (KELLER et al., 2019; YUE et al., 2021). A correta distribuição de peso da máquina sobre os rodados é determinante para a melhoria da capacidade de tração e eficiência energética do sistema mecanizado (KUMAR, NOORI e PANDEY, 2019). As características construtivas dos pneus, influenciam diretamente o estabelecimento de área de contato com o solo, capacidade de tração das máquinas, deformação e compactação dos solos (ACQUAH e CHEN, 2023; MAMONTOV et al., 2020; MARQUES FILHO et al., 2022; ROÇA et al., 2022; ZHANG et al., 2022). Desta forma, torna-se fundamental estudar as áreas de contato pneu-solo (YADAV e RAHEMAN, 2023), para que sejam estimados parâmetros operacionais e de seleção de pneus e rodados mais assertivos. O conhecimento aprofundado da interface pneu-solo, permite prever o comportamento de tração (CUTINI et al., 2022; HE, SANDU E OSORIO, 2019) e a resistência ao rolamento das máquinas agrícolas (ACQUAH & CHEN, 2023; TEIMOURLOU E TAGHAVIFAR, 2015). Segundo Silva et al. (2016) as medidas de área de contato na interface solo-rodado podem ser superestimadas, a depender do método utilizado. A limitação física proporcionada pelo trânsito de máquinas à produtividade das culturas, através da compactação do solo, pode ser melhor compreendida através de testes controlados e ensaios de desempenho de rodados e pneus, bem como por simulações e previsões obtidas por modelagem matemática (JÚNNYOR et al., 2019). Desta forma, torna-se imperativo investigar e compreender melhor a constituição dos solos e das superfícies de rolamento para estimar o desempenho de rodados e ferramentas (JASOLIYA, UNTAROIU e UNTAROIU, 2024). A compreensão das características de tração e desempenho de rodados podem ser aprimoradas através de ensaios de campo ou laboratório. Entretanto, poucos são os ensaios abordando o desempenho de rodados em situação estática e dinâmica (SUNUSI et al., 2020). Uma forma expedita e confiável para avaliar o desempenho de pneus é através da padronização de superfícies, sendo que a superfície rígida apresenta vantagens, pois possui comportamento covariável e representa uma superfície ideal, sem deformações plásticas e ou elásticas. O estudo da área de interação pneu-solo em superfícies padronizadas, permite determinar adequadamente projetos de tráfego controlado e logística de trânsito nas lavouras, com vistas à manutenção da qualidade física dos solos e maior sustentabilidade dos sistemas agrícolas. O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de um pneu agrícola de trator, em superfície rígida padronizada, sob influência de diferentes cargas e pressões internas de inflação.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O estudo foi desenvolvido no Núcleo de Ensaios de Máquinas e Pneus Agroflorestais (NEMPA), Fazenda Experimental Lageado da Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), pertencente à Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, UNESP/Botucatu-SP. Para a realização dos ensaios controlados, foi utilizada a Unidade Fixa de Ensaio de Pneus (UFEP), descrita detalhadamente por Marques Filho et al. (2022), sob Superfície Rígida. A Unidade de Ensaios era constituída por um suporte metálico composto por duas torres de acionamento hidráulico, onde o rodado pneumático foi fixo a um eixo central, possibilitando aplicar cargas controladas em teste padronizado com superfície controlada (Figura 1).

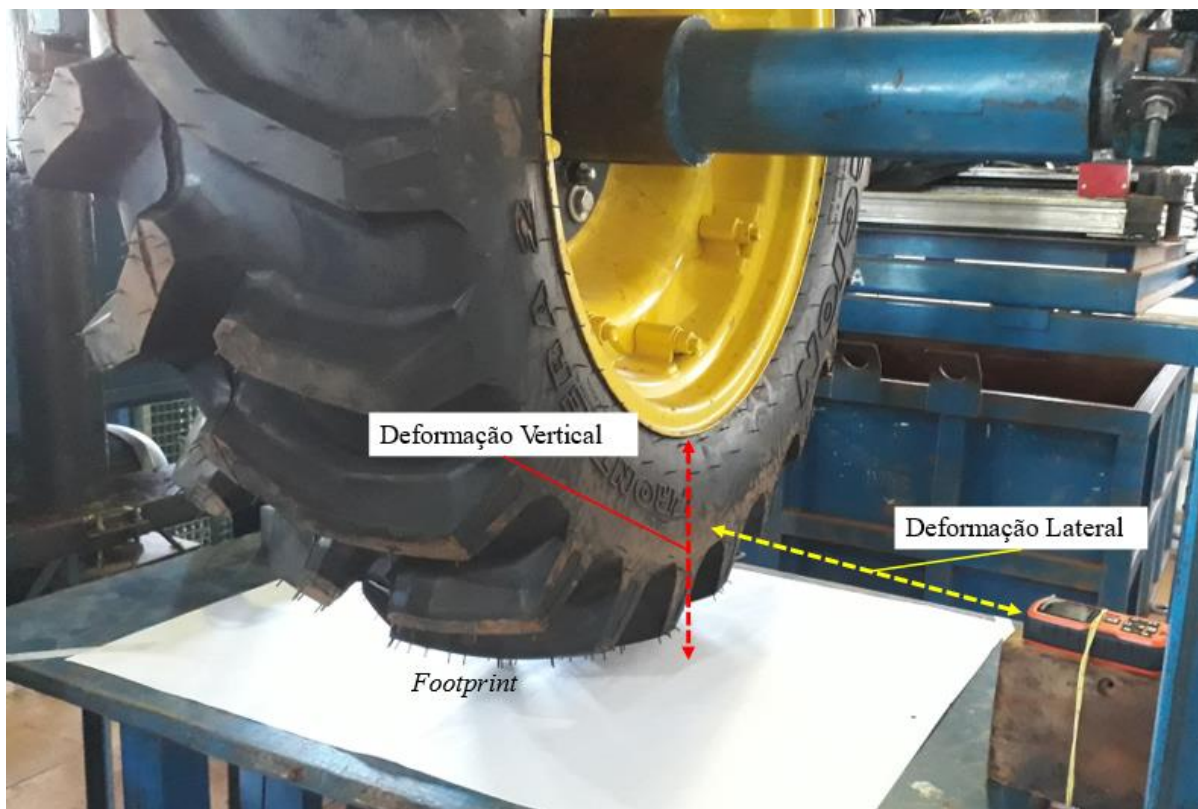


FIGURA 1. Ensaio em superfície rígida na Unidade Fixa de Ensaios de Pneus (UFEP). Superfície recoberta com papel cartolina branco e pneu F2R-1(12.4-24/6lonas) pintado com tinta preta para determinação do footprint.

Para o teste de área de contato (footprint), utilizou-se folhas de papel cartolina branco, com 0,80 m de comprimento e 0,60 m de largura. A banda de rodagem do pneu foi previamente umedecida com tinta nanquim preta, de forma que a área de contato do pneu, em cada carga aplicada e pressão de inflação fosse impressa na folha de papel (Figura 2).

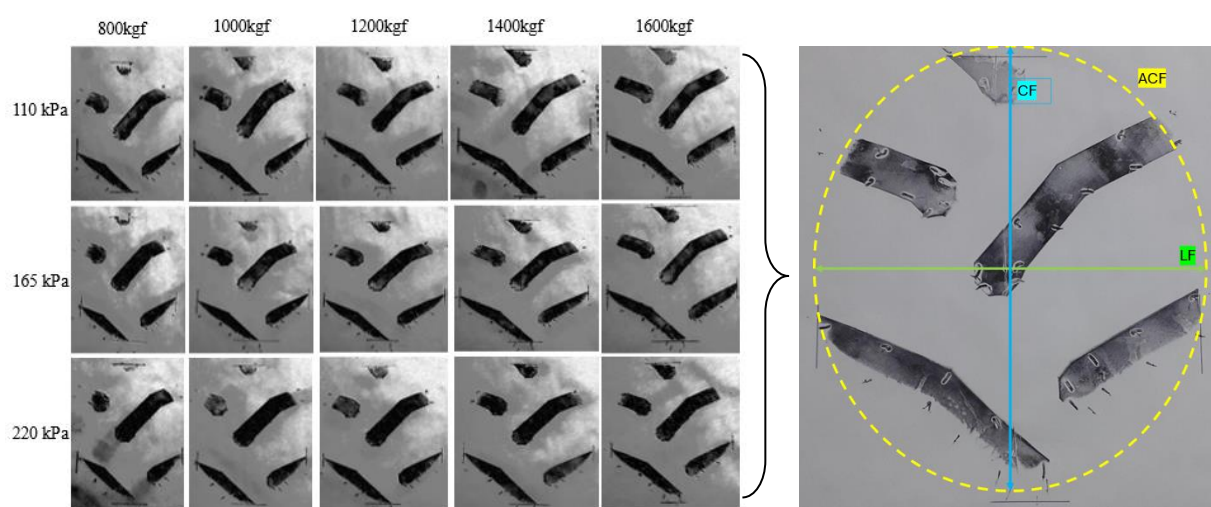


FIGURA 2. Footprint em papel cartolina branco após aplicação de carga na UFEP com pneu F2R-1(12.4-24/6lonas). ACF – área de contato total; CF - comprimento; LF - largura de contato.

A UFEP foi acionada com velocidade constante até atingir as cargas selecionadas em função da pressão interna de inflação do pneu “F2R-1(12.4-24/6lonas)”. Foram aplicadas 3 pressões de inflação: 110kPa (p1), 165kPa (p2) e 220kPa (p3) e 5 cargas: 800, 1000, 1200, 1400 e 1600kgf. Foram avaliadas a área de contato total do footprint (ACF); Largura do footprint (LF) e comprimento do Footprint (CF) (Figura 2). As coletas de deformação lateral e vertical do pneu foram obtidas através de scanner laser. A área de contato foi estabelecida através do programa Surfer Golden Software, via análise de imagens digitalizadas (footprint). As deformações laterais e longitudinais do pneu foram obtidas através de sensor LIDAR instalado na UFEP. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC) para diferentes superfícies e cargas. Todos os tratamentos contaram com 3 repetições. Os resultados dos ensaios passaram por testes de normalidade e análise de regressão linear e coeficiente de correlação de Pearson. Os resultados de deformação lateral e vertical do pneu passaram por testes de normalidade Anderson-Darling, homogeneidade de variância e teste de Tukey à 5% de probabilidade. Todas as análises foram desenvolvidas nos sistemas “R software” e “Microsoft Excel”.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** As características construtivas dos pneus agrícolas podem afetar o estabelecimento de diferentes áreas de contato com o solo, capacidade de tração das máquinas e compactação dos solos (ACQUAH e CHEN, 2023). As maiores áreas de contato dissipam menores pressões nos solos (MARQUES FILHO et al., 2022). Os resultados dos ensaios em superfície rígida evidenciaram que o incremento de cargas possui correlação linear com o aumento de área de contato do pneu agrícola em superfície rígida. O efeito da pressão interna de inflação apresentou comportamento inversamente proporcional à área de contato, ou seja, quanto menor a pressão interna, maiores foram as áreas de contato (Figura 3).

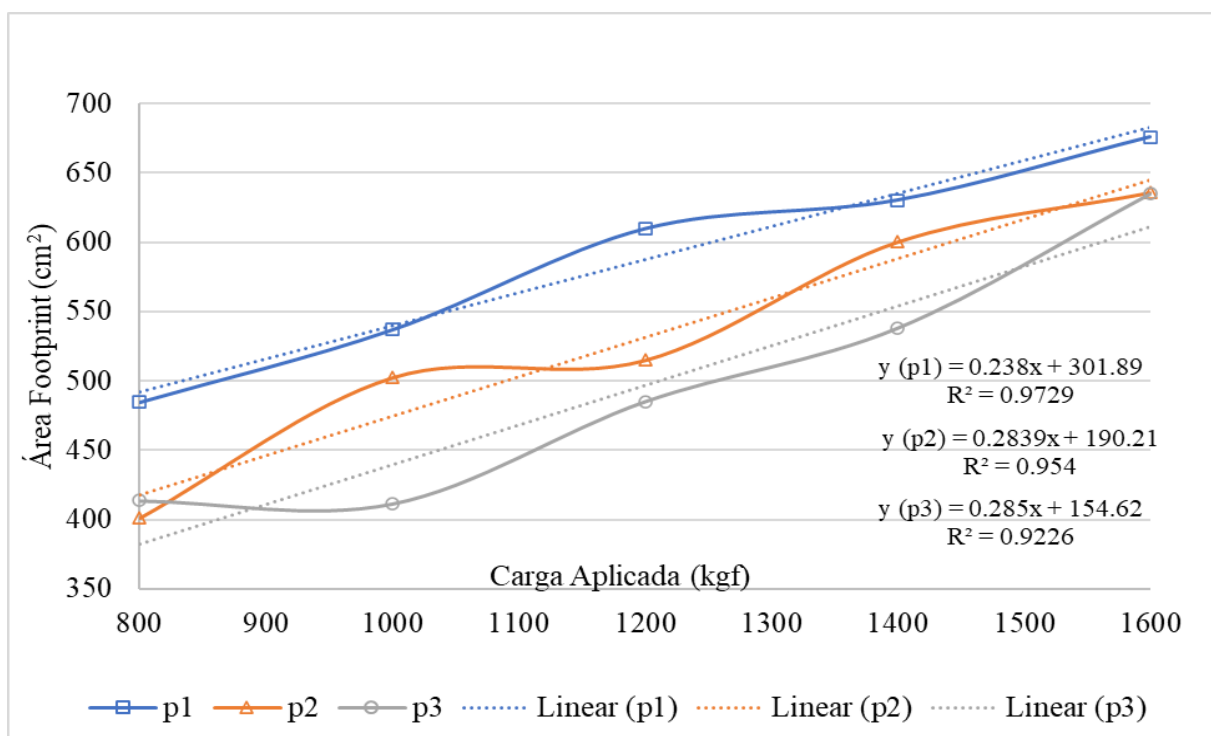


FIGURA 3. Área de Contato em função das cargas e pressões de inflação nos testes de pneu F2R-1(12.4-24/6lonas).

Os coeficientes angulares positivos estabelecidos pelas retas do coeficiente de correlação de Pearson, determinam  $r^2$  de 0,97, 0,95 e 0,92 para as pressões  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$  respectivamente. O ajuste linear indica que o crescimento da área de contato possui ajuste equivalente ao crescimento da aplicação de cargas no pneu. Esse fator pode ser decisivo para determinar que operações de campo, sejam realizadas com as pressões internas adequadas, recomendadas pelos fabricantes (ALAPA, 2019; SILVA et al., 2021) em função de índices de velocidade e características dos rodados. Ao duplicar a carga aplicada, de 800 para 1600kgf, a área de contato cresce em média 50.5%, independentemente da pressão adotada. No entanto, ao duplicar a pressão de inflação, de 110 para 220kPa, a área de contato decresce 15.5%. As deformações do pneu também apresentaram diferenças estatísticas significativas em relação aos tratamentos aplicados. Na prática, algumas fazendas não realizam adequadamente o monitoramento e controle das pressões internas dos pneus de máquinas agrícolas, isso pode reduzir a eficiência das operações e afetar a capacidade de tração das máquinas (CUTINI et al., 2022). Máquinas de semeadura que possuem rodados pneumáticos para acionamento de mecanismos dosadores podem apresentar falhas na deposição de sementes se a pressão dos pneus não for adequada. Tratores agrícolas podem patinar mais e consumir mais combustível no caso de descontrole das características de pressão e cargas, pois as deformações do pneu e solo são distintas em função do tipo de solo e modelo construtivo dos rodados. A compactação dos solos em função do tráfego de máquinas pesadas é um problema ambiental de ordem mundial (KELLER et al., 2019), portanto, torna-se fundamental equalizar corretamente as pressões de inflação e cargas na seleção dos pneus agrícolas. No tráfego controlado, os pneus aplicam pressões localizadas nas linhas definidas no solo, e o ajuste correto é imperativo para maior eficiência operacional e redução da compactação (YUE et al., 2021). Nossos resultados evidenciaram que a pressão interna dos pneus e as cargas aplicadas são determinantes para a determinação da área de contato. Novos modelos de inteligência artificial podem estimar as áreas de contato pneu-superfície rígida com erros em torno de 2% (YADAV e RAHEMAN, 2023). Através de modelos de estimativas de tração em diferentes condições de terreno é possível criar algoritmos de predição eficientes para interação máquina-rodado (SUNUSI et al., 2020), no entanto, a estimativa através de ensaios padronizados, como os aplicados em nossa pesquisa, permite validar esses modelos digitais. De acordo com Mamkagh (2019) a alteração da interface pneu-superfície pode ser obtida pela redução ou incremento da pressão interna de inflação dos pneus, porém, essa relação deve obedecer a certos limites, para não danificar a estrutura dos pneus. Os autores concluem que as corretas seleções da pressão interna de inflação dos pneus, bem como do teor de água do solo, podem contribuir para o aumento da eficiência da operação mecanizada. Em situações de campo, agricultores tendem a reduzir arbitrariamente a pressão dos pneus objetivando redução no impacto nos solos e ganhos de tração, no entanto, essa prática pode gerar falhas nos pneus e até mesmo, em casos extremos, o desligamento entre pneu e aro. A deformação lateral e vertical dos pneus é importante para estabelecer o footprint nos solos, assim, pneus mais flexíveis tendem a apresentar maiores áreas de contato com o solo. A Figura 4 descreve as deformações verticais e laterais dos pneus em função das pressões de inflação e cargas aplicadas.

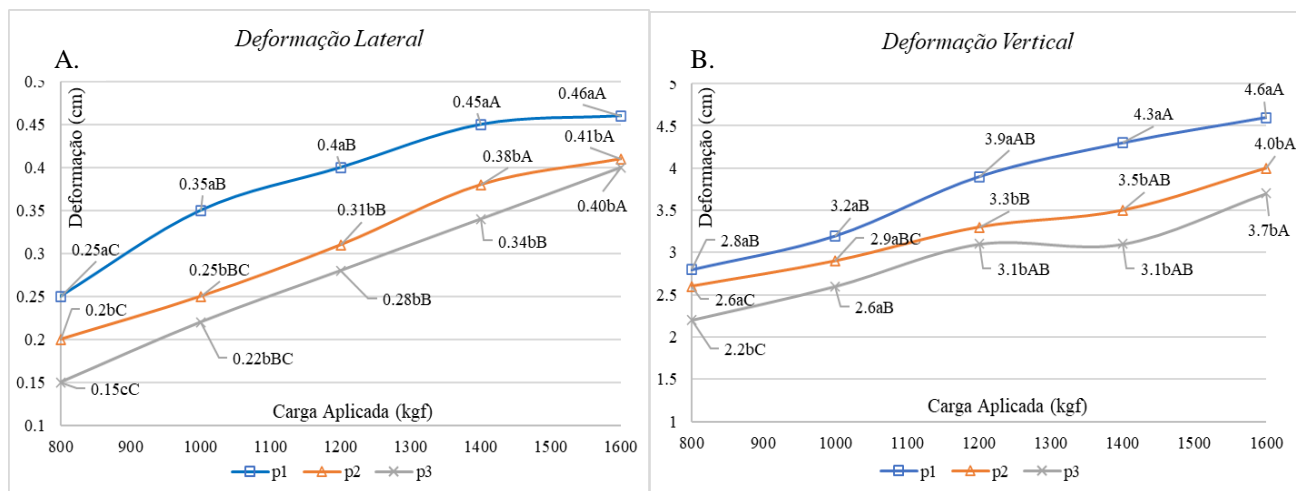


FIGURA 4. Deformação lateral e vertical de pneu F2R-1(12.4-24/61lonas) em função de pressões de inflação p1(110kPa); p2(165kPa) e p3(220kPa) e cargas aplicadas. Letras minúsculas após a média indicam diferença entre pressões (p1, p2 e p3)\* e, letras maiúsculas diferenças entre cargas aplicadas: 800, 1000, 1200, 1400 e 1600kgf. \*(Tukey Test ( $p < 0.05$ ) - CV-2,2% Deformação Lateral; CV-2.6% Deformação Vertical)

Verifica-se que o incremento das cargas aplicadas ao rodado, aumenta a deformação lateral e a deformação vertical do footprint (Figura 4A e 4B). Encontramos diferenças estatísticas para as médias de deformação lateral em função da pressão e das cargas aplicadas ao rodado. As maiores deformações laterais foram obtidas na menor pressão de inflação (p1), seguidas por p2 e p3 respectivamente. Baixas pressões internas de inflação permitem maior flexibilidade da banda lateral dos pneus, isso contribui para o incremento da área de contato (Figura 3). Nossos resultados colaboram com ROÇA et al. (2022) onde a deflexão dos pneus foi determinante na determinação de área de contato e capacidade de tração das máquinas. Pneus com lateral flexível são aplicados na agricultura moderna para reduzir o impacto nos solos, visto que o aumento de área de contato, reduz a pressão aplicada próximo da zona radicular das culturas, além disso, maiores deformações permitem que os pneus alcancem maiores capacidades de tração (YADAV e RAHEMAN, 2023). A deformação vertical apresentou proporcionalidade com o incremento de carga no rodado. As maiores deformações verticais foram obtidas com a pressão p1 e carga de 1600kgf. As baixas pressões internas de inflação reduzem a resistência do rodado à deformação e possibilitam maiores deformações verticais. De acordo com Mamontov et al. (2020), a eficiência dos tratores agrícolas de rodas na execução de operações é caracterizada pela capacidade de tração, que depende principalmente do peso do trator e de seu sistema de rodagem e, do nível de umidade e compactação do solo. Em geral, esses aspectos têm direções opostas. Ou seja, um aumento na eficiência de tração requer um aumento no peso da máquina e, conseqüentemente, um aumento na carga radial dos pneus e na pressão interna dos mesmos. Isto leva a um aumento da pressão dos pneus no solo e faz com que esse atinja níveis críticos de compactação. Como resultado da compactação excessiva do solo, o rendimento das culturas agrícolas é significativamente reduzido. Desta forma, os resultados do presente estudo permitem destacar a importância da correta seleção de pressão de inflação para as operações agrícolas em função das cargas aplicadas no rodado. Os ensaios estáticos permitem a determinação precisa das deformações do pneu e estabelecimento de footprint em função das condições de carga e pressão interna, no entanto, testes dinâmicos, em diferentes tipos de solo (JASOLIYA, UNTAROIU e UNTAROIU, 2024), e cobertura vegetal (MARQUES FILHO et al, 2022), podem fornecer

perspectivas mais assertivas de performance dos rodados, visto que permitem validar o efeito da velocidade das características de interação máquina-solo.

**CONCLUSÕES:** A pressão interna de inflação e as cargas aplicadas foram determinantes para o estabelecimento da área de contato e deformação do pneu. O incremento de cargas aumenta linearmente a área de contato entre pneu-superfície ( $r^2= 0.95$ ). As maiores pressões de inflação propiciam menor deformação lateral e vertical do pneu, reduzindo a área de contato (footprint). Ao duplicar a carga aplicada, de 800 para 1600kgf, a área de contato cresce em média 50.5%, independentemente da pressão adotada. No entanto, ao duplicar a pressão de inflação, de 110 para 220kPa, a área de contato decresce 15.5%. O ajuste correto de pressão interna de inflação e carga sobre os rodados é fundamental para alcançar maior eficiência dos sistemas mecanizados. Selecionar corretamente a pressão de inflação interna dos pneus e a carga aplicada pelas máquinas pode aprimorar a qualidade das operações agrícolas, reduzir a compactação do solo e o consumo de combustível, além de aprimorar as condições de tração.

**REFERÊNCIAS:** ACQUAH, K., CHEN, Y. Discrete element modelling of soil pressure under varying number of tire passes. **Journal of Terramechanics**, 107, 23-33, 2023.

ALAPA, Associação Latino-Americana dos Fabricantes de Pneus, Aros e Rodas. **Manual de segurança agrícola e off the road**, 2019.

CUTINI, M., COSTA, C., BRAMBILLA, M., BISAGLIA, C. Relationship between the 3D footprint of an agricultural tire and drawbar pull using an artificial neural network. **Applied Engineering in Agriculture**, 38(2), 293-301, 2022.

HE, R.; SANDU, C.; OSORIO, J. E. Systematic tests for study of tire tractive performance on soft soil: Experimental data collection. **Journal of Terramechanics**, v. 85, p. 59-76, 2019.

JASOLIYA, D.; UNTAROIU, A.; UNTAROIU, C. A review of soil modeling for numerical simulations of soil-tire/agricultural tools interaction. **Journal of Terramechanics**, v. 111, p. 41-64, 2024.

JÚNNYOR, W. D. S. G.; DISERENS, E., MARIA, I. C. D.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; DE SOUZA, Z. M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of the total environment**, v. 681, p. 424-434, 2019.

KELLER, T., SANDIN, M., COLOMBI, T., HORN, R., OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, 194, 104293, 2019.

KUMAR, S.; NOORI, M. T.; PANDEY, K. P. Performance characteristics of mode of ballast on energy efficiency indices of agricultural tyre in different terrain condition in controlled soil bin environment. **Energy**, v. 182, p. 48-56, 2019.

MAMKAGH, A. M. Effect of soil moisture, tillage speed, depth, ballast weight and, used implement on wheel slippage of the tractor: a review. **Asian Journal of Advances in Agricultural Research**, p. 1-7, 2019.

MAMONTOV, A.; PELYPENKO, Y.; REBROVA, O.; SHEVTSOV, V. Determination of Rational Operating Modes of Operation of Tractor Agricultural Tires. **Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions**, 36-38, 2020.

MARQUES FILHO, A. C.; MEDEIROS, S.D.S.; MARTINS, M.B.M.; MOURA, M.S.; LANÇAS, K.P. Can the straw remaining on the ground reduce the wheelsets impact on sugarcane crop? **Sugar Tech**, v. 24, n. 6, p. 1814-1820, 2022.

ROȘCA, R.; CÂRLESCU, P.; VLAHIDIS, I. T. V.; PERȘU, C. The improvement of a traction model for agricultural tire–soil interaction. **Agriculture**, 12:12, 2035, 2022.

SILVA, R. B. D.; IORI, P.; SOUZA, Z. M. D.; PEREIRA, D. D. M. G.; VISCHI FILHO, O. J.; SILVA, F. A. D. M. Pressões de contato e o impacto de conjuntos motomecanizados em Latossolo com presença e ausência de palhada de cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 3, p. 265-278, 2016.

SUNUSI, I. I.; ZHOU, J.; WANG, Z. Z.; SUN, C.; IBRAHIM, I. E.; OPIYO, S.; OLANREWAJU, T. O. Intelligent tractors: Review of online traction control process. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, p. 105176, 2020.

TEIMOURLOU, R. F.; TAGHAVIFAR, H. Determination of the super-elliptic shape of tire-soil contact area using image processing method. **Cercetari Agronomice in Moldova**, v.48, n.2, p.5-14, 2015.

YADAV, R., RAHEMAN, H. Development of an artificial neural network model with graphical user interface for predicting contact area of bias-ply tractor tyres on firm Surface. **Journal of Terramechanics**, 107, 1-11, 2023.

YUE, L., WANG, Y., WANG, L., YAO, S., CONG, C., REN, L., & ZHANG, B. Impacts of soil compaction and historical soybean variety growth on soil macropore structure. **Soil and Tillage Research**, 214, 105166, 2021.

ZHANG, F., QIU, Y., TENG, S., CUI, X., WANG, X., SUN, H., ... FU, S. Design and Test of Tread-Pattern Structure of Biomimetic Goat-Sole Tires. **Biomimetics**, 7(4), 236, 2022.