

CATALOGAÇÃO E ESTIMATIVA DE TENSÕES MECÂNICAS NO SOLO INDUZIDAS POR TRATORES AGRÍCOLAS

Palavras-Chave: compactação do solo, propagação de tensões, tratores.

Autores(as):

Joice Cristina Ávila, FEAGRI - UNICAMP

Prof. Dr. Renato Paiva de Lima, FEAGRI - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A compactação do solo agrícola compromete a qualidade do solo, o crescimento das plantas e a conservação ambiental, sendo causada principalmente pelo tráfego de máquinas pesadas. O contato pneu-solo pode gerar tensões superiores à capacidade de suporte do solo, agravando o problema, que depende também da umidade do solo. Para compreender e prever esse fenômeno, foram desenvolvidos modelos matemáticos como o de Söhne (1953), posteriormente aprimorados para incluir deformações e estimar volumes compactados. Com o avanço da computação, surgiram ferramentas como SoilFlex, Terranimo® e PredComp, que simulam a propagação de tensões no solo com base nas características das máquinas e pneus.

METODOLOGIA:

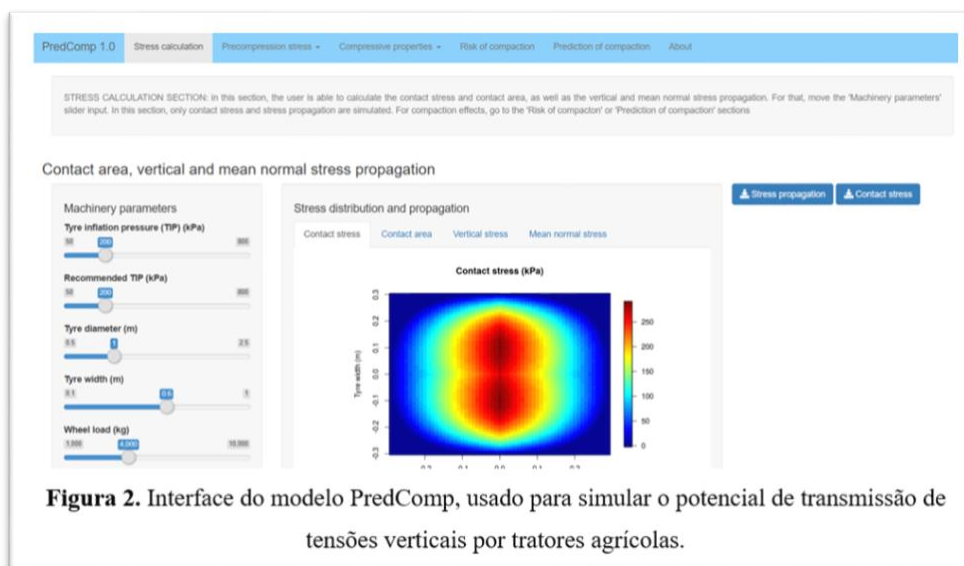
Catálogo de Máquinas

Catálogos comerciais dos fabricantes (Figura 1) forneceram dados detalhados dos tratores, como modelo, potência (CV), massa total, distribuição por eixo e características dos pneus (dimensões e pressão de insuflagem). A coleta sistemática assegurou consistência e representatividade. Esses dados foram organizados em planilhas Excel e utilizados na construção do banco de dados para simulações. As informações serviram como entrada no modelo computacional de tensões verticais no solo, integrando aspectos físicos e operacionais das máquinas. Essa catalogação foi fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados.



Estimativa dos níveis de tensão

O estudo foi conduzido utilizando o modelo de compactação do solo PredComp [<https://appsoilphysics.shinyapps.io/PredComp/>] (Lima et al., 2021). A simulação requer parâmetros da máquina e dos pneus: 1) pressão de insuflagem, 2) pressão recomendada, 3) largura, 4) diâmetro do pneu e 5) carga por roda. As estimativas de tensão vertical (σ_v) foram geradas até 40 cm de profundidade, com intervalos de 10 cm. A Figura 2 apresenta a interface do modelo.

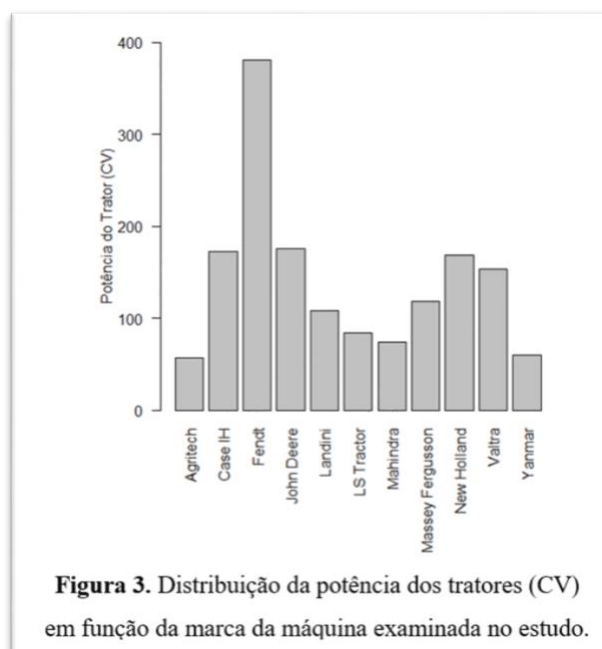


Análise dos dados

A análise de dados envolveu a catalogação das máquinas (modelo, peso e potência), padronização das unidades e organização das variáveis em um banco de dados. Em seguida, foram realizadas simulações numéricas das tensões verticais no solo (σ_v) em profundidades de 10 a 40 cm, permitindo avaliar sua distribuição no perfil do solo e relacioná-la com a potência das máquinas (CV).

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A análise das marcas de tratores revela grande variação de potência, de 56 a 380 CV, indicando diferentes capacidades operacionais. Modelos como Agritech (56 CV), Yanmar (60 CV), Mahindra (73 CV) e LS Tractor (84 CV) são de baixa potência, ideais para pequenas propriedades e tarefas leves, como horticultura e pulverizações. Atendem bem à agricultura familiar, com menor custo, consumo reduzido e boa agilidade. Na faixa intermediária (100 a 130 CV), destacam-se Landini (108 CV) e Massey Ferguson (118 CV), recomendados para propriedades médias. São tratores versáteis,



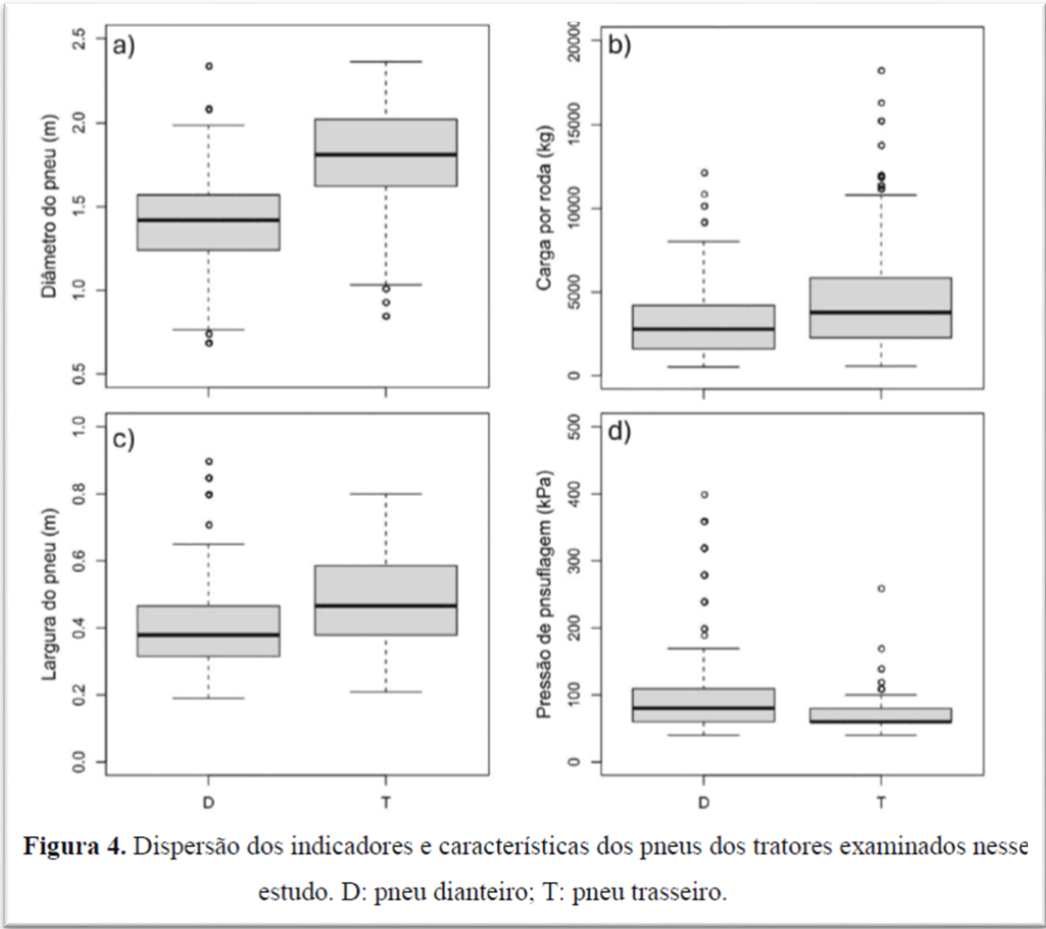
adequados para plantio mecanizado, cultivo e transporte, combinando robustez, economia e confiabilidade.

No segmento de alta potência, destacam-se Valtra (153 CV), New Holland (168 CV), Case IH (173 CV) e John Deere (175,98 CV), com tratores robustos e alta capacidade de tração, indicados para grandes áreas e sistemas mecanizados. A Fendt se sobressai com a maior potência entre as marcas: 380,82 CV. Trata-se de um trator de grande porte, voltado a operações intensivas, como lavouras de grãos e cana-de-açúcar, onde desempenho, precisão e durabilidade são cruciais. É comum em grandes propriedades e empresas que buscam alta eficiência operacional.

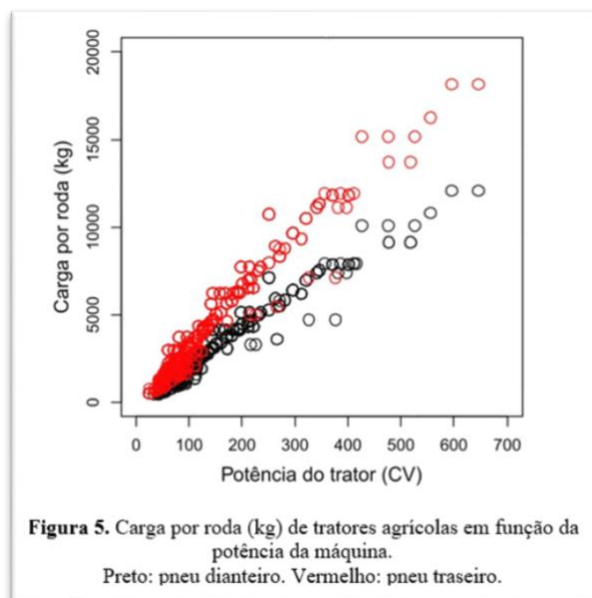
Tabela 1. Estatística descritiva das dimensões e características dos pneus examinados no estudo.

Pneu	Estatística	PI (kPa)	CR (kg)	LP (m)	DP (m)
Dianteiro	Máximo	400,0	3039,000	0,900	2,338
	Mínimo	40,0	132,000	0,190	0,686
	Média	101,8	762,509	0,403	1,370
Traseiro	Máximo	260,0	6900,000	0,800	2,362
	Mínimo	40,0	285,600	0,211	0,849
	Média	67,3	1829,223	0,505	1,771

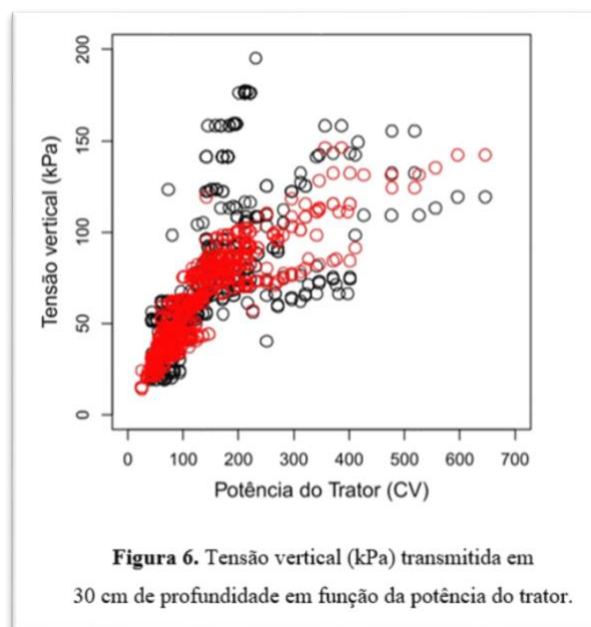
PI: pressão de insuflagem; CR: carga por roda; LP: largura do pneu; DP: diâmetro do pneu.



O boxplot (Figura 4a) mostra que os pneus traseiros (T) têm valores médios e mediana maiores ($\approx 1,81$) em comparação aos dianteiros (D), cuja mediana é 1,42. A dispersão dos traseiros também é maior, com amplitude mais ampla, enquanto os dianteiros apresentam distribuição mais concentrada e menor variabilidade, coerente com sua função de direção e suporte leve. Já o boxplot da carga por roda (Figura 4b) revela que os pneus traseiros suportam cargas significativamente maiores, com mediana de 3780 kg contra 2800 kg nos dianteiros. Além disso, os traseiros apresentam maior variabilidade, chegando a valores acima de 18.000 kg, indicando esforço extremo sobre o solo, enquanto os dianteiros mantêm cargas menores e distribuição mais estável, compatíveis com sua função.



O boxplot da largura dos pneus mostra que os traseiros (T) são mais largos, com mediana de 0,47 m, enquanto os dianteiros (D) têm mediana de 0,38 m. Os traseiros também apresentam maior variabilidade, chegando a 0,80 m, enquanto os dianteiros têm larguras mais concentradas e menores. Quanto à pressão de insuflagem, os pneus dianteiros apresentam mediana de 80 kPa e maior variabilidade (40 a 400 kPa), indicando pressões elevadas em alguns casos. Já os traseiros têm mediana de 60 kPa, distribuição mais concentrada e pressões geralmente mais baixas, refletindo suas diferentes funções e dimensionamento.



A carga por roda do pneu dianteiro aumenta conforme a potência do trator, como evidenciado na Figura 5. À medida que a potência cresce, observa-se uma tendência clara de elevação na carga aplicada ao solo, sendo esse aumento ligeiramente maior para o pneu traseiro. Esse fenômeno reflete o maior esforço do trator, resultando em maior pressão sobre o solo durante o tráfego, o que impacta diretamente na compactação.

De acordo com as simulações, a tensão vertical no solo a 30 cm de profundidade também aumenta com a potência do trator, sem distinção significativa entre pneus dianteiros e traseiros, ambos seguindo a mesma tendência. Essa profundidade corresponde ao limite inferior da camada arável, fundamental para o desenvolvimento das raízes e a retenção de água e nutrientes. A compactação

nessa camada é crítica, pois dificulta a penetração das raízes e reduz a porosidade do solo. Além disso, a descompactação torna-se mais difícil, exigindo maior esforço das máquinas, aumentando o consumo de combustível, os custos operacionais e o impacto ambiental.

Portanto, controlar a carga por roda e a potência do trator é essencial para preservar a estrutura do solo e otimizar a eficiência do manejo agrícola. A prevenção da compactação nessa camada é um aspecto chave para garantir a sustentabilidade da produção.

CONCLUSÕES:

A carga por roda e a potência do trator estão diretamente relacionadas, induzindo transmissão de tensões por tratores agrícolas. O aumento da potência eleva a carga, e por consequência, a tensão vertical na camada de 30 cm, com valores que chegam até 407 kPa, o que pode dificultar a descompactação, aumentando o consumo de combustível. Esses fatores indicam a importância de ajustar adequadamente a potência e o manejo para minimizar danos ao solo. Assim, a otimização desses parâmetros contribui para a preservação da estrutura do solo e a sustentabilidade das operações agrícolas.

BIBLIOGRAFIA

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121–145, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and physical properties of soils. **Soil & Tillage Research**, v. 73, p. 89–99, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00102-8](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00102-8).

KELLER, T. et al. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. **Soil & Tillage Research**, v. 93, n. 2, p. 391–411, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.012>.

KELLER, T. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. **Soil & Tillage Research**, v. 73, n. 1–2, p. 145–160, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00107-7).

LIMA, R. P.; SILVA, A. R. da; SILVA, Á. P. da. soilphysics: an R package for simulation of soil compaction induced by agricultural field traffic. **Soil & Tillage Research**, v. 206, p. 104824, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104824>.

LOZANO, N. et al. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. **Soil & Tillage Research**, v. 129, p. 61–68, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.01.010>.

SÖHNE, W. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik*, v. 5, p. 49–63, 1953.

STETTLER, M. et al. Terranimo® – a web-based tool for evaluating soil compaction. **Landtechnik**, v. 69, p. 132–137, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1515/LT.2014.181>.