Estudo e simulação das interações envolvendo o solo e o pneu de um pulverizador autopropelido

Palavras-Chave: Mecânica dos solos, Eficiência de tração, Pulverizador.

Autores(as):

Raphael Augusto Couto Boava, UNICAMP - FEAGRI

Livre Docente. Dr. Angel Pontin Garcia (orientador), UNICAMP - FEAGRI

INTRODUÇÃO:

De acordo com a última projeção da ONU, a população estimada para 2050 é de 9,7 bilhões de pessoas, chegando a 10,4 bilhões no final do século, levando a necessidade de uma maior produção alimentícia de maneira sustentável. Para isso, dentro da zona agrícola, as produções atuais devem buscar maior produtividade protegendo o meio ambiente e consumindo menos energia (Sunusi *et al.,*2020). O controle da energia perdida durante os processos agrícolas pode ser mensurado com a patinagem das rodas a uma faixa ótima, onde a perturbação do solo e os consumos energético são mais baixos (Kachroo & Tomizuka, 1994; Zoz, 1972). Porém, este controle não é tão simples ao observarmos a área de operação, visto que existem diversas variáveis tais como: relevo, tipo de solo, umidade do solo, peso dinâmico da máquina, podendo retirar esta patinagem de sua faixa ideal (Čiplienė, 2019).

Este fator altera diretamente a tração requerida, a qual é definida como uma das variáveis fundamentais para que ocorra uma operação eficiente de veículos agrícolas (Zoz *et al.,* 2003), sendo que a pressão do pneu, o tipo de rodado, o peso dinâmico e a patinagem afetam diretamente na eficiência da tração do equipamento (Osinenko *et al.,* 2015). Estes ajustes variam pelo lastreamento do pneu e da escolha correta do mesmo de acordo com o tipo de solo presente na atividade. Definir corretamente a tração necessária para a máquina é um dos elementos primordiais para o projeto de qualquer máquina agrícola (Wismer & Luth, 1973), onde a eficiência está sendo descrita pela interação entre o solo e o pneu, área que necessita de muitos estudos, visto a alta complexidade do solo (Catalán *et al.,* 2008; Schreiber, 2006).

O presente estudo tem como objetivo desenvolver um modelo capaz de determinar a faixa operacional mais adequada para um pulverizador autopropelido, considerando a interação entre o solo e os pneus durante o deslocamento. Para isso, será utilizado um modelo teórico de interação solo-pneu baseado na literatura, o qual será alimentado com dados reais obtidos da máquina utilizada e, posteriormente, simulado para buscar a aproximação dos resultados às condições reais de campo, permitindo avaliar o desempenho e a eficiência operacional em função dos parâmetros adotados.

METODOLOGIA:

O desenvolvimento desta pesquisa foi conduzido no Laboratório de Instrumentação e Controle (LIC) da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), localizado nas coordenadas geográficas 22°49'7"S e 47°3'36"O. A metodologia adotada baseou-se em estudos prévios disponíveis na literatura, tendo como referência principal o modelo proposto por Ding *et al.* (2014), que permite estimar fatores relevantes para a análise do desempenho da interação solo-pneu em máquinas. O modelo considera a variação de parâmetros como o ângulo de entrada do pneu no solo e a patinagem, possibilitando descrever o comportamento de variáveis fundamentais, tais como o torque de acionamento do pulverizador (MDR), a tensão normal (σ) e a tensão de cisalhamento (τ).

O presente estudo empregou modelos clássicos de interação solo-pneu, notadamente o de Wong & Reece (1967), ilustrado na Figura 1, e o modelo de Bekker, para representar matematicamente o comportamento das tensões normais e de cisalhamento em função dos parâmetros da roda e do solo. A metodologia seguiu as formulações e procedimentos de simulação descritos pelos autores originais, utilizando o software GNU Octave, versão 9.3.0, para reproduzir os resultados e comparar o comportamento gráfico obtido nas simulações com aqueles apresentados no estudo de referência.

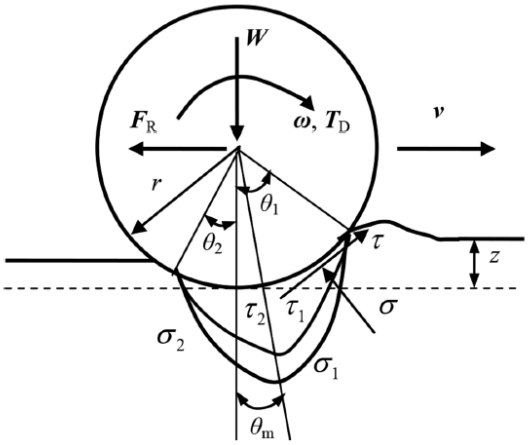

Figura 1: Modelo de interação solo-pneu (Wong & Reece, 1967). – Fonte: Ding et al. 2019.

Em seguida, foram incorporados ao modelo os dados específicos do solo e dos pneus utilizados pelo pulverizador objeto desta pesquisa. Os valores de cada variável foram definidos com base em informações da literatura e em dados obtidos para o solo da área experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, sendo os parâmetros do solo determinados conforme metodologia da EMBRAPA. Para caracterizar o equipamento, adotou-se como referência o pulverizador autopropelido TATU Marchesan, modelo Kontrol 2000M, cujas especificações do pneu e características construtivas estão apresentadas nas Figuras 2 e 3.

Figura 2: Demonstração do maquinário utilizado. Fonte: Tatu Marchesan.

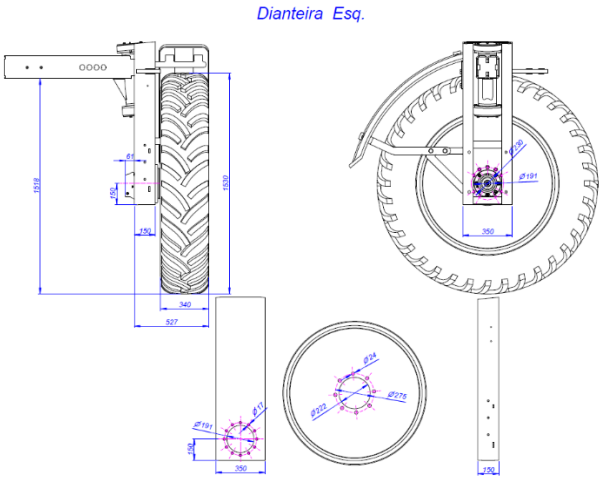

Figura 3: Modelo do pneu utilizado pelo autopropelido. Fonte: Tatu Marchesan.

Com a definição dos valores das variáveis referentes ao solo e ao pneu do trator e após a validação do modelo em relação ao estudo de referência, procedeu-se à simulação das principais variáveis associadas ao desempenho do pulverizador autopropelido. Essa etapa permitiu representar, de forma gráfica, o comportamento dessas variáveis em função do ângulo de entrada da roda no solo e da patinagem, possibilitando avaliar de maneira detalhada a interação solo–pneu e subsidiando a identificação da faixa de operação mais eficiente para o equipamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Para viabilizar a comparação entre os resultados obtidos no estudo de referência e aqueles gerados pelo código implementado no GNU Octave, foram definidos os valores de cada variável utilizada nas equações do modelo, organizados de forma sistemática. A seleção desses valores teve como base as informações apresentadas no próprio estudo (Ding *et al.,* 2014), garantindo a consistência e a comparabilidade dos resultados.

PARÂMETROS DO SOLO		
Símbolo	**Nome e Unidade**	**Valor adotado**
c	Coesão do solo (kPa)	0,25
kc	Módulo coesivo do solo (kPa/mn^{-1})	15,6
kϕ	Módulo de fricção do solo (kPa/mn)	2407,4
n	Exponente de afundamento do solo no modelo de Bekker	1,1
ϕ	Ângulo de fricção interna do solo (graus)	31,9
c1	Coeficiente do ângulos de interação pneu-solo	0,38
c2	Coeficiente do ângulos de interação pneu-solo	0,41
c3	Coeficiente do ângulos de interação pneu-solo	0
PARÂMETROS DO PNEU		
Parâmetro	**Descrição**	**Valor adotado**
b	Largura da roda (m)	0,165
h	Altura das garras (m)	0,015
nL	Número de garras	24
r	Raio da roda (m)	0,135
PARÂMETROS MECÂNICOS		
Parâmetro	**Descrição**	**Valor adotado**
z	Afundamento da roda	19
W	Carga vertical (N)	80

Figura 4: Variáveis utilizadas para a simulação no Octave
Fonte : De autoria própria.

Com esses parâmetros estabelecidos, procedeu-se à simulação e à comparação gráfica das distribuições de tensão de cisalhamento (τ), tensão normal (σ) e deslocamento do solo (j), considerando as mesmas condições aplicadas no estudo original para um pneu liso. Os resultados obtidos foram confrontados com aqueles reportados no artigo de referência, possibilitando avaliar a aderência do modelo implementado às previsões teóricas. Os valores adotados para a simulação estão apresentados na Figura 4. Importante frisar que a taxa de patinagem do pneu no solo não está presente nas variáveis pois foi realizada uma variação da mesma de 0 a 0.6, com uma variação de 0.1 para cada curva, gerando 6 curvas de cisalhamento, tensão normal e de deformação do solo.

A comparação dos resultados é apresentada na Figura 5, que contrapõe os gráficos obtidos na simulação com aqueles reportados pelo artigo. De modo geral, as tendências de comportamento foram preservadas. Tanto para a tensão normal (σ) quanto para a tensão de cisalhamento (τ) e a deformação do solo (j), a variação em função do ângulo de entrada (θ) apresentou forma semelhante à do estudo de referência, com máximos localizados em regiões correspondentes e redução progressiva até valores próximos de zero ao final da área de contato. Apesar dessa concordância quanto ao padrão de variação, observou-se discrepância significativa na magnitude das tensões obtidas pelo modelo implementado no GNU Octave. Essa diferença foi atribuída a inconsistências da otimização do ângulo de entrada no código, sendo necessários ajustes e correções nesses parâmetros, os quais estão previstos para a

versão final deste estudo, de forma a garantir maior aderência quantitativa às previsões do modelo de referência.

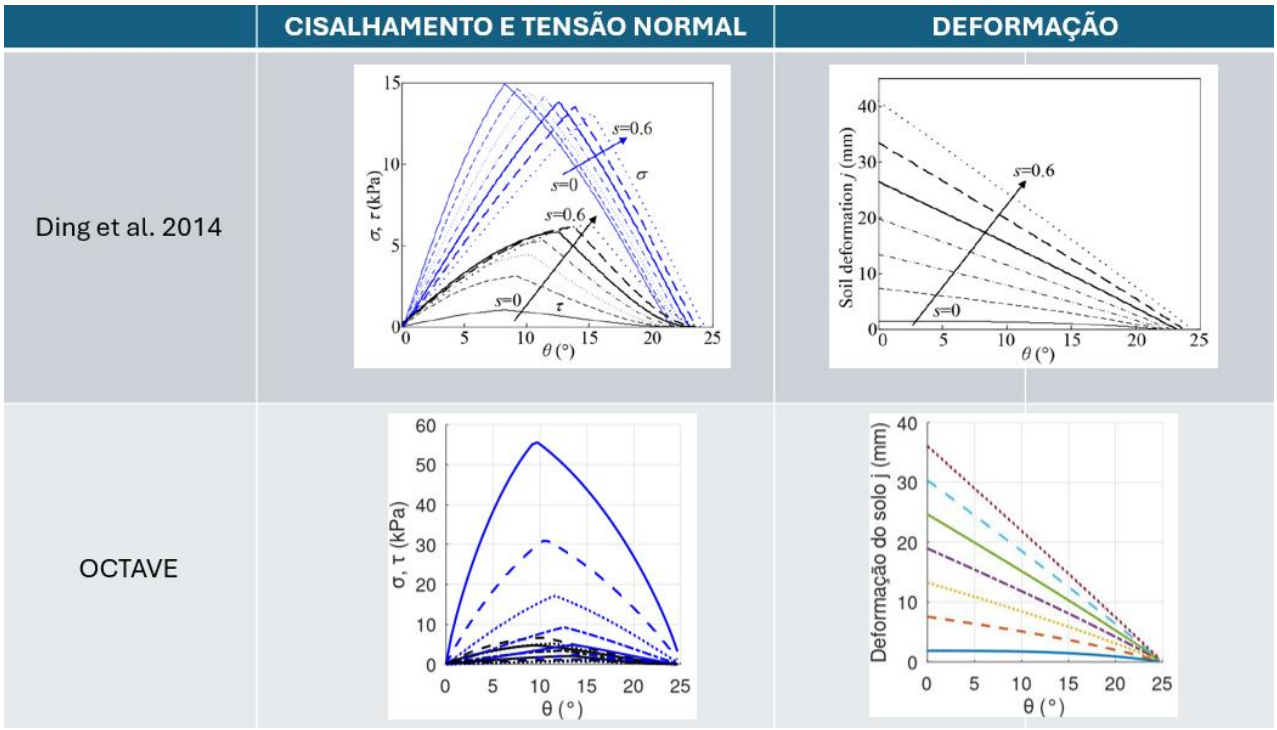

Figura 5: Comparação gráfica dos resultados obtidos pelo artigo (Ding et al 2014) e pela simulação. Fonte – De autoria própria.

Após esta simulação, foram alterados os parâmetros do solo e do veículo utilizando os dados reais do experimento, sendo este um latossolo vermelho e o maquinário de modelo especificado anteriormente. Assim, podemos analisar o comportamento gráfico das tensões e a análise do resultado em função do ângulo de entrada e da taxa de patinagem do pneu na Figura 6, o que apresenta um aumento significativo no valor das tensões e da deformação do solo. Isso se deve pela carga no rodado extremamente superior em relação a mesma adotada pelo artigo, sendo a força no pneu do pulverizador cerca de 1400 vezes maior que a do protótipo lunar analisado no estudo de Ding *et al.* (2014).

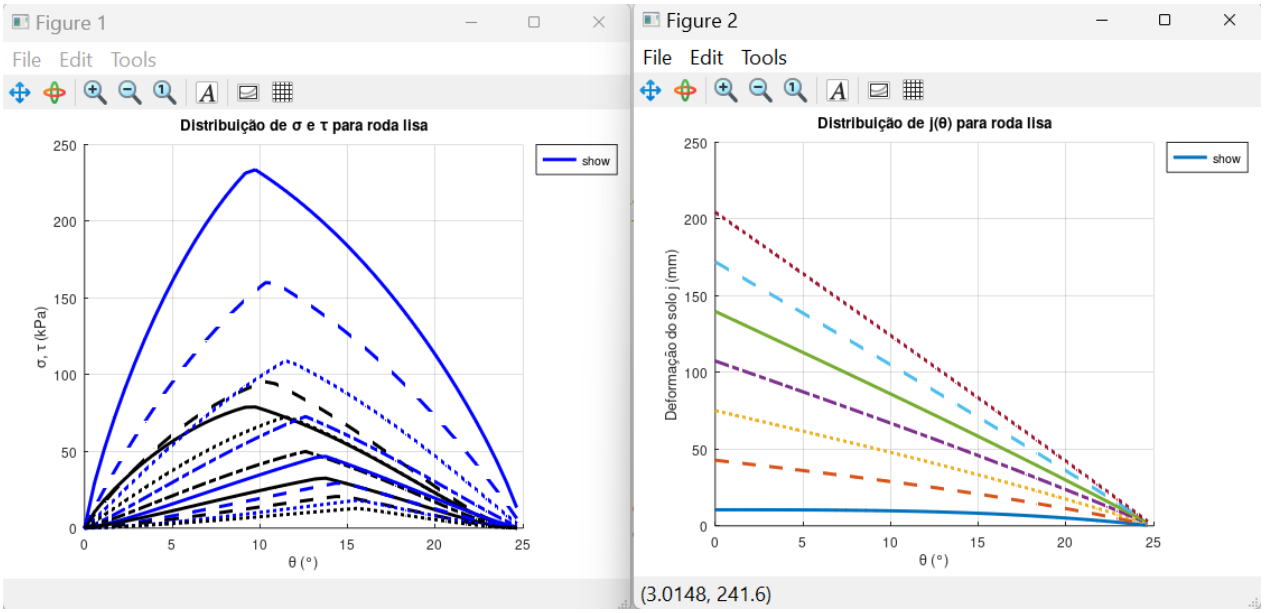

Figura 6: Distribuição das tensões em função do ângulo de entrada e da taxa de patinagem para os dados de experimento.

Por fim, foi elaborado um gráfico que apresenta a análise das forças atuantes sobre o pneu durante o deslocamento. As componentes avaliadas foram: a força normal (FN), resultante da reação do solo ao contato da roda; a força de tração (FDP), correspondente à componente tangencial responsável pelo avanço do veículo, caracterizando-se como a força efetivamente útil; e o torque de resistência ao rolamento (MDR), diretamente relacionado ao consumo energético da máquina, uma vez que deve ser superado para possibilitar o movimento da roda. A Figura 7 apresenta o comportamento de cada uma dessas grandezas em função do aumento da taxa de patinagem do pneu sobre o solo, evidenciando a variação das forças e do torque resistivo conforme o deslizamento se intensifica.

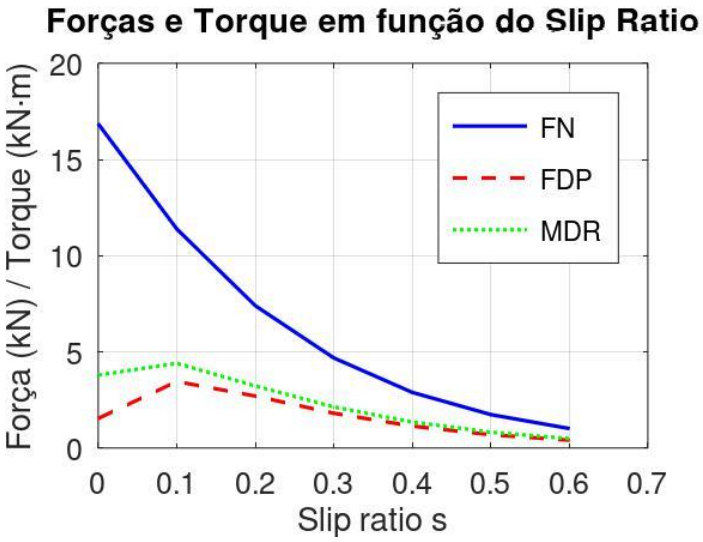

Figura 7: Análise das forças exercidas pelo pneu do pulverizador no solo.

CONCLUSÕES:

Com base nos resultados obtidos, é possível identificar a faixa de operação de patinagem mais adequada para o pulverizador agrícola, onde, após alguns ajustes, a mesma será definida com maior refino ao final desta pesquisa. Essa análise permite estimar a condição de trabalho que maximiza a eficiência energética da máquina, minimizando perdas por patinagem excessiva e reduzindo o consumo de combustível. Além de favorecer o desempenho operacional do equipamento, tal prática contribui para uma maior sustentabilidade do processo produtivo, ao reduzir o impacto energético e mecânico sobre o solo.

BIBLIOGRAFIA

CATALÁN, Heliodoro, Linares, Pilar, Méndez, Valeriano. Tractor_PT: a traction prediction software for agricultural tractors**. Comput. Electron. Agric**, V.60 (2), P.289–295, 2008.

ČIPLIENĖ, A., Gurevičius, P., Janulevičius, A., Damanauskas, V. Experimental validation of tyre inflation pressure model to reduce fuel consumption during soil tillage. **Biosystems Engineering,** v.186, p.45–59., 2019.

DING, Liang; DENG, Zongquan; GAO, Haibo; *et al*. Interaction mechanics model for rigid driving wheels of planetary rovers moving on sandy terrain with consideration of multiple physical effects. **Journal of Field Robotics,** v. 32, n. 6, p. 827–859, 2014.

KACHROO, Pushkin & TOMIZUKA, Masayoshi. **Vehicle Traction Control And its Applications.** Institute of Transportation Studies, Research Reports, Working Papers, Proceedings qt6293p1rh, Institute of Transportation Studies, UC Berkeley, 1994.

OSINENKO, P.V., Geissler, M., Herlitzius, T. A method of optimal traction control for farm tractors with feedback of drive torque. **Biosystem Engineering**. V.129, P.20–33, 2015.

SCHREIBER, M**. Kraftstoffverbrauch beim Einsatz von Ackerschleppern im besonderen Hinblick auf CO2-Emissionen.** Doctor Doctor thesis. University of Hohenheim, 2006.

SUNISI I. I., *et al.* Intelligent tractors: Review of online traction control process. **Computers and Electronics in Agriculture**, Volume 170, 105176, ISSN 0168-1699, 2020.

ZOZ, F.M., 1972. Predicting tractor field performance**. Transactions of the ASAE,** V.15 (2), 249–255, 1972.