

ENSAIOS DE PNEUS PARA TRANSBORDO DE CANA DE AÇÚCAR EM SUPERFÍCIES RÍGIDA E DEFORMÁVEL

ALDIR CARPES MARQUES FILHO¹, MURILO BATTISTUZI MARTINS², LUCAS SANTOS SANTANA³, RAFAEL DE OLIVEIRA FARIA⁴, CARLOS EDUARDO DA SILVA VOLPATO⁵, KLEBER PEREIRA LANÇAS⁶

¹ Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto, Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, UFLA, Lavras – MG, Fone: (0xx35) 38291665, aldir@ufla.br.

² Eng. Agrônomo, Prof. Doutor, Depto de Agronomia, DAG/UEMS, Cassilândia-MS.

³ Eng. Agrônomo, Doutor em Engenharia Agrícola, DEA/UFLA, Lavras-MG.

⁴ Eng. Agrícola, Prof. Doutor, Depto Engenharia Agrícola, DEA/UFLA, Lavras-MG.

⁵ Eng. Florestal, Prof. Doutor, Depto Engenharia Agrícola, DEA/UFLA, Lavras-MG.

⁶ Eng. Mecânico, Prof. Doutor, Depto. Eng. Rural, DER/UNESP, Botucatu-SP.

Apresentado no
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

RESUMO: Os veículos de carga são os principais responsáveis pela compactação do solo na cana-de-açúcar. O presente estudo teve como objetivo avaliar a interação entre rodados de transbordos de carga em superfícies deformáveis e rígidas. Utilizamos três modelos de pneus em duas superfícies de rolamento. Adotamos um delineamento inteiramente casualizado com três repetições, para a área total de contato e área pontual das garras. Na superfície deformável verificamos a resistência à penetração do solo (SPR). Os pneus rodoviários tiveram a maior área de garras em relação à área total, a relação área total/área de garras foi de 66,9% em p1, 34,8% em p2 e 54,8% em p3. Os pneus rodoviários podem ser aplicados em situações onde o tráfego é controlado no campo, porém, para áreas onde não são aplicadas medidas de controle de tráfego, o pneu p2 mostrou melhor desempenho. Em superfície deformável, as áreas de contato aumentam 515% em relação à superfície rígida, isso ocorre devido ao rearranjo das partículas do solo, esse rearranjo causa o processo de compactação. Maiores SPR foram expressos por pneus diagonais e rodoviários (p1 e p3) indicando que a aplicação desses modelos deve ser feita com cautela em áreas agrícolas, principalmente em condições de alta umidade do solo.

PALAVRAS-CHAVE: compactação, mecanização, índice de cone.

TIRE TESTING FOR SUGARCANE TRANSSHIPMENT ON RIGID AND DEFORMABLE SURFACE

ABSTRACT: Cargo vehicles are responsible for the impact on soil to sugarcane crop. The present study aimed to evaluate the interaction between load wheelsets in deformable and rigid running surfaces. We use three tires' models installed on transshipments vehicles to sugarcane crop and two road surfaces. We adopted a completely randomized design with three replications, for the total contact area and punctual area claws. In the deformable surface we verified the resistance to soil penetration (SPR). Road tires had the largest point contact area in relation to the total area, the total area/grip area ratio was 66.9% in p1, 34.8% in p2 and 54.8% in p3. Road tires may be applicable in situations where traffic is controlled in the field, however, for areas where traffic control measures are not applied, the p2 tire has better performance. In a deformable surface, the contact areas increase in relation 515% to the rigid surface, this occurs due to the rearrangement of soil particles, this rearrangement causes the compaction process.

Higher SPR obtained by bias and road tires (p1 and p3) indicate application of these models should be carried out with caution in agricultural areas, mainly under conditions of high soil moisture.

KEYWORDS: soil compaction, mechanization, cone index.

INTRODUÇÃO: O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e a cultura tem uma participação significativa no comércio agrícola do país. A cana-de-açúcar permite a produção de etanol, como importante biocombustível renovável para geração de eletricidade, contribuindo diretamente para a sustentabilidade agroindustrial (CONAB, 2023).

Rodados agrícolas representam elevados custos no processo de produção da cana-de-açúcar e, a depender do modelo, podem causar impactos severos no solo (FARHADI et al., 2019; KELLER et al., 2019). De acordo com Acquah e Chen (2023), Zhang et al. (2022) e Marques Filho et al. (2022), as características construtivas dos pneus influenciam diretamente o desempenho de tração das máquinas e a compactação do solo.

O conhecimento aprofundado da interface pneu-solo permite prever o comportamento de tração (CUTINI et al., 2022; HE, SANDU e OSORIO, 2019; YADAV e RAHEMAN, 2023) e a resistência ao rolamento de máquinas agrícolas (ACQUAH e CHEN, 2023; TEIMOURLOU e TAGHAVIFAR, 2015).

Novos modelos de rodados estão sendo desenvolvidos (DENG et al., 2023), porém a aplicação na agricultura ainda depende de fatores como o menor impacto no solo, custo da tecnologia, qualidade da tração (ZHANG et al., 2022), cobertura vegetal (MARQUES FILHO et al., 2022).

O estudo da interação pneu-solo permite definir projetos de controle de tráfego e logística de trânsito nas lavouras, visando à manutenção da qualidade física dos solos. O objetivo deste estudo foi avaliar a interação com o solo de três modelos de pneus, utilizados em veículos de carga e transporte de cana-de-açúcar, em ensaios controlados sob superfícies rígidas e deformáveis.

MATERIAL E MÉTODOS: O estudo foi desenvolvido no Núcleo de Ensaios de Máquinas e Pneus Agroflorestais (NEMPA), Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP/Botucatu-SP. Para a realização dos ensaios, foi utilizada a Unidade Fixa de Ensaio de Pneus (UFEP) sob Superfície Rígida e ensaio em Superfície deformável (Figura 1).



FIGURA 1. Unidade Fixa de Ensaios de Pneus (UFEP).

Foram avaliados três modelos de pneus com aplicação comercial em veículos de carga e transporte na cultura da cana-de-açúcar, sendo: p1 radial rodoviário (2x275/80R22.5); p2 radial agrícola (600/50R22.5); p3 pneu diagonal agrícola (600/50-22.5). As variáveis respostas obtidas foram, a área total de contato (m²), área pontual de garras (m²), comprimento (cm), largura (cm) do footprint.

Durante os testes em superfície rígida, a banda de rodagem de cada pneu foi previamente umedecida com tinta nanquim de cor preta e pressionada em folha de papel branco, disposto sobre superfície indeformável. O sistema hidráulico da UFEP foi acionado para realizar descida com velocidade constante até alcançar a carga de 50,5 kN sobre o pneu. Nos testes em superfície deformável foram aplicadas cargas aos pneus sobre uma amostra de solo confinada em tanques, padronizado em umidade e densidade (umidade: 20 ± 1%; densidade: 1,59 ± 0,2 g cm⁻³). Utilizou-se um Latossolo Vermelho Amarelo de acordo com Santos et al. (2018), este solo possui representatividade alta no cenário agrícola produtivo da cana-de-açúcar.

Após a aplicação de cargas no tanque de solo, procedeu-se a realização das avaliações da área de contato via escaneamento digital e resistência à penetração do solo em diferentes pontos do recalque P0 – fora da área do footprint; PL1 e PL2 interior do footprint no sentido longitudinal; PT1 e PT2 sentido transversal da área interna do footprint e PC no centro da área de contato. As variáveis obtidas foram: área total do recalque causado pelo rodado (m²) e a Resistência à Penetração média do Solo (SPR) em cada condição superficial (MPa). Posteriormente os dados foram transferidos ao software Golden Surfer v.18 onde foram gerados os mapas tridimensionais de cada tanque amostral.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC) para 2 superfícies de contato e 3 modelos de pneus. Os resultados dos ensaios passaram por testes de normalidade Shapiro-Wilk; teste de homogeneidade de variância de Bartlett e Levene's; análise de variância (ANOVA) e, quando aplicável, teste de Tukey à 5% de probabilidade. Todas as análises foram desenvolvidas no sistema estatístico R software.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A Figura 2 representa os resultados dos testes em superfície rígida.



	Área contato (m ²)	comprimento (m)	largura (m)	Área garras (m ²)
Sup. rígida				
<i>p1 (a)</i>	0,0698b	0,206c	0,568a	0,0467a
<i>p2 (b)</i>	0,1173a	0,430a	0,543a	0,0409b
<i>p3 (c)</i>	0,0704b	0,324b	0,395b	0,0386c

*médias com letras diferentes nas colunas indicam diferença estatística pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

FIGURA 2. Resultados dos testes em superfície rígida: a) p1 (275/80R22.5); b) p2 (600/50R22.5) e c) p3 (600/50-22.5) após aplicação de carga na UFEP.

A maior área de contato total foi apresentada por p2, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Os pneus p1 e p3 não apresentaram diferença estatística, o que indica que a montagem dupla de pneus de caminhão apresenta desempenho semelhante aos pneus

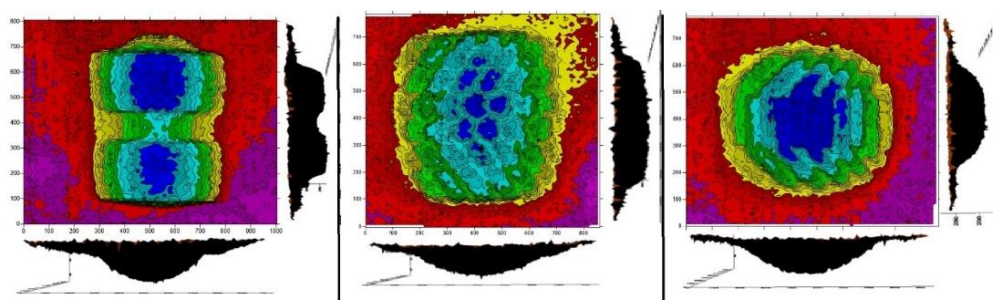
diagonais tradicionais. A similaridade em área de contato total entre p1 e p3, contribui para justificar a aplicação de transbordos rodoviários no canavial, o que de acordo com Melo e Rosa (2015) é uma aplicação crescente na fase de implantação da cultura (cana muda). No entanto, as altas pressões de inflação dos modelos rodoviários, podem impactar negativamente a estrutura física do solo.

Observou-se que o pneu p2, mesmo apresentando a maior área de contato total dentre os tratamentos, não imprimiu a maior área de garras. A área total de contato do pneu com a superfície é determinante para o impacto causado no solo, assim em solos firmes a área de garras é um parâmetro importante, já que estas não penetram no solo, determinando assim a área total. Em relação a isso, o pneu p1 apresentou melhor desempenho. Silva et al. (2016) afirmaram que a pressão exercida pelo rodado no solo depende diretamente de sua área de contato e pressão de inflação interna. Os pneus rodoviários apresentaram maior área de contato pontuais o que permite melhor desempenho em superfícies indeformáveis.

Zhang et al. (2022) verificaram que a área pontual ou área de garras dos pneus possui efeito direto no desempenho de tração das máquinas. Na relação percentual direta entre a área de contato total e área de garras obtidas para cada modelo de pneu, obteve-se o total de 66,9% para p1, 34,8% para p2 e 54,8% para p3. Em áreas compactadas a área de contato real com o solo será determinada pela área de garras (TEIMOURLOU e TAGHAVIFAR, 2015; SILVA et al., 2016).

Para a variável comprimento da área de contato, foi obtida diferença estatística em todos os tratamentos, com a maior média atribuída a p2 e menor média para p1. Pneus com deformação longitudinal tendem a proporcionar menor estresse ao solo na zona radicular das culturas. Para a variável largura de contato, p1 e p2 não diferiram estatisticamente, entretanto p3 apresentou a menor média global dentre os pneus estudados, fato que pode ser correlacionado à maior rigidez da banda lateral nos pneus diagonais e ao formato elipsoidal da área de contato expressa por estes modelos.

A Figura 3 evidenciou a área deformada no tanque solo, durante os ensaios em superfície deformável, para cada tipo de pneu (footprint).



Superfície deformavel	Área contato (m ²)	comprimento (m)	Largura (m)	profundidade (m)	SPR (MPa)
p1 (a)	0,33c	0,51b	0,61b	0,11*	1,98a
p2 (b)	0,50a	0,66a	0,67a	0,09*	1,35c
p3 (c)	0,45b	0,68a	0,59b	0,12*	1,65b

*médias com letras diferentes nas colunas indicam diferença estatística pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

FIGURA 3. Resultados dos testes em superfície deformável: p1 (275/80R22.5); p2 (600/50R22.5) e p3 (600/50-22.5) após aplicação de carga na UFEP.

As menores profundidades foram obtidas para o pneu p2 radial. Na superfície deformável a maior área de contato foi obtida por p2 (0,50m²). Também se verificou diferença entre as áreas de p1 e p3, 0,33 e 0,45m² respectivamente. As áreas de contato são determinantes da pressão exercida no solo. O menor comprimento de footprint foi obtido em p1 (0,51m), e 0,68

e 0,66m para os pneus p3 e p2. Cutini et al. (2022) verificaram que a deformação que o pneu causa no solo afeta diretamente a capacidade de tração deste e a resistência ao rolamento.

Pneus mais estreitos aplicam cargas mais afastadas das culturas agrícolas nas linhas de cultivo. Com isso o pneu p1 apresenta vantagens, já que possui em média 0,1m a menos do que p2 e p3. Dessa forma, usando p2 ou p3 nos veículos de carga na cana-de-açúcar, a probabilidade de transitar sobre a lavoura é ampliada.

A profundidade de deformação do solo não variou significativamente entre os modelos de pneu estudados. Porém, em termos absolutos o pneu p2 apresentou menor profundidade de footprint, ocasionado pela redução da pressão aplicada no solo pela sua maior área de contato. Karelina, Balabina e Mamaev (2022) indicam que a obtenção da profundidade de deformação do solo pode ser estimada através de simulações computacionais, já que a obtenção deste parâmetro e do raio de rolamento das rodas torna-se difícil em métodos diretos. Nossa pesquisa apresenta alternativas para obtenção de tais parâmetros e os efeitos deste no impacto à estrutura física dos solos.

Comparando-se os resultados apresentados de área total (m²) para a superfície rígida (Figura 2) com os resultados de área de contato em superfície deformável (Figura 3) verificou-se um acréscimo de 478, 427 e 642% nas áreas de contato de p1, p2 e p3 respectivamente. Em média, nossos resultados permitem inferir que a área de contato dos pneus, cresceu em média 515% na expressão do footprint em superfície deformável quando comparada com a área em superfície rígida. Esta informação pode contribuir para modelos de previsão de área de contato e impactos nos solos causados pelos rodados (YADAV e RAHEMAN, 2023).

Considerando-se que, mesmo em áreas com tráfego controlado os veículos ocasionalmente podem sair do traçado original planejado, maiores áreas de contato total são recomendadas pela atenuação e distribuição de cargas no solo de forma mais homogênea (FARHADI et al., 2019). Desta forma, a seleção do modelo ideal de pneu a ser utilizado, irá depender das condições gerais de manejo da unidade produtiva e da gestão do tráfego de máquinas na lavoura.

Para a Resistência à Penetração do Solo (SPR) obtivemos diferenças significativas para os diferentes modelos de pneus. Este parâmetro é imperativo na determinação do estado de compactação do solo e está atrelado ao impedimento de crescimento radicular das culturas agrícolas em condições de campo. O gráfico de índice de cone médio, contendo todos os pontos SPR do interior do footprint foi montado para visualização do estresse causado por cada modelo de rodado ao subsolo. Verificamos que os diferentes modelos de pneus, interferem de forma distinta em subsolo, causando zonas de turbulência e acomodação de partículas. As linhas do índice de cone evidenciam maiores estresses em diferentes profundidades para cada modelo de pneu (Figura 4).

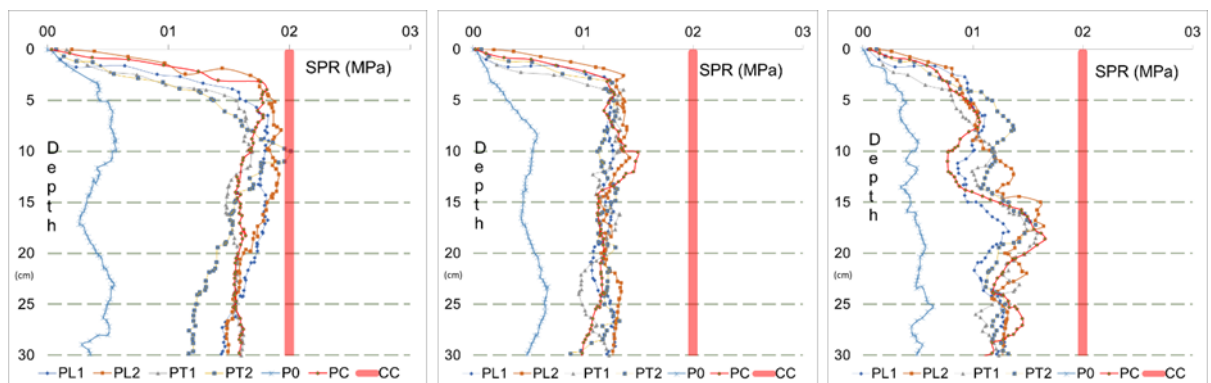


FIGURA 4. Resultados SPR dos testes em superfície deformável: p1 (275/80R22.5); p2 (600/50R22.5) e p3 (600/50-22.5) após aplicação de carga na UFEP.

A maior resistência à penetração foi apresentada pelo modelo de pneu rodoviário p1 (1.98MPa) e a menor pelo pneu radial p2 (1.35MPa), seguido por p3 (1,65MPa). Observou-se que o pneu rodoviário p1 apresentou o maior estresse no subsolo na camada de 5 a 10cm de profundidade, indicando alto impacto na superfície do solo, em zona de crescimento radicular das culturas. O pneu p2 mantém-se mais constantemente afastado da zona de compactação (CC - 2MPa) o que comprova a menor pressão aplicada no solo pela maior área de contato deste modelo. O pneu p3 afetou mais intensamente a zona subsuperficial do solo, na camada de 15 a 20cm de profundidade. Nesta área do solo as raízes de abastecimento e alimentação das plantas estão em pleno desenvolvimento e as altas resistências à penetração do solo podem afetar negativamente o desempenho das culturas.

Em todos os pontos no interior do recalque em p1 as resistências à penetração do solo alcançaram valores próximos à zona de limite de desenvolvimento radicular das culturas vegetais. O ponto P0 indicou que o impacto dos rodados foi significativo na área de contato pois foi obtido fora da área de contato após a montagem do tanque. A modelagem e realização de testes em condições controladas permitem a maior compreensão dos processos de deformação do solo em relação ao trânsito dos rodados.

De acordo com Keller et al. (2019) a compactação do solo afeta diretamente a produtividade das culturas e prejudica a eficiência ambiental da agricultura. Isso ocorre pela redução de oxigenação no solo (YANG et al., 2020). Os modernos modelos computacionais de simulação, como os avaliados por Acquah e Chen (2023) necessitam de maiores informações sobre as áreas de contato, footprint e deformações no solo para se tornarem mais assertivos, dessa forma nossa pesquisa abre novas fronteiras do conhecimento para essa área.

CONCLUSÕES: O modelo do pneu é determinante no impacto causado na superfície de rolamento. Em superfície rígida, as maiores áreas de contato total de um pneu não refletem necessariamente em maior área de contato de garras. A relação de área total/área de garras foi de 66,9% em p1, 34,8% em p2 e 54,8% em p3.

Verificou-se que em superfície deformável as áreas de contato aumentam em relação ao ensaio sob superfície rígida em média na faixa de 515%, isso ocorre em função do acomodação das partículas do solo e formação do recalque no solo. Em profundidade este rearranjo pode causar o processo de compactação. A profundidade do recalque determina fatores importantes como a resistência ao rolamento e capacidade de tração.

O modelo de pneu que causou maior estresse no subsolo foi o rodoviário p1. Este modelo teve a menor área de contato, aplicou as maiores pressões no solo e ocasionou as maiores SPR, alcançando o limite crítico de 2MPa na profundidade de 10cm.

As menores resistências à penetração do solo foram apresentadas pelo pneu de modelo radial agrícola p2. Este pneu deformou o solo em um recalque mais raso e aplicou menores pressões ao solo em função de sua maior área de contato.

As maiores SPR obtidas pelos pneus diagonal e rodoviário (p1 e p3) indicam que a aplicação desses modelos deve ser realizada com cautela em áreas agrícolas, principalmente sob condições de alta umidade do solo.

REFERÊNCIAS:

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

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra Brasileira: Cana-de-açúcar, safra 2023/24, vol. 11. **Primeiro Levantamento**, Brasília- DF, p:1-55, n.1, 2023.

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.

DENG, Y.; WANG, Z.; SHEN, H.; GONG, J.; XIAO, Z. A comprehensive review on non-pneumatic tyre research. **Materials & Design**, 111742, 2023.

FARHADI, P.; GOLMOHAMMADI, A.; MALVAJERDI, A. S.; SHAHGHOLI, G. Finite element modeling of the interaction of a treaded tire with clay-loam soil. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.162, p.793-806, 2019.

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

KARELINA, M.; BALABINA, T.; MAMAEV, A. Wheel Rolling on a Deformable Support Surface. In 2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (**EMCTECH**) (pp. 1-4). IEEE, 2022.

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.

MARQUES FILHO, A. C.; DE MEDEIROS, S. D. S.; MARTINS, M. B.; DOS SANTOS MOURA, M.; 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.

MELO, M. O.; ROSA, J. H. M. Corte Transbordo e Transporte: Uso de transbordo na colheita mecanizada e seus impactos no CTT. In: **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, Cap.18.1, p.429-438, 2015.

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.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, EMBRAPA, 5 ed., Brasília-DF, 2018.

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.

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, p.1-11, 2023.

YANG, S.; LIU, J.; XU, L.; ZHANG, M.; JENG, D. S. A New Approach to Explore the Surface Profile of Clay Soil Using White Light Interferometry. **Sensors**, v. 20, n. 11, p. 3009, 2020.

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.