

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” – UNESP
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

DESEMPENHO OPERACIONAL DE TRATORES 4X2 TDA, CLASSE II, EQUIPADOS COM PNEUS-
ESTEIRAS E DIAGONAIS SOB DIFERENTES PRESSÕES DE INFLAÇÃO

Edward Victor Aleixo
Engenheiro Agrônomo

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” – UNESP
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

DESEMPENHO OPERACIONAL DE TRATORES 4X2 TDA, CLASSE II, EQUIPADOS COM PNEUS-
ESTEIRAS E DIAGONAIS SOB DIFERENTES PRESSÕES DE INFLAÇÃO

Edward Victor Aleixo
Orientador: Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Afonso Lopes

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

A366d

Aleixo, Edward Victor

Desempenho operacional de tratores 4x2 TDA, classe II, equipados com pneus-esteiras e diagonais sob diferentes pressões de inflação / Edward Victor Aleixo. -- Jaboticabal, 2025

66 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Rouverson Pereira Da Silva

Coorientador: Afonso Lopes

1. Pneumático agrícola. 2. Eficiência operacional. 3. Tração. 4. Área de contato. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA TESE: DESEMPENHO OPERACIONAL DE TRATORES 4X2 TDA, CLASSE II, EQUIPADOS COM PNEUS-ESTEIRAS E DIAGONAIS SOB DIFERENTES PRESSÕES DE INFLAÇÃO

AUTOR: EDWARD VICTOR ALEIXO

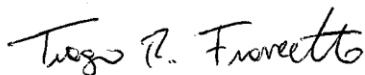
ORIENTADOR: ROVERSON PEREIRA DA SILVA

COORIENTADOR: AFONSO LOPES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ROVERSON PEREIRA DA SILVA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal



Prof. Dr. TIAGO RODRIGO FRANCETTO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Agrícola / Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Cachoeira do Sul/RS



Dr. DIEGO ONOFRE VIDAL (Participação Presencial)
Hidrautec Equipamentos para Cultura de Árvores Frutíferas / Américo Brasiliense/SP



Prof. Dr. DANILO CÉSAR CHECCHIO GRONTA (Participação Presencial)
Centro Universitário Fundação Educacional Barretos / UNIFEB - Barretos/SP



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



Ana Lúcia P. Botelho

Profa. Dra. ANA LUCIA PASCHOA BOTELHO (Participação Presencial)
CTA - Colégio Técnico Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 24 de janeiro de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Edward Victor Aleixo nasceu no dia 14 de abril de 1988 na cidade de Assis Chateaubriand, no estado do Paraná, filho de Edward Aleixo e Ivani Ferracini Aleixo. No ano de 2005 concluiu o Ensino Médio no Colégio Estadual Chateaubriandense, na cidade de Assis Chateaubriand-PR. Iniciando no ano de 2007, o Curso de Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Submeteu-se e, foi aprovado na defesa do Trabalho de Conclusão do Curso em julho de 2012. Em 2013, graduou-se Engenheiro Agrônomo pela UEM, iniciando neste mesmo ano, o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Energia na Agricultura pela Faculdade de Ciências Agrônômicas – FCA/UNESP Câmpus de Botucatu – SP, ainda em 2013 ingressou como Engenheiro de Campo na empresa Trelleborg Wheel Systems. O título de Mestre, foi obtido no dia 15 de agosto de 2015. Em 2019 ingressou no curso de Extensão Universitária na Modalidade de Especialização: Master Business Administration MBA em Agronegócios pela Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” concluindo o curso em 04 de agosto de 2021. Iniciou na função de Coordenador Comercial de Contas Chaves na empresa AGCO no ano de 2021. No ano de 2022 ingressou no curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV/UNESP Câmpus de Jaboticabal sendo membro do grupo de pesquisa Rouverson Silva Research Group (RSRG).

À minha amada filha Lorena Victória Cruz Aleixo, a quem tenho o maior amor desse mundo. Depois que veio ao mundo, você é a minha principal razão para viver e encarar os encontros da vida.

À minha amada esposa Amanda Sarita Cruz Aleixo por sempre me apoiar e incentivar nos momentos mais difíceis da minha carreira profissional e nas batalhas da vida. Te agradecer por ter renunciado aos seus sonhos e vontades para estar sempre ao meu lado. Meu eterno amor.

Aos meus pais Edward Aleixo e Ivani Ferracini Aleixo por todos os ensinamentos, amor, carinho e dedicação. Nos momentos alegres e difíceis da minha vida, vocês sempre estiveram ao meu lado me apoiando e dando força.

Ao meu amado afilhado Miguel Aleixo Lazaro a quem tenho muito amor e carinho.

À minha irmã Talita Maria Ferracini Aleixo por ter sempre me ajudado, confortado nos momentos difíceis e por todo carinho e amizade.

Ao meu sobrinho Rafael Aleixo Lazaro a quem tenho muito amor e carinho.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora Aparecida por conceber o dom da vida e por sempre abençoar e iluminar minha trajetória com muita saúde e sabedoria.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva por todos os ensinamentos, ter confiado e acreditado no meu potencial. Sempre serei muito grato ao senhor.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Afonso Lopes pela coorientação e todas as pertinentes contribuições para o desenvolvimento do trabalho.

À Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Câmpus de Jaboticabal e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo).

Aos colegas do RSRG Armando Lopes de Brito Filho, João De Deus Godinho Júnior, João Pedro Branco, que apoiaram e estavam sempre de prontidão, ajuda deles foi fundamental para realização dos ensaios e coleta dos dados.

A todos os colaboradores do departamento de Engenharia, e ao Davi Aparecido Trevizolli, por toda ajuda e ao senhor Valdecir Aparício (Maranhão) por todo suporte, dedicação, prontidão e apoio durante a coleta dos dados.

Aos senhores Jose Eugênio de Queiroz e Igor de Queiroz do sítio Glória por todo apoio e disponibilidade durante os ensaios realizados na sua propriedade.

Aos senhores Elidio César Miralha especialista técnico de pneus da Trelleborg e José Carlos De Oliveira diretor geral da Trelleborg por ter concedido os pneus-esteiras e por todo apoio técnico e logístico para a realização dos ensaios.

Aos senhores Everton Alonso diretor marketing de produtos Massey Ferguson e Lucas Zanetti gerente marketing de produtos Massey Ferguson por todo apoio, incentivo e empréstimo do trator para a realização do trabalho.

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Pneus agrícolas.....	17
2.2 Relação cinemática.....	22
2.3 Avanço Cinemático	23
2.4 Consumo de combustível	24
2.5 Índice de patinagem.....	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1 Desempenho operacional em operações na cultura do café	26
3.1.1 Localização da área e equipamentos utilizados	26
3.1.2 Relação massa/potência.....	30
3.1.3 Avanço e relação cinemáticos	31
3.1.4 Área de contato dos pneus	32
3.1.5 Raio e espaço de giro	32
3.1.6 Índice de patinagem.....	34
3.1.7 Consumo de combustível	34
3.1.8 Delineamento experimental.....	35
3.2 Experimentos realizados em 2023 e 2024.....	35
3.2.1 Experimento realizado em 2023: avaliação de pressões de inflação dos pneus	37
3.2.1.1 Relação massa – potência.....	40
3.2.1.2 Determinação do avanço e relação cinemáticos	41
3.2.1.3 Análise dos dados.....	42
3.2.2 Experimento em 2024: Desempenho operacional em operações de preparo do solo.....	42
3.2.2.1 Patinagem dos rodados	43
3.2.2.2 Consumo de combustível	43
3.2.2.2 Análise dos resultados.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1 Desempenho operacional em operações na cultura do café	44
4.1.1 Avanço cinemático	44
4.1.2 Área de contato dos pneus	46
4.1.3 Raio e espaço de giro	48
4.1.4 Patinagem dos rodados	49
4.1.5 Consumo de combustível	50

4.2 Experimentos realizados em 2023 e 2024.....	55
4.2.1 Avanço cinemático de acordo com a variação de pressão	55
4.3 Índice de patinação em operações de preparo do solo.....	60
4.4 Consumo de combustível	62
6 CONCLUSÃO	64
7 REFERÊNCIAS.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificações técnicas do trator utilizado.....	27
Tabela 2. Especificações técnicas dos pneus utilizados.....	29
Tabela 3. Pressões utilizadas para cada tipo de pneus.....	30
Tabela 4. Parâmetros ambientais antes das aquisições de dados para cada operação	30
Tabela 5. Massa total, distribuição de massa entre os eixos e relação massa/potência para os pneus-esteiras.....	31
Tabela 6. Classificação da simetria do raio de giro.....	33
Tabela 7. Especificações técnicas do trator utilizados na determinação do avanço cinemático.....	36
Tabela 8. Combinações de pressões (kPa) utilizadas no Pneu-esteira.....	38
Tabela 9. Combinações de pressões (kPa) utilizadas no diagonal.....	39
Tabela 10. Relação entre as pressões dos pneus traseiros e dianteiros, para os pneus-esteiras e diagonais.....	39
Tabela 11. Massa total, distribuição de massa entre os eixos e relação massa/potência para os pneus-esteiras.....	41
Tabela 12. Relação cinemática média dos pneus-esteiras e pneus diagonais.....	39
Tabela 13. Índice do avanço cinemático dos pneus utilizados, em cada configuração de nível de pressão.....	45
Tabela 14. Raio de giro médio para o trator equipados com três tipos de pneus.....	48
Tabela 15. Valores e classificação quanto à qualidade do índice de simetria do raio de giro para o trator equipados com três tipos de pneus.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura interna dos pneus diagonais.Fonte Nokian Tires (2023).....	18
Figura 2. Estrutura interna dos pneus diagonais cinturados.Fonte: Nokian Tires (2023).....	18
Figura 3. Posicionamento das lonas nos pneus radiais.Fonte: Nokian Tires (2023).....	18
Figura 4. Estruturas dos pneus agrícolas.Fonte: Michelin (2022).....	19
Figura 5. Geometria de garras presentes nos pneus agrícolas.Fonte:Firestone (2023).....	20
Figura 6. Informações técnicas estampadas nas laterais dos pneus, Fonte: Mitas (2023).....	20
Figura 7. Dimensão dos pneus radiais (a) e diagonais (b). Fonte: Mitas (2024).....	21
Figura 8. Estrutura do Pneu-esteira. Fonte: Galileo Cup Wheel (2024).....	22
Figura 9. Eixo de ligação da caixa de transmissão ao eixo dianteiro.Fonte: AGCO (2024).....	22
Figura 10. Vista inferior do eixo que transmite o torque da caixa de transmissão até o eixo dianteiro. Fonte: AGCO (2024).....	23
Figura 11. Trator 4x2 TDA Valtra, modelo A850-F. Fonte: Autor (2022).....	27
Figura 12. Trator Valtra equipado com: a) pneus-esteiras b) pneus diagonais. Fonte: Autor (2022).....	28
Figura 13.Equipamentos utilizados: a) escarificador; b) pulverizador. Fonte: Autor (2022).....	28
Figura 14. Aferição da massa do eixo dianteiro do trator equipado com pneus diagonais. Fonte: Autor (2022).....	31
Figura 15. Avançômetro localizado na roda dianteira esquerda do trator. Fonte: Autor (2022).....	32
Figura 16. Avaliação do raio de giro. Fonte: Autor (2022).....	33
Figura 17. Trator equipado com fluxômetro. Fonte: Autor (2022).....	34
Figura 18.Trator Massey Ferguson 3407 utilizado na determinação do avanço cinemático. Fonte: Autor (2024).....	36
Figura 19. Modelos de pneus utilizados no experimento: a) pneu-esteira; b) pneu diagonal. Fonte: Autor (2023).....	37
Figura 20. Aferição da massa do trator quando equipado com os pneus-esteira. Fonte: Autor (2023).....	40
Figura 21. Avançômetro. Fonte: Autor (2023).....	41
Figura 22. Área de contato (m^2) dos pneus dianteiros e traseiros para os três tipos de pneus avaliados.....	47
Figura 23. Patinagem dos rodados traseiros nas operações de escarificação e pulverização.....	50
Figura 24. Consumo de combustível na operação de escarificação para o trator equipado com três níveis de pressão de inflação dos pneus: a) diagonais recauchutados; b) pneus-esteiras; c)	

diagonais novos. LSC: limite superior de controle, LIC: limite inferior de controle, x: média dos valores individuais.....	52
Figura 25. Consumo de combustível na operação de pulverização para o trator equipado com três níveis de pressão de inflação dos pneus: a) diagonais recauchutados; b) pneus-esteiras; c) diagonais novos.	54
Figura 26. Valores do avanço cinemático para distintas relações de pressões entre os pneus dianteiros e traseiros do pneu-esteira, para pressão constante no pneu traseiro: a) 159 kPa; b) 138 kPa; c) 117 kPa; d) 97 kPa; e) 83 kPa; f) 62 kPa; g) 41 kPa.	57
Figura 27. Valores do avanço cinemático nas combinações de pressões (kPa) dos pneus-esteiras dianteiros e traseiros.....	58
Figura 28. Regressão linear para o avanço cinemático nas pressões (kPa) nos pneus-esteiras dianteiros e traseiros.....	58
Figura 29. Valores do avanço cinemático nas combinações de pressões (kPa) nos pneus diagonais dianteiros e traseiros.....	59
Figura 30. Regressão linear para o avanço cinemático nas pressões (kPa) nos pneus diagonais dianteiros e traseiros.....	60
Figura 33. Carta de controle de valores individuais para a patinagem dos rodados do trator utilizando pneus-esteiras nas operações de preparo do solo escarificação, aração e gradagem. LSC: limite superior de controle, LIC: limite inferior de controle, x: média dos valores individuais.....	61
Figura 34. Carta de controle de valores individuais para a patinagem dos rodados do trator utilizando pneus diagonais. LSC: limite superior de controle, LIC: limite inferior de controle, x: média dos valores individuais.....	62
Figura 35. Carta de controle de valores individuais para o consumo de combustível do trator utilizando pneus-esteiras. LSC: limite superior de controle, LIC: limite inferior de controle, x: média dos valores individuais.....	63
Figura 36. Carta de controle de valores individuais para o consumo de combustível do trator utilizando pneus diagonais. LSC: limite superior de controle, LIC: limite inferior de controle, x: média dos valores individuais.....	64

DESEMPENHO OPERACIONAL DE TRATORES 4X2 TDA, CLASSE II, EQUIPADOS COM PNEUS-ESTEIRAS E DIAGONAIS SOB DIFERENTES PRESSÕES DE INFLAÇÃO

RESUMO: As operações mecanizadas têm como principal objetivo entregar agilidade, eficiência e qualidade nas tarefas diárias de uma propriedade rural. As máquinas que realizam essas tarefas devem estar reguladas e preparadas para que as operações sejam realizadas com alta produtividade. O escopo do presente trabalho foi determinar parâmetros de desempenho operacional de dois tratores 4x2 TDA compactos com potência máxima de 58 kW. No ano de 2022 foram avaliados o avanço e a relação cinemática entre os eixos, raio de giro, consumo de combustível e patinação dos pneus, nas operações de preparo solo e pulverização. O trator Valtra foi equipado com pneus diagonais novos, recauchutados e pneus-esteiras e os implementos utilizados foram escarificador e pulverizador. No experimento realizado nos anos de 2023 e 2024 foi utilizado o trator Massey Ferguson equipado com pneus diagonais novos e pneus-esteiras, foi avaliada a relação e avanço cinemático e posteriormente foram realizados ensaios de campo com os implementos: escarificador, grade intermediária e arado de discos. Nos pneus foram aplicadas combinações de pressões respeitando o índice de carga de cada modelo. Os ensaios de preparo de solo e pulverização foram realizados em uma propriedade destinada a produção de café no município de São José da Bela Vista/SP, e os ensaios de preparo do solo, avanço e relação cinemática nas áreas experimentais da FCAV/UNESP Jaboticabal/SP. Os pneus-esteiras apresentaram menor consumo de combustível e índice de patinação nas operações de preparo solo e pulverização. Apenas uma combinação de pressão de inflação do pneu-esteira apresentou avanço cinemático ideal. Os valores de avanço dos pneus diagonais ficaram acima de 5%. A relação cinemática de todos os modelos de pneus variam de 1,50% a 1,60%. O raio de giro e área de contato apresentaram maiores valores para os pneus-esteiras.

Palavras-chaves: Pneumático agrícola, eficiência operacional, tração, área de contato.

OPERATIONAL PERFORMANCE OF 4X2 FWDA CLASS II TRACTORS EQUIPPED WITH TRACK-TREAD AND DIAGONAL TIRES UNDER DIFFERENT INFLATION PRESSURES

ABSTRACT: The main objective of mechanized operations is to deliver agility, efficiency, and quality to the daily tasks of rural property. The machines that perform these tasks must be regulated and prepared so that the operations are carried out with high productivity. The scope of this paper was to determine the operational performance parameters of two compact 4x2 FWDA tractors with a maximum power of 58 kW. In 2022, the lead and kinematic ratio between the axles, turning radius, fuel consumption, and tire slip were evaluated in soil preparation and spraying operations. The Valtra tractor was equipped with new, retreaded, and track tires, and the implements used were a scarifier and sprayer. In the experiment carried out in 2023 and 2024, the Massey Ferguson tractor equipped with new bias tires and track tires was used. The ratio and kinematic lead were evaluated, and field tests were subsequently carried out with the implements: a scarifier, intermediate harrow, and disc plow were attached to it. Tires were subjected to pressure combinations respecting the load index of each model. Soil preparation and spraying tests were carried out on a property intended for coffee production in the municipality of São José da Bela Vista/SP, and soil preparation, lead and kinematic ratio tests were carried out in the experimental areas of FCAV/UNESP Jaboticabal/SP, Brazil. Tracked tires presented lower fuel consumption and slippage index in soil preparation and spraying operations. Only one combination of inflation pressure of the tracked tire presented ideal kinematic lead. The lead values of the bias tires were above 5%. The kinematic ratio of all tire models ranged from 1.50% to 1.60%. The turning radius and contact area presented higher values for the tracked tires.

Keywords: Agricultural tires, operational efficiency, traction, footprint area.

1 INTRODUÇÃO

A produtividade agrícola e a eficiência das operações mecanizadas podem ser maximizadas utilizando máquinas sofisticadas e tecnológicas. Ao longo do tempo, os tratores estão tornando-se cada vez mais potentes e pesados, para que possam ser geradas forças de tração mais elevadas. No entanto, algumas culturas agrícolas ainda utilizam tratores de menor porte, porém, com recursos tecnológicos cada vez maiores, e que necessitam desenvolver adequado esforço de tração. O uso de máquinas com elevada capacidade de produção por hora trabalhada, requer estruturas de maiores dimensões e massa, o que pode acarretar maior intensidade da compactação do solo devido ao tráfego dos seus rodados, sendo uma maneira de mitigar esse efeito a adoção de rodados que minimizem a pressão exercida sobre o solo.

Adoção de boas práticas agronômicas relacionadas à mecanização, que preservem as características físicas do solo, proporciona o uso racional de combustíveis fósseis e menor emissão de gases que prejudicam o meio ambiente. A maioria das pesquisas científicas indicam que cerca de 20 a 55% da potência disponível do trator é perdida durante o processo de interação entre os pneus e a superfície do solo (Regazzi et al., 2019). Assim, as cargas verticais nos rodados e o desempenho dos pneus são parâmetros que desempenham um papel significativo no controle do índice de patinagem, consumo de combustível e no avanço cinemático de um trator 4 x 2 com tração dianteira auxiliar (TDA) (Pentos e Pieczarka, 2017).

Partindo da premissa que os pneus radiais, e dentre o pneu-esteira, pode apresentar melhor desempenho operacional em relação aos pneus diagonais, objetivamos no presente trabalho determinar parâmetros de desempenho operacional de tratores 4x2 TDA, de classe II, equipado com pneus-esteiras, esse novo conceito construtivo de pneu agrícola não havia sido avaliado em tratores na América do Sul e nem comparado com pneus diagonais novos e diagonais recauchutados. Os parâmetros avaliados dos tratores com os pneus-esteiras foram o avanço e a relação cinemática, raio de giro, consumo de combustível e patinagem dos pneus, em três experimentos combinando diferentes pressões de inflação dos pneus dianteiros e traseiros, dentro das faixas estabelecidas nas recomendações descritas nos manuais dos fabricantes dos pneus, bem como em operações agrícolas mecanizadas de preparo do solo e na cultura do café.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pneus agrícolas

Os tratores até o ano de 1932 eram equipados com rodas confeccionadas de ferro, as quais proporcionavam elevada vibração, baixo conforto operacional e alto consumo de combustível. A partir de 1932 a fabricante de pneus Firestone começou a produzir os primeiros pneus específicos para uso em máquinas agrícolas. Os primeiros ensaios comparativos entre as rodas de ferro e os pneus de borracha foram realizados pelo departamento de engenharia da Universidade de Ohio utilizando um trator da marca Allis-Chalmers modelo U, essa marca foi a primeira a montar tratores com pneus de borracha. Os autores concluíram que utilizando pneus de borracha o trator apresentou aumento na capacidade operacional, menor resistência ao rolamento e a redução do consumo de combustível foi de 23% (Ohio State University, 2018).

Segundo Kolator (2021), os pneus agrícolas transferem todo o torque gerado pelo motor em força de tração e locomoção das máquinas. Ele é a principal ligação entre o solo e a máquina, dependendo da carga que ele carrega, a pressão de inflação utilizada e características construtivas estão intrinsicamente conectadas a capacidade operacional e a compactação do solo.

Atualmente o mercado disponibiliza três princípios construtivos de pneus, ou seja, são classificados de acordo com o posicionamento das lonas e cordoneis dentro da carcaça, sendo as classificações: diagonal, diagonal cinturado e radial.

Nos pneus diagonais as lonas estão sobrepostas umas em cima das outras, formando ângulos de 45° graus em relação ao plano. Esse tipo construtivo tem como principal característica laterais rígidas e a estrutura diagonal está ilustrada na Figura 1. Nos pneus diagonais cinturados o posicionamento das lonas é similar aos pneus diagonais. Entanto a principal diferença a aplicação de cintas sobre a carcaça diagonal, essas cintas chamadas de cintas de estabilização conferem ao pneu uma banda de rodagem mais plana. A Figura 2 demonstra a estrutura do referido modelo de pneu.

As lonas nos pneus radiais estão dispostas de um lado ao outro da carcaça formando ângulo de 90° graus em relação ao plano. Essa característica proporciona um pneu com laterais mais flexíveis e acima da estrutura radial são posicionadas as cintas de estabilização, com funções de prender e proteger a estrutura radial, representada na Figura 3.

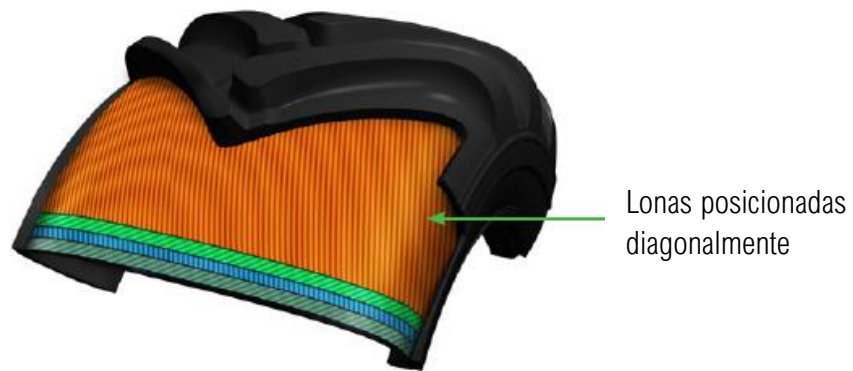


Figura 1. Estrutura interna dos pneus diagonais. Fonte Nokian Tires (2023).

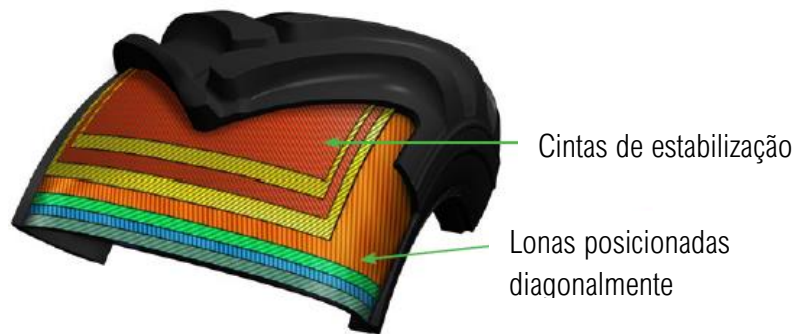


Figura 2. Estrutura interna dos pneus diagonais cinturados. Fonte: Nokian Tires (2023).

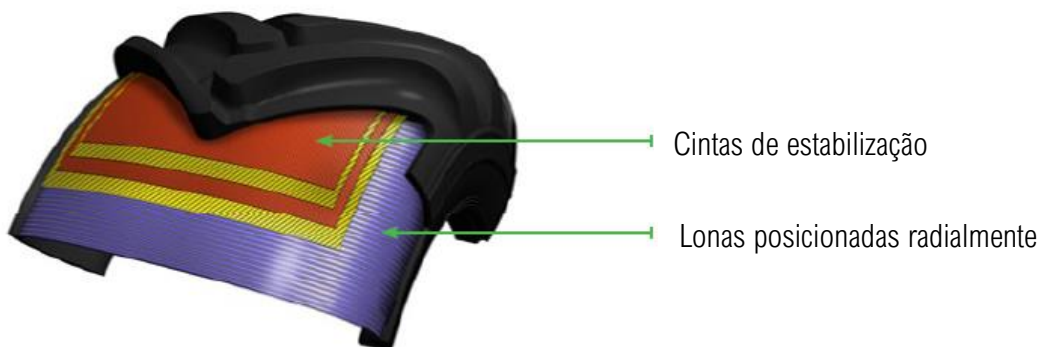


Figura 3. Posicionamento das lonas nos pneus radiais. Fonte: Nokian Tires (2023).

Os pneus agrícolas são constituídos de várias partes, cada uma tem a função particular. Na Figura 4 estão ilustradas as estruturas que compõem os pneus.

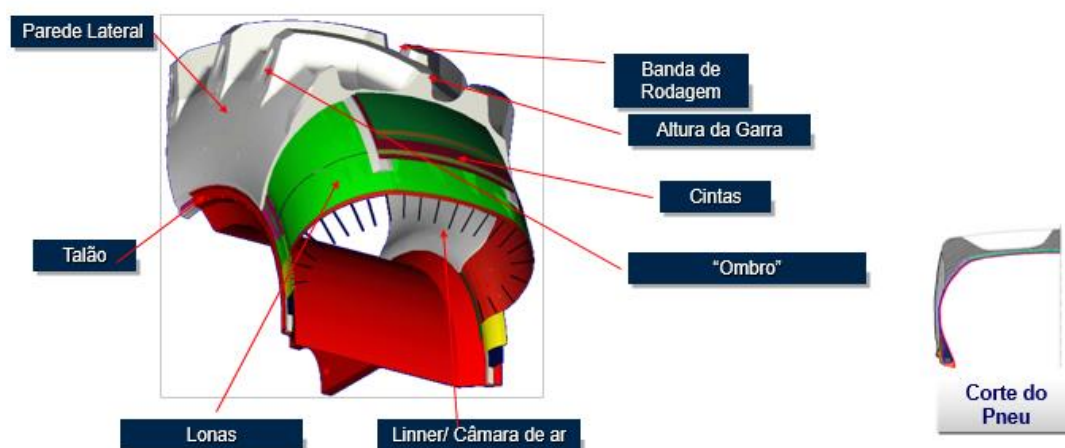


Figura 4. Estruturas dos pneus agrícolas. Fonte: Michelin (2022).

Abaixo segue a descrição de cada parte constituinte do pneu:

- Lonas: O papel das lonas é conferir rigidez e forma ao pneu. De acordo como estão dispostas as lonas é se determina se um pneu é Diagonal, Diagonal Cinturado ou Radial.
- Talão: É o nome que se dá ao cabo de aço revestido de borracha, que fica dentro da borda interna do pneu e é responsável por prendê-lo à borda das rodas.
- Cintas: Dispostas longitudinalmente entre as lonas e a banda de rodagem, sendo confeccionadas em nylon ou de aço.
- Ombro: Região que divide a banda de rodagem da parede lateral.
- Banda de rodagem: É o principal ponto de contato do pneu com o solo, nela estão presentes as garras.
- Garras: Possuem diversas geometrias, altura e largura com o intuito de proporcionar tração a máquina.
- Parede lateral: Estão estampadas todas as características dos pneus.
- Linner/Câmara de ar: Nos pneus sem câmara de ar ele faz a função da câmara. Os pneus que possuem o linner, ou seja, não utilizam câmara de ar, são denominados *Tubeless* e os pneus que possuem câmara de ar são denominados *Tubetype*.

Segundo Márquez (2012) Um ponto chave para a escolha do pneu adequado é selecionar a banda de rodagem que mais se adequa ao tipo de solo que o trator vai trabalhar. O número total de garras a altura e ângulo delas devem ser analisados antes da aquisição do pneu. Pneus com o ângulo das garras acima de 50° graus possuem excelente penetração e autolimpeza, mas baixa capacidade de tração. Desse modo, o mercado disponibiliza pneus agrícolas com ângulos de garras de 45° e 23°

graus. Na Figura 5 estão ilustrados esses ângulos, que se adaptam na maioria de tipos e condições de umidade do solo.

Na lateral dos pneus estão estampadas as informações referentes as dimensões e algumas características técnicas, como demonstrado na Figura 6:

As principais dimensões dos pneus estão destacadas nas laterais, mas existem diferenças entre os pneus diagonais e radiais. As duas principais diferenças são a largura da banda e classificação do tipo construtivo. Nos pneus diagonais a largura da banda está descrita na unidade de polegadas e o hífen significa que se trata de um pneu diagonal. Nos radiais a largura da banda está representada na unidade de medida milímetros e o tipo construtivo representado pela letra R, abaixo na Figura 7 estão ilustradas as dimensões de cada tipo de pneu.



Figura 5. Geometria de garras presentes nos pneus agrícolas. Fonte:Firestone (2023).



Inscrição	Significado
MITAS	Marca do Fabricante
480/70R34	Dimensão
HC 70	Modelo da Banda
146	Índice de Carga (Li146 = 3.000 kg)
A8	Índice de Velocidade (A8 = 40 km/h)
143	Índice de Carga (Li143 = 2.725 kg)
D	Índice de Velocidade (D = 65 km/h)
TUBLESS	Sem Câmara
	Sentido de Rotação
R-1W	Inscrição banda americana

Figura 6. Informações técnicas estampadas nas laterais dos pneus, Fonte: Mitas (2023).

340/85 R 24		7.50 – 20	
340	Largura da banda de rodagem (mm)	7.50	Largura da banda de rodagem (pol)
85	Altura da seção (%)	-	Construção diagonal
R	Construção Radial		
24	Diâmetro do aro (pol)	20	Diâmetro do aro (pol)

(a)

(b)

Figura 7. Dimensão dos pneus radiais (a) e diagonais (b). Fonte: Mitas (2024).

A evolução dos pneus por parte dos fabricantes tem o objetivo de maximizar a capacidade operacional das máquinas e minimizar a compactação do solo. Por estes motivos, os fabricantes de pneus agrícolas têm desenvolvido produtos com características que proporcionem maior área de contato do pneu com solo.

Atualmente todos os tratores acima de 200 cv na configuração 4 x 2 com tração dianteira auxiliar, vêm das montadoras com pneus radiais. Esse tipo construtivo de pneu passou por uma evolução no início dos anos 2000 devido ao aumento de massa, dimensão e potência das máquinas. Surgiram no mercado versões de pneus radiais com maior índice de carga e flexão lateral aumentada, sendo as versões de flexão aumentada, chamada de IF (Intensive Flexion) e as de flexão mais elevada, chamadas de VF (Very Flexion). Essas duas versões são constituídas por materiais resistentes e flexíveis, que proporcionam maior robustez e flexibilidade à carcaça. Dessa forma, os pneus radiais versão IF e versão VF apresentam, respectivamente, 20% e 40 % a mais de capacidade de carga quando comparados ao pneu radial na versão padrão, nas mesmas dimensões e pressões de trabalho (Michelin, 2023).

Dentre os diversos tipos de pneus radiais, temos o PneuTrac[®], também chamado de pneu-esteira, o qual combina as vantagens de um pneu agrícola radial com os benefícios das esteiras, apresentando um bom desempenho, com flutuação e tração superiores, juntamente com uma boa estabilidade lateral, sem, no entanto, comprometer o consumo de combustível e conforto do operador. A montagem do pneu-esteira pode ser realizada nos aros utilizados para demais tipos de pneus agrícolas.

Mattetti et al., (2020) realizaram um estudo com o pneu-esteira, que foi comparado com pneu radial padrão na operação de preparo do solo. Os autores concluíram que o PneuTrac[®] proporcionou maior área de contato do pneu com o solo, resultando na menor compactação do solo e maior potência disponível na barra de tração. Na Figura 8 está ilustrado a geometria da estrutura do pneu-esteira.

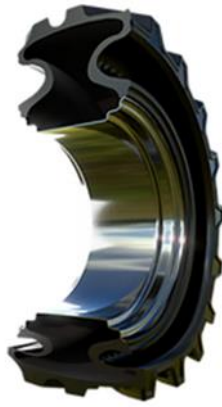


Figura 8. Estrutura do Pneu-esteira. Fonte: Galileo Cup Wheel (2024).

2.2 Relação cinemática

Os tratores 4x2 TDA possuem um eixo central que transmite o torque gerado na caixa de transmissão para o eixo dianteiro e a rotação do eixo dianteiro deve ser superior à rotação do eixo traseiro, a ligação entre os eixos é rígida. Este sistema é denominado de relação cinemática (Shafaei et a.2022).

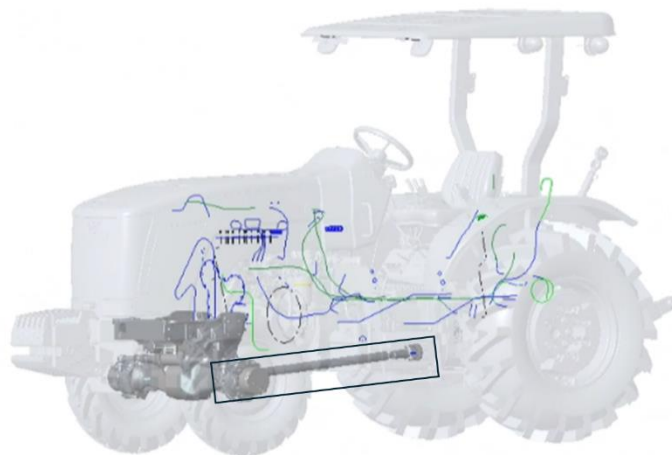


Figura 9. Eixo de ligação da caixa de transmissão ao eixo dianteiro.Fonte: AGCO (2024).

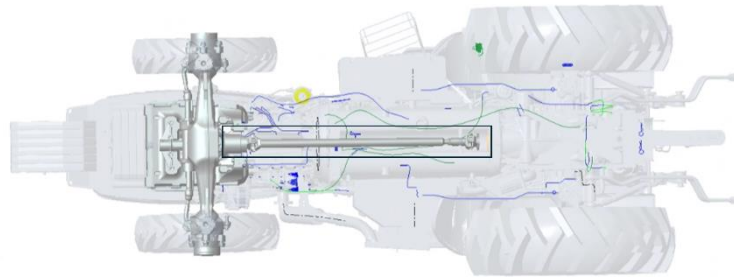


Figura 10. Vista inferior do eixo que transmite o torque da caixa de transmissão até o eixo dianteiro.

Fonte: AGCO (2024).

A relação cinemática entre eixos do trator está relacionada ao projeto desenvolvido pelo fabricante que estabelece, a relação de velocidade tangencial entre os eixos, meio das relações de transmissão entre os dois diferenciais. Geralmente esta relação de velocidade é maior que 1, a favor do eixo dianteiro, que gira mais rápido que o traseiro (Schlosser et al. 2004).

2.3 Avanço Cinemático

Nos tratores 4 x 2 TDA os pneus dianteiros são de menor diâmetro em relação aos pneus traseiros, e, quando a tração dianteira é acionada, ocorre uma ligação rígida entre os eixos em uma mesma fonte de transmissão de potência, sendo que as rodas no mesmo eixo são impulsionadas a girar com a mesma velocidade tangencial sob contato da superfície em que se encontram, porém as rodas do eixo dianteiro devem girar com rotação superior ao eixo traseiro, o que é denominado avanço cinemático (Moitzi et al., 2013; Osinenko et al. 2015).

O valor do avanço das rodas dianteiras não é padrão para todos os tratores 4x2 TDA, e varia de acordo com o tipo construtivo dos pneus utilizados, da relação cinemática dos diferentes fabricantes e modelos de tratores (Taghavifar e Mardani, 2015). Os valores aceitáveis de avanço cinemático situam-se geralmente em torno de 1,5 a 5,0% quando o trator trabalha em solo desagregado; já em solo agregado e piso duro é recomendado que ele esteja em torno 1,0 a 1,5% (Shafaei et al. 2020). A largura da banda de rodagem e área de contato do pneu com o piso influenciam diretamente na eficiência de tração e no avanço cinemático (Cutini et al. 2022).

A adição de massa, variação da pressão de inflação e diâmetro dos pneus afetam diretamente a circunferência de rolamento, o que, conseqüentemente, altera o valor do avanço cinemático do trator. O índice de avanço nunca deve estar abaixo de 1% e não deve exceder 5%, pois, esse fato aumenta

significativamente a deformação dos pneus e acelera o desgaste deles. Se o avanço estiver acima de 5% ocorre a perda da eficiência de tração das rodas dianteiras, e o trator salta e vibra devido à maior diferença da velocidade tangencial das rodas (Moinfar et al., 2020; Azimi et al., 2019). Quando o avanço for abaixo de 1% ou negativo, as rodas traseiras tentam empurrar as rodas dianteiras, o que leva à circulação de potência na transmissão. As rodas dianteiras devolvem parte da potência às rodas traseiras, aumentando as perdas por atrito na transmissão, colocando uma carga extra sobre ela (Janulevicius e Gurevicius 2019).

O pneu esteira como para outros tipos de pneus, é possível realizar combinações de pressões de inflação dos pneus dianteiros e traseiros, para que se obtenha o valor ideal do avanço cinemático, o que pode contribuir para o melhor desempenho do trator e minimizar o desgaste prematuro dos pneus.

2.4 Consumo de combustível

O consumo de combustível racional e consciente nas operações agrícolas depende da recomendação ideal do conjunto motomecanizado, onde a potência do trator é necessária para atender a demanda de carga hidráulica ou mecânica do implemento (Xue et al., 2022).

Kumar et al. (2019) desenvolveram um equipamento que faz a leitura instantânea do índice de patinação e a partir da interpretação dos valores do índice de patinação o operador realizava ajustes na condução do trator que proporcionaram uma redução de 32% no consumo de combustível.

Nos pneus radiais utilizando combinações de pressões que se obtenha o avanço de 1,5 % ocorre uma redução do consumo horário de combustível da ordem de 2,5 a 3,0%, enquanto o consumo operacional de combustível fica na faixa de 3,5 – 4.0% (Janulevicius et al., 2018, Xiao et al., 2018).

A rotação e a carga aplicadas aos motores com injeção mecânica ou eletrônica influenciam no consumo de combustível do trator. O consumo específico de combustível pode ser de 5% a 25% menor quando o motor trabalha com 80% do seu torque máximo e 70 a 85% da sua rotação (Ekinci e Çarman, 2017). Os motores agrícolas movidos à diesel tem a característica de disponibilizar a potência máxima @2400 rpm e o torque máximo @1500 rpm. Segundo Venkatesan et al. (2021) durante as operações os motores agrícolas devem trabalhar nas rotações de 1750 a 1900 rpm para obtenção do ponto de equilíbrio entre potência, torque e rotação para obtenção do intervalo ótimo de consumo.

Barbosa et al. (2005) avaliaram desempenho de um trator comparando pneus diagonais versus pneus radiais e os concluíram que os pneus radiais proporcionaram incrementos nos valores de capacidade de tração e potência na barra, redução nos valores de consumo específico de combustível e não causou variações no consumo horário de combustível.

2.5 Índice de patinagem

A eficiência de tração dos rodados aumenta a capacidade operacional. Algumas operações de preparo do solo podem proporcionar um elevado índice de patinagem. Altos índices proporcionam perda de energia e potência da máquina. Várias alternativas podem ser empregadas para reduzir a patinagem dos pneus, como o uso da quantidade correta de lastro, ajuste ou redução da pressão de inflação dos pneus (Soylu e Carman, 2021).

Na obtenção de alta eficiência e desempenho de tração, a patinagem das rodas é considerada como um dos principais fatores. A patinagem da roda pode ser descrita como a diferença relativa entre a velocidade de avance do trator e a velocidade angular da sua roda motriz. Para que um trator obtenha máxima eficiência de tração, o índice de patinagem das rodas deve ser mantido em uma faixa ideal. Alguns autores citam, que a faixa ideal concentra 8% e 15%. Os valores de patinagem acima ou abaixo desta faixa, a eficiência da tração é reduzida (Kumar et al. 2017)

A pressão de inflação, tipo construtivo da estrutura dos pneus e a carga aplicada sobre eles tem uma relação direta com o tamanho da área de contato que o pneu imprime no solo. Os pneus radiais possuem laterais mais flexíveis e sobre a estrutura radial são aplicadas as cintas de estabilização que circundam toda essa estrutura. A junção dessas características proporciona uma área de contato com uma geometria retangular quando a banda de rodagem entra em contato com o solo. Nos pneus diagonais as laterais são mais rígidas, resultando em uma área de contato no formato de uma elipse.

Área de contato está estreitamente relacionada ao índice de patinagem, o índice é um fator determinante para a tomada de decisão entre realizar a adição ou remoção da massa metálica do trator e adição ou retirada de água dos pneus.

Segundo Kim et al. (2019) quando o trator apresenta o valor da patinagem abaixo de 5% a máquina está com excesso de massa e as consequências são a perda da capacidade operacional, sobrecarga na transmissão, elevado consumo de combustível podendo chegar a um aumento de até 15%, pneus com alta resistência ao rolamento e compactação do solo. Índices de patinagem acima 18% a velocidade real do trator se reduz, e com isso há redução também da sua capacidade de

trabalho, havendo perda de eficiência energética. A baixa quantidade de lastro no trator pode ser o principal efeito causador da alta porcentagem de patinagem.

De acordo com Janulevicius e Damanauskas (2015) o alto índice de patinagem provoca aumento no consumo de combustível, custos com reparo e manutenção, desgaste prematuro dos pneus. A pressão de inflação dos pneus é um fator importante para o controle do índice de patinagem. Desse modo alguns fabricantes de tratores estão instalando em suas máquinas sensores automatizados nos pneus para monitorar e ajustar a pressão de inflação de acordo com a necessidade (Lovarelli et al., 2018) A utilização de tratores 4x2 TDA com suspensão no eixo dianteiro tem auxiliado no equilíbrio de massa entre os eixos da máquina proporcionado melhores índices de patinagem.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido em três experimentos, sendo o primeiro realizado em 2022, no município de São José da Bela Vista, SP, para avaliar o consumo de combustível, raio de giro e o índice de patinagem de um trator 4X2 TDA, classe II, e área de contato da banda de rodagem dos três pneus, durante operações agrícolas realizadas na cultura do café. Posteriormente, nos anos de 2023 e 2024, foram realizados outros dois experimentos na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), Campus de Jaboticabal, SP, nos quais avaliamos o avanço e a relação cinemáticos, bem como um ensaio de desempenho operacional em operações de preparo do solo, avaliando o consumo de combustível e patinagem. A seguir são apresentadas as metodologias utilizadas nestes experimentos.

3.1 Desempenho operacional em operações na cultura do café

3.1.1 Localização da área e equipamentos utilizados

Esta etapa do experimento foi desenvolvida em uma área de produção da Fazenda Glória, localizada no município de São José da Bela Vista/SP com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 21°14'09.0"S, longitude 48°17'07.0"W, com a altitude de 607 metros. O ensaio foi realizado no mês de julho de 2022, utilizando um trator da marca Valtra, modelo A850-F, 4x2 TDA (Figura 11), com motor de 3 cilindros com potência máxima de 63,3 kW (86,2 cv) @ 2.300 rpm na norma SAE J1995, cujas características técnicas encontram-se na Tabela 1.

O experimento foi realizado para avaliar o efeito da combinação de pressões de inflação em pneus-esteiras (Figura 12.a) e diagonais (Figura 12.b), novos e recauchutados, em duas operações normalmente utilizadas na cafeicultura: escarificação e pulverização, observando as recomendações

dos fabricantes de pneus e levando-se em consideração as velocidades e as cargas impostas aos pneus. As características dos pneus encontram-se na Tabela 2.



Figura 11. Trator 4x2 TDA Valtra, modelo A850-F. Fonte: Autor (2022).

Tabela 1. Especificações técnicas do trator utilizado.

Característica	Tipo
Aspiração	Turbo
Injeção	Mecânica com bomba em linha
Torque máximo	296 Nm @ 1500 rpm (norma ISO TR 14396)
Transmissão	Mecânica sincronizada com embreagem multidiscos úmidos com acionamento mecânico
Caixa de câmbio	8 marchas à frente e 4 marchas à ré
Velocidades	0,58 a 5,91 m s ⁻¹
Tempo de uso	5.057 h
Largura total mínima	1274 milímetros
Largura total máxima	1406 milímetros

Na escarificação o trator operou na marcha L3 @ 1900 rpm com a velocidade média de 1,52 m s⁻¹, tração dianteira e bloqueio do diferencial acionados e com o ar-condicionado ligado. Em um talhão no qual seria realizado o transplântio de café, foi utilizado um escarificador de cinco hastes montado no sistema hidráulico de 3 pontos (Figura 13.a), trabalhando a 0,30 m de profundidade em área coberta com restos culturais de milho na qual, anteriormente ao ensaio, foi realizada uma

gradagem leve com o intuito de incorporar os restos culturais remanescentes. Na pulverização o trator trabalhou na marcha H1 @1850 rpm, com a velocidade média de $1,69 \text{ m s}^{-1}$, tração dianteira acionada, tomada de potência ligada na rotação de 540 rpm, bloqueio do diferencial desligado e ar-condicionado ligado. O pulverizador utilizado foi da marca Jacto, modelo Arbus 2.000 (Figura 13.b), com tanque de fibra de vidro com capacidade para 2.000 L, agitador mecânico e uma bomba com vazão máxima de 75 L min^{-1} .



(a)



(b)

Figura 12. Trator Valtra equipado com: a) pneus-esteiras b) pneus diagonais. Fonte: Autor (2022).



(a)



(b)

Figura 13. Equipamentos utilizados: a) escarificador; b) pulverizador. Fonte: Autor (2022).

Foram definidos três níveis de pressão de inflação dos pneus dianteiros e traseiros, classificadas como alta, média e baixa, conforme apresentado na Tabela 3. Estes níveis foram determinados a partir dos valores obtidos pela pesagem do trator, consultando o manual técnico de cada pneu, a fim de recomendar a pressão de inflação exata de acordo com a carga aplicada a cada pneu. As pressões de inflação dos pneus foram aferidas por um manômetro analógico de uso para

pneus agrícolas da marca Flaig com escala de 1 psi, e a unidade utilizada foi kPa. Esse manômetro faz a leitura da pressão com precisão, mesmo o pneu estando com lastragem líquida.

Tabela 2. Especificações técnicas dos pneus utilizados.

Pneus	Característica	Eixo dianteiro		Eixo traseiro		
Diagonais recauchutados	Dimensão	8.00-18 12 PR		12.4/11-28 6 PR		
	Marca	Advance		Firestone		
	Modelo	-		Champion Ground Grip		
	Classificação	R1		R1		
	Tipo	Tube Type		Tube Type		
	Profundidade das garras (mm)	Esquerda: 24	Direita: 24	Esquerda: 23	Direita: 23	
	Número de garras	Esquerda: 24	Direita: 25	Esquerda: 20	Direita: 20	
	Lastragem líquida	75%	75%	75%	75%	
Lastragem sólida	4 x 46 kg		2 x 50 kg	2 x 50 kg		
Diagonais novos	Dimensão	8.00-18 12 PR		12.4-28 6 PR		
	Marca	Maggion		Mitas		
	Modelo	Frontiera		TD 19		
	Classificação	R1		R1		
	Tipo	Tube Type		Tube Type		
	Profundidade das garras (mm)	Esquerda: 20	Direita: 20	Esquerda: 34	Direita: 34	
	Número de garras	Esquerda: 24	Direita: 24	Esquerda: 21	Direita: 21	
	Lastragem líquida	75%	75%	75%	75%	
Lastragem sólida	4 x 46 kg		2 x 50 kg	2 x 50 kg		
Pneus-esteiras	Dimensão	VF 280/70R18 116 A8		VF 480/65R28 148 A8		
	Marca	Trelleborg	Trelleborg	Trelleborg	Trelleborg	
	Modelo	Pneutrac		Pneutrac		
	Classificação	R1W		R1W		
	Tipo	Tubeless		Tubeless		
	Profundidade das garras (mm)	Esquerda: 34	Direita: 34	Esquerda: 45	Direita: 45	
	Número de garras	Esquerda: 18	Direita: 18	Esquerda: 21	Direita: 21	
	Lastragem líquida	0%	0%	0%	0%	
Lastragem sólida	4 x 46 kg		0	0		

Tabela 3. Pressões utilizadas para cada tipo de pneus.

Pneu	Nível de pressão	Pressão de inflação (kPa)	
		Pneus dianteiros	Pneus traseiros
Diagonais Recauchutados	Alta	152	165
	Média	138	152
	Baixa	124	138
Diagonais Novos	Alta	152	165
	Média	138	152
	Baixa	124	138
Pneus-esteiras	Alta	69	89
	Média	55	76
	Baixa	41	62

Durante as operações foi utilizado o equipamento da marca Instrutherm, modelo HT 350 para medir a temperatura (°C) e umidade relativa do ar (%). O aparelho modelo HydroSense II para coletar o teor de água do solo (%) na profundidade de 20 centímetros. Os dados ambientais foram coletados antes do início de cada operação, na Tabela 4 estão ilustrados os valores.

Tabela 4. Parâmetros ambientais antes das aquisições de dados para cada operação

Pneu	Operação	Temperatura °C	Umidade relativa do ar (%)	Água no solo (%)
Diagonal	Pulverização	26,2	44,8	16,2
recauchutado	Escarificação	36,4	27,1	11,5
Diagonal novo	Pulverização	28,9	47,4	14,2
	Escarificação	35,4	22,7	12,6
Pneu-esteira	Pulverização	25,8	45,3	18,6
	Escarificação	35,8	29,7	10,9

3.1.2 Relação massa/potência

Para determinação da massa do trator utilizamos uma balança de duas sapatas (Figura 14), modelo Dina 3 Portable, da marca Dinamica Generale, com precisão de 1 kg. O trator teve sua massa mensurada com o tanque de combustível totalmente preenchido com óleo diesel e com a presença do operador no posto de operação durante o procedimento. Na Tabela 5 e encontram-se ilustrados

os valores das massas do trator, nos eixos dianteiro e traseiro, a porcentagem de massa pelos eixos e a relação da massa pela potência expressa em cavalo-vapor de acordo com o tipo construtivo dos pneus.



Figura 14. Aferição da massa do eixo dianteiro do trator equipado com pneus diagonais. Fonte: Autor (2022).

Tabela 5. Massa total, distribuição de massa entre os eixos e relação massa/potência para os pneus-esteiras.

Pneus	Eixo	Massa por rodado (kg)			% eixo	Relação Massa/Potência (kg cv ⁻¹)
		Esquerdo	Direito	Total		
Diagonais recauchutados	Dianteiro	676	729	1.405	40,3	40,5
	Traseiro	1.015	1.070	2.085	59,7	
	Total	1.691	1.799	3.490	100,0	
Diagonais novos	Dianteiro	706	685	1.391	40,2	40,2
	Traseiro	1.065	1.008	2.073	59,8	
	Total	1.771	1.693	3.464	100,0	
Pneus-esteiras	Dianteiro	694	657	1.351	42,0	37,3
	Traseiro	986	882	1.868	58,0	
	Total	1.680	1.539	3.219	100,0	

3.1.3 Avanço e relação cinemáticos

Para aquisição do avanço e relação cinemáticos foram realizadas duas repetições com o trator em movimento à velocidade constante de 2 km h⁻¹, em local plano e firme, com e sem tração dianteira

auxiliar acionada, segundo recomendações do fabricante do equipamento denominado Avançômetro (Figura 15), formado por um módulo eletrônico digital microprocessado, dois sensores de roda acoplados no centro dos eixos dianteiro e traseiro direito, e chave sinalizadora. Para realização do ensaio foi utilizada a marcha L2, que fornece velocidades de deslocamento de 1 a 2 km h⁻¹, e a uma rotação do motor de 1.500 rpm.



Figura 15. Avançômetro localizado na roda dianteira esquerda do trator. Fonte: Autor (2022).

3.1.4 Área de contato dos pneus

As áreas de contato da banda de rodagem foram coletadas dos três tipos de pneus com as respectivas pressões de inflação, totalizando 36 amostragens.

Para determinação da área de contato, cada pneu foi posicionado sob uma folha branca, após o seu posicionamento utilizou-se uma embalagem tipo spray com tinta preta para pintar as laterais dos pneus. Com a retirada do pneu, a banda de rodagem ficou impressa na folha. Foram tiradas fotos de cada uma das impressões com objetivo de digitalizar as áreas de contato. As áreas de contato digitalizadas foram submetidas ao software ImageJ[®] que determinou a área de contato de cada pneu. acima das quais os pneus foram posicionados para promover a impressão das áreas nas folhas.

3.1.5 Raio e espaço de giro

O raio de giro foi determinado a partir do menor círculo descrito por um ponto da intersecção do plano vertical médio da roda mais externa do trator, com o plano de apoio, em nível, sobre o qual a máquina desloca-se em círculo, com o volante de direção totalmente esterçado à direita ou à esquerda (Figura 16). Para este ensaio foram empregadas as normas da NBR ISO 789-3:2016 (ABNT, 2016), sendo o ensaio foi realizado utilizando a marcha L2 @ 1500 rpm. O trator estava com a bitola

dianteira e traseira de 1357 milímetros (mm) utilizando os pneus-esteiras e a bitola dianteira e traseira de 1286 mm quando equipado com os pneus diagonais recauchutados e novos.

O Índice de Simetria do raio de giro (ISrg) foi calculado conforme a equação 1 e o valor expresso em porcentagem

$$ISrg(\%) = \frac{(RGE - RGD)}{(RGE + RGD)} \times 100 \quad (1)$$

Em que,

RGE: raio de giro à esquerda e,

RGD: raio de giro à direita.

De acordo com o resultado obtido, o ISrg (%) foi classificado de acordo com a Tabela 6:

Tabela 6. Classificação da simetria do raio de giro

ISrg (%)	
Ótimo	< 0,5
Bom	0,5 a 1,0
Regular	1,1 a 2,0
Deficiente	> 2,0



Figura 16. Avaliação do raio de giro. Fonte: Autor (2022).

3.1.6 Índice de patinagem

O índice de patinagem dos rodados foi adquirido pelo equipamento avançômetro, ele possui dois sensores que foram acoplados verticalmente no centro do eixo dianteiro e do eixo traseiro; as leituras foram realizadas durante as 4 repetições com os implementos em operação (com carga) e 1 passagem com o implemento levantado (sem carga).

3.1.7 Consumo de combustível

A mensuração do consumo horário de combustível foi realizada utilizando dois medidores de vazão da marca Oval modelo M-III, vazão de 1 ml por pulso, sendo que um medidor foi instalado na linha de alimentação da bomba injetora do motor e o outro medidor na linha de retorno da bomba injetora, que chega até o tanque de combustível (Figura 17). Os valores obtidos foram inseridos em uma planilha do *software* Excel (Microsoft®, 2022), na qual foi realizada a subtração do combustível que entrou na bomba injetora e retornou ao tanque de combustível, resultando no consumo real volumétrico de combustível pelo trator.

Para a mensuração dos dados de consumo horário de combustível para cada tipo de pneu e pressão de inflação, foram realizados os testes nas duas operações, sendo a primeira a operação de escarificação e a segunda a operação de pulverização. Nas duas operações as parcelas foram delimitadas com o comprimento de 50 metros e foram realizadas 4 repetições.



Figura 17. Trator equipado com fluxômetro. Fonte: Autor (2022).

3.1.8 Delineamento experimental

Para a análise dos resultados de patinagem e consumo de combustível foi utilizado o delineamento em faixas, em esquema fatorial 3 x 3, com três tipos de pneus e três níveis de pressão de inflação dos pneus, com quatro repetições. A análise de variância, com o teste F a 5% de probabilidade foi empregada separadamente para as operações de escarificação e de pulverização, devido à grande diferença de exigência de potência em cada uma delas. Quando significativo as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o consumo de combustível foram utilizadas as premissas do Controle Estatístico de Processo, em que os pontos foram coletados em intervalos de tempos regulares para cada linha percorrida pelos conjuntos mecanizados trator-escarificador e trator-pulverizador. Os resultados obtidos foram analisados por meio das cartas de controle de valores individuais, utilizando-se o software Minitab® 16. As cartas de valores individuais apresentam uma linha central que representa a média geral dos dados e duas outras linhas que definem os limites superior e inferior de controle, calculados com base no desvio padrão de acordo com as equações 2 e 3 (MONTGOMERY, 2009).

$$LSC = \bar{x} + 3. \sigma \quad (2)$$

$$LIC = \bar{x} - 3. \sigma \quad (3)$$

Em que:

LSC = limite superior de controle;

\bar{x} = média geral da variável;

σ = desvio-padrão;

LIC = limite inferior de controle.

O processo é considerado estável (sob controle) quando todos os pontos se localizam dentro dos limites superior e inferior de controle, e instável (fora de controle) quando os pontos extrapolam um dos limites.

As demais variáveis foram analisadas por comparação direta entre os tratamentos.

3.2 Experimentos realizados em 2023 e 2024

Estes experimentos foram desenvolvidos na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – FEPE, da FCAV/UNESP, Campus de Jaboticabal, SP, cujas coordenadas geográficas são latitude 21°14'46.0"S, longitude 48°16'57.2"W, com altitude de 615 m. O local selecionado para realização

do ensaio possui relevo plano e superfície do solo coberta por asfalto e os ensaios foram realizados nos dias 22 a 25 de janeiro de 2024.

Foi utilizado um trator 4x2 TDA da marca Massey Ferguson, modelo 3407 (Figura 18), com motor de 3 cilindros com potência máxima de 58 kW (78,9 cv) @ 2.200 rpm, cujas características técnicas encontram-se na Tabela 6.



Figura 18. Trator Massey Ferguson 3407 utilizado na determinação do avanço cinemático. Fonte: Autor (2024).

Nos ensaios realizados foram utilizados pneus radiais e diagonais. Os pneus radiais utilizados foram da marca Trelleborg, modelo PneuTrac® (Figura 19.a), com a tecnologia CupWheel (Galileo Wheel Ltd), que devido ao tipo construtivo e à geometria das suas laterais, apresentam laterais denominadas de conceito ômega. Estes pneus não utilizam câmara de ar e, neste trabalho, foram conceituados como pneu-esteira.

Tabela 7. Especificações técnicas do trator utilizados na determinação do avanço cinemático.

Característica	Tipo
Aspiração	Turbo intercooler
Injeção	Mecânica (norma SAE J 1995)
Torque máximo	296 Nm (norma ISO TR 14396)
Transmissão	Mecânica sincronizada composta por embreagem de multidisco úmido com acionamento mecânico
Caixa de câmbio	8 marchas à frente e 4 marchas à ré
Velocidades	0,58 a 5,80 m s ⁻¹

No eixo dianteiro foram montados pneus com a dimensão VF 280/70R18 116 A8, com 18 garras com altura de 34 mm, capazes de suportar carga mínima e máxima de, respectivamente, 760 kg e máxima de 1.375 kg, pressões mínima e máxima de 62 e 159 kPa (9 e 23 psi), respectivamente, e admitem velocidade máxima de $13,88 \text{ m s}^{-1}$. No eixo traseiro utilizamos pneus com a dimensão VF 480/65R28 148 A8, que possuem 21 garras com altura de 45 mm, suportam a carga mínima de 1595 kg^{-1} e máxima de 3.465 kg. A velocidade máxima admitida é de $13,88 \text{ m s}^{-1}$ e as pressões mínima e máxima recomendadas são de 42 e 159 kPa (6 e 23 psi).

Posteriormente os pneus radiais foram substituídos por pneus diagonais, das marcas Advance e Goodyear, modelo Dyna Torque II® (Figura 19.b), ambos utilizando câmara de ar. No eixo dianteiro foram montados pneus com dimensões 8.00-18, 12 lonas. Esses pneus possuem 24 garras e a altura das garras é de 18 mm, suportando a carga mínima de 896 kg^{-1}) e máxima de 1250 kg^{-1} , a sua velocidade máxima é $11,11 \text{ m s}^{-1}$ e as pressões mínima e máxima são 255 e 459 kPa. Os pneus traseiros possuíam dimensões de 14.9-24, com 8 lonas, 24 garras com altura de 37 mm, com capacidade de carga mínima e máxima de 1.282 kg e máxima de 1.760 kg, respectivamente, com velocidade máxima de $11,11 \text{ m s}^{-1}$ e pressões mínima e máxima são 83 e 138 kPa.



(a)



(b)

Figura 19. Modelos de pneus utilizados no experimento: a) pneu-esteira; b) pneu diagonal. Fonte: Autor (2023).

3.2.1 Experimento realizado em 2023: avaliação de pressões de inflação dos pneus

O experimento foi realizado em maio de 2023 para avaliar o efeito de diferentes pressões de inflação em pneus-esteiras e diagonais, de acordo com as recomendações técnicas apresentadas nos manuais dos fabricantes, levando-se em consideração as velocidades e as cargas impostas aos pneus. Não foi adicionado lastro líquido aos pneus. O delineamento foi organizado em faixas, com duas

repetições, e dois fatores foram avaliados: o Fator 1 (pressões dos pneus-esteiras) com 14 níveis (designados como P1, P2, ..., P13 e P14, conforme Tabela 8) e o Fator 2 (pressões dos pneus diagonais) com 10 níveis (P1, P2, ..., P9 e P10 – conforme Tabela 9). As faixas de pneus-esteiras e diagonais foram dispostas horizontalmente e testadas em momentos diferentes. Cada parcela experimental tinha 10 metros de comprimento por 2 metros de largura.

Tabela 8. Combinações de pressões (kPa) utilizadas no Pneu-esteira.

Pneu-esteira (pressões constantes nos pneus traseiros e variadas nos pneus dianteiros)													
P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7	
D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T
62	41	62	62	62	83	62	98	62	117	62	138	62	159
83	41	83	62	83	83	83	98	83	117	83	138	83	159
97	41	97	62	97	83	97	98	97	117	97	138	97	159
117	41	117	62	117	83	117	98	117	117	117	138	117	159
138	41	138	62	138	83	138	98	138	117	138	138	138	159
159	41	159	62	159	83	159	98	159	117	159	138	159	159
Pneu-esteira (pressões constantes nos pneus dianteiros e variadas nos pneus traseiros)													
P8		P9		P10		P11		P12		P13			
D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T
159	62	138	62	117	62	98	62	83	62	62	62	62	62
159	83	138	83	117	83	98	83	83	83	83	62	83	83
159	97	138	97	117	97	98	97	83	97	62	97	62	97
159	117	138	117	117	117	98	117	83	117	62	117	62	117
159	138	138	138	117	138	98	138	83	138	62	138	62	138
159	159	138	159	117	159	98	159	83	159	62	159	62	159

O critério para seleção das combinações foi utilizar pressões constantes nos pneus traseiros e variar as pressões nos pneus dianteiros, e, posteriormente, as pressões dos pneus dianteiros foram mantidas constantes e as pressões dos pneus traseiros foram alteradas. O objetivo foi utilizar todas as combinações de pressões presentes nos manuais dos fabricantes, de modo a obter todos os valores possíveis do avanço e da relação cinemático. As pressões de inflação dos pneus foram aferidas por um manômetro como descrito no item 3.1.1.

As combinações de pressões resultaram nas relações entre as pressões dos pneus traseiros e dianteiros apresentadas na Tabela 10, que foram utilizadas para traçar os gráficos de avanço e relação cinemáticos.

Tabela 9. Combinações de pressões (kPa) utilizadas no diagonal.

Diagonal (pressões constantes nos pneus traseiros, variação das pressões nos pneus dianteiros)									
P1		P2		P3		P4		P5	
Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
255	138	255	124	255	110	255	96	255	83
310	138	310	124	310	110	310	96	310	83
358	138	358	124	358	110	358	96	358	83
414	138	414	124	414	110	414	96	414	83
469	138	469	124	469	110	469	96	469	83
Diagonal (pressões constantes nos pneus dianteiros, variação das pressões nos pneus traseiros)									
P6		P7		P8		P9		P10	
Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
469	83	414	83	358	83	310	83	255	83
469	96	414	96	358	96	310	96	255	96
469	110	414	110	358	110	310	110	255	110
469	124	414	124	358	124	310	124	255	124
469	138	414	138	358	138	310	138	255	138

Tabela 10. Relação entre as pressões dos pneus traseiros e dianteiros, para os pneus-esteiras e diagonais.

Relação entre pressões	Pneus-esteiras					Pneus diagonais		
	Pressão (kPa)		Relação entre pressões	Pressão (kPa)		Relação entre pressões	Pressão (kPa)	
	D*	T		D	T		D	T
1,00	159	159	0,52	159	83	0,29	469	138
1,15	138	159	0,60	138	83	0,33	414	138
1,35	117	159	0,71	117	83	0,38	359	138
1,64	97	159	0,86	97	83	0,44	310	138
1,92	83	159	1,00	83	83	0,54	255	138
2,56	62	159	1,33	62	83	0,26	469	124
0,87	159	138	0,39	159	62	0,30	414	124
1,00	138	138	0,45	138	62	0,35	359	124
1,18	117	138	0,53	117	62	0,40	310	124
1,43	97	138	0,64	97	62	0,49	255	124
1,67	83	138	0,75	83	62	0,24	469	110
2,22	62	138	1,00	62	62	0,27	414	110
0,74	159	117	0,26	159	41	0,31	359	110
0,85	138	117	0,30	138	41	0,36	310	110

Tabela 10. Relação entre as pressões ... Continuação.

Relação entre pressões	Pneus-esteiras					Pneus diagonais		
	Pressão (kPa)		Relação entre pressões	Pressão (kPa)		Relação entre pressões	Pressão (kPa)	
	D*	T		D	T		D	T
1,00	117	117	0,35	117	41	0,43	255	110
1,21	97	117	0,43	97	41	0,21	469	97
1,42	83	117	0,50	83	41	0,23	414	97
1,89	62	117	0,67	62	41	0,27	359	97
0,61	159	97				0,31	310	97
0,70	138	97				0,38	255	97
0,82	117	97				0,18	469	83
1,00	97	97				0,20	414	83
1,17	83	97				0,23	359	83
1,56	62	97				0,27	310	83
						0,32	255	83

* D: pneus dianteiros; T: pneus traseiros.

3.2.1.1 Relação massa – potência

A massa do trator foi determinada utilizando uma balança de quatro sapatas (Figura 20), modelo 3101C, da marca Alfa Instrumentos, com precisão de 1 kg. A pesagem procedeu com a subida das quatro rodas do trator nas sapatas, com o tanque de combustível totalmente preenchido com diesel e o operador se manteve no posto de operação durante a pesagem. Nas Tabelas 10 e 11 encontram-se ilustrados os valores das massas do trator, nos eixos dianteiro e traseiro, a porcentagem de massa pelos eixos e a relação da massa pela potência expressa em cavalo-vapor (cv) de acordo com o tipo construtivo dos pneus.



Figura 20. Aferição da massa do trator quando equipado com os pneus-esteira. Fonte: Autor (2023).

Tabela 11. Massa total, distribuição de massa entre os eixos e relação massa/potência para os pneus-esteiras.

Rodado	Eixo	Lado		Total por eixo	% eixo	Massa/Potência (kg cv ⁻¹)
		Esquerdo	Direito			
Pneus-esteiras	Dianteiro (kg)	658	632	1.290	38,1%	42,86
	Traseiro (kg)	1.042	1054	2.096	61,9%	
	Total (kg)	1.700	1.686	3.386	100,0%	
Diagonais	Dianteiro (kg)	658	678	1.336	41,4%	40,83
	Traseiro (kg)	956	934	1.890	58,5%	
	Total (kg)	1.614	1.612	3.226	100,0%	

3.2.1.2 Determinação do avanço e relação cinemáticos

Para aquisição do avanço e relação cinemáticos utilizamos um equipamento denominado avançômetro (Figura 20), formado por um módulo eletrônico digital microprocessado, dois sensores de roda e chave sinalizadora. Os dois sensores foram acoplados no centro dos eixos dianteiro e traseiro, sendo realizadas duas repetições com o trator em movimento, à velocidade constante de 2 km h⁻¹, em terreno plano e firme, com e sem a tração dianteira (TDA) acionada, conforme as recomendações do fabricante do equipamento. O avançômetro apresenta o índice do avanço em porcentagem (%) e a relação cinemática em números inteiros com três casas decimais. Para realização do ensaio utilizada a marcha L2, que fornece velocidades de deslocamento de 1 a 2 km h⁻¹, e rotação do motor de 1.500 rpm.



Figura 21. Avançômetro. Fonte: Autor (2023).

Os valores da relação cinemática dos pneus-esteiras e dos pneus diagonais em todas as combinações de pressões de inflação estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Relação cinemática média dos pneus-esteiras e pneus diagonais.

Pneus-esteiras					Pneus diagonais			
RT(%) (média)	Pressão (kPa)		RT(%) (média)	Pressão (kPa)		RT(%) (média)	Pressão (kPa)	
	*D	T		D	T		D	T
1,58%	159	159	1,57%	159	97	1,57%	469	138
1,57%	138	159	1,57%	138	97	1,57%	414	138
1,59%	117	159	1,57%	117	97	1,57%	359	138
1,57%	97	159	1,57%	97	97	1,57%	310	138
1,57%	83	159	1,58%	83	97	1,57%	255	138
1,57%	62	159	1,57%	62	97	1,57%	469	124
1,58%	159	138	1,57%	159	83	1,57%	414	124
1,58%	138	138	1,57%	138	83	1,57%	359	124
1,57%	117	138	1,57%	117	83	1,56%	310	124
1,57%	97	138	1,58%	97	83	1,57%	255	124
1,57%	83	138	1,57%	83	83	1,57%	469	110
1,57%	62	138	1,58%	62	83	1,57%	414	110
1,57%	159	117	1,58%	159	62	1,56%	359	110
1,57%	138	117	1,57%	138	62	1,57%	310	110
1,57%	117	117	1,57%	117	62	1,57%	255	110
1,57%	97	117	1,57%	97	62	1,57%	469	97
1,58%	83	117	1,57%	83	62	1,57%	414	97
1,58%	62	117	1,57%	62	62	1,57%	359	97
			1,58%	159	41	1,57%	310	97
			1,57%	138	41	1,57%	255	97
			1,57%	117	41	1,58%	469	83
			1,57%	97	41	1,57%	414	83
			1,58%	83	41	1,58%	359	83
			1,57%	62	41	1,57%	310	83
						1,58%	255	83

D: pneus dianteiros; T: pneus traseiros.

3.2.1.3 Análise dos dados

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para avaliar os efeitos principais de cada fator e as interações entre eles. A análise foi ajustada para o número diferente de tratamentos por fator, considerando a estrutura de blocos e faixas no delineamento.

3.2.2 Experimento em 2024: Desempenho operacional em operações de preparo do solo

Esta etapa foi desenvolvida em uma área de produção da FEPE, localizada na FCAV/UNESP, campus de Jaboticabal/SP com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 21°14'09.0"S, longitude 48°17'07.0"W, com a altitude de 607 metros. O ensaio foi realizado no mês de maio de 2024, com um trator da marca Massey Ferguson, modelo 3407, 4x2 TDA, cujas características técnicas

foram detalhadas no item 3.1. A superfície do solo da área experimental estava coberta com restos culturais de milho e anteriormente ao ensaio foi realizada uma gradagem leve com o intuito de incorporar os restos culturais remanescentes. O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico (ANDRIOLLI e CENTURION, 1999).

O experimento foi conduzido utilizando um delineamento seguindo as premissas do Controle Estatístico de Processo, com as amostras coletados no tempo, com o objetivo de avaliar o efeito de dois tipos de pneus (pneus-esteiras e pneus diagonais) e três implementos de preparo do solo (arado de discos, grade e escarificador) sobre o consumo de combustível e a patinagem dos rodados. O experimento contou com 21 pontos amostrais para cada uma das seis combinações de tratamentos (resultantes da interação entre os fatores).

3.2.2.1 Patinagem dos rodados

A porcentagem da patinagem dos rodados do trator foi adquirida por meio do avançômetro, que utiliza dois sensores acoplados no centro do eixo dianteiro e do eixo traseiro; as leituras foram realizadas durante as passagens com os implementos sem operação (sem carga) e operando (com carga).

3.2.2.2 Consumo de combustível

Aquisição dos dados do consumo de combustível e do índice de patinagem ocorreram simultaneamente dentro de cada tratamento e cada parcela possuía comprimento de 25 metros e largura conforme a largura de trabalho dos implementos. Foram utilizados 3 implementos de preparo de solo, sendo um escarificador da marca Tatu modelo AST de 5 hastes com ponteiras sem asas, montado no sistema hidráulico de três pontos do trator, com a sensibilidade do sistema travada e profundidade de trabalho foi de 0,30 m; um arado de três discos montado, reversível, com discos de diâmetro de 28 polegadas, da marca Santa Izabel, modelo SRH 328, e uma grade aradora intermediária de 16 discos recortados, com diâmetros de 26 polegadas, da marca Tatu, modelo GAICR 300, acoplada à barra de tração do trator. Durante as operações o trator trabalhou à uma rotação do motor de 1.800 rpm, na marcha L3 com velocidade média de 5,6 km h⁻¹, com a tração dianteira auxiliar ligada e bloqueio do diferencial acionado.

Nos eixos do trator Massey Ferguson 3407 foram montados dois diferentes tipos construtivos de pneus, sendo eles pneus radiais (pneus-esteiras) e diagonais, como descrito no item 3.1. As pressões de inflação utilizadas para os pneus-esteiras foram 159 kPa nos pneus dianteiros e 41 kPa nos pneus traseiros. Essa combinação de pressões foi utilizada por proporcionar índice de avanço

cinemático no valor de 1,52%. Para os pneus diagonais foi utilizada a combinação das pressões de inflação de 255 kPa nos pneus dianteiros e 138 kPa nos pneus traseiros, que proporcionou avanço cinemático de 5,75%. As pressões utilizadas nos dois tipos construtivos de pneus situam-se dentro das faixas recomendadas nos manuais técnicos dos fabricantes e os pneus não foram preenchidos com lastragem líquida.

A quantidade de massa total, distribuição de massa entre os eixos e a relação massa/potência do trator para cada tipo de pneu estão descritas nas Tabelas 1 e 2 do item 3.1.

O consumo de combustível foi mensurado empregando-se dois medidores de vazão da marca Oval modelo M-III, vazão de 1 ml por pulso, sendo que um medidor foi instalado na linha de alimentação da bomba injetora do motor e o outro medidor na linha de retorno da bomba injetora, que chega até o tanque de combustível. Os valores obtidos foram inseridos em uma planilha do *software* Excel (Microsoft®, 2022), onde foi realizada a subtração do combustível que entrou na bomba injetora e retornou ao tanque de combustível resultou no consumo real volumétrico de combustível pelo trator.

3.2.2.2 Análise dos resultados

Os resultados obtidos foram analisados por meio das cartas de controle de valores individuais, utilizando-se o *software* Minitab® 16, como descrito no item 3.1.5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desempenho operacional em operações na cultura do café

4.1.1 Avanço cinemático

Na Tabela 13 encontram-se os valores do índice de avanço para cada situação avaliada. Podemos observar que os pneus diagonais recauchutados apresentaram os maiores valores de índice de avanço cinemático todos acima de 4% nas três combinações de pressões de inflação.

O aumento do índice de avanço está estreitamente relacionado a elevação da pressão de inflação, observou-se, que nos três modelos de pneu com o aumento da pressão houve uma elevação nos valores do avanço cinemático. Os pneus diagonais novos em todos os níveis de pressão de inflação apresentaram o menor índice de avanço quando comparados aos pneus diagonais recauchutados, esta diferença entre os valores de avanço pode ser traduzida pelo fato de que, quando os pneus são recauchutados a carcaça recebe uma nova banda de rodagem e a fixação da nova banda

na carcaça se deve ao aquecimento de 150° graus celsius provocado pelo equipamento chamado de autoclave os compostos de borracha sofrem reações químicas que modificam as estruturas dos pneus, por exemplo, a minimização da flexão das laterais e flancos, a estrutura física também é alterada como a massa do pneu, geometria e distância entre as garras da banda de rodagem o que resulta na alteração da circunferência de rolamento e diâmetro externo independentemente da pressão de inflação utilizada.

Tabela 13. Índice do avanço cinemático dos pneus utilizados, em cada configuração de nível de pressão.

Nível de pressão	Pneu	Avanço cinemático (%)	Variação percentual
Alta	Diagonais recauchutados	4,66	
	Diagonais novos	2,12	
	Pneus-esteiras	3,92	
Média	Diagonais recauchutados	4,51	3,22%
	Diagonais novos	1,85	12,74%
	Pneus-esteiras	3,87	1,27%
Baixa	Diagonais recauchutados	4,33	3,99%
	Diagonais novos	1,31	29,19%
	Pneus-esteiras	3,76	2,84%

O pneu-esteira foi o qual apresentou a menor variação no índice de avanço nos três níveis de pressão, perfazendo assim que a variação na pressão de inflação não influenciou na circunferência de rolamento e diâmetro externo. A baixa variação nos valores de avanço do pneu-esteira está relacionada ao tipo construtivo do pneu, onde grande parte da massa do trator é suportada pela carcaça do pneu e não pelo ar contido no seu interior, diferentemente dos demais tipos construtivos de pneus agrícolas em que o ar é quem suporta a carga e a carcaça dentre outras funções tem papel de conter o ar interno.

Os valores de avanço cinemático observados estão dentro da faixa de valores considerados benéficos para desempenho operacional do trator é que de 1% a 5%. O valor mínimo obtido foi de 1,31% com os pneus diagonais novos na condição de baixa pressão e o valor máximo de avanço foi de 4,66% com os pneus diagonais

4.1.2 Área de contato dos pneus

Os resultados para a área de contato (Figura 22) demonstram que o pneu-esteira apresentou maior área de contato que os pneus diagonais novos e recauchutados, os pneus-esteiras traseiros na baixa pressão de 62 kPa apresentaram a maior área de 0,64 metros quadrados (m²). As maiores áreas de contato para todos os modelos de pneus foram obtidas na condição de baixa pressão. Os pneus diagonais recauchutados dianteiros apresentaram a menor área de contato de 0,20 m² na condição de alta pressão de 152 kPa.

A variação da pressão de inflação em alguns modelos não influenciou nos valores das áreas de contato, evidenciando que, nestes intervalos o aumento da pressão não causou alteração. Nos níveis de baixa pressão de 124 kPa e média de 138 kPa os valores das áreas de contato foram iguais a 0,28 m² para os pneus diagonais recauchutados dianteiros. Este fato, também foi evidenciado nos pneus diagonais novos traseiros no nível de baixa pressão de 138 kPa e média pressão de 152 kPa, onde os valores das áreas de contato apresentaram o valor de 0,40 m². Os pneus-esteiras dianteiros nos níveis de média pressão de 55 kPa e alta pressão de 69 kPa, apresentaram as áreas 0,32 m².

Os pneus diagonais novos dianteiros no nível médio de pressão de 138 kPa apresentaram os mesmos valores das áreas de contato dos pneus-esteiras dianteiros na condição de alta pressão de 69 kPa, ou seja, os pneus diagonais novos utilizaram uma pressão 50% maior que o pneus-esteiras. Neste caso, fica evidente o quanto a pressão de inflação e o tipo construtivo do pneu influenciam no valor da área de contato.

Segundo Diserens (2009) os compostos orgânicos e inorgânicos, posicionamento das lonas que constitui a carcaça do pneu, geometria das garras, largura e comprimento da banda de rodagem e a pressão de inflação recomendada influenciam diretamente na área de contato. As maiores áreas de contato para todos os modelos foram obtidas na condição de baixa pressão, com as seguintes combinações pneus diagonais recauchutados dianteiros 124 kPa e 138 kPa pneus traseiros, foi obtido pneus diagonais novos dianteiros 124 kPa e 138 kPa pneus traseiros e pneus-esteiras dianteiros 41 kPa e 62 kPa pneus traseiros.

A quantidade de ar atmosférico aplicado no interior de um pneu, está intimamente ligado na intensidade que as moléculas de ar pressionam as paredes e camadas internas do pneu ou da câmara de ar, resultando na capacidade de flexão das laterais da carcaça. De modo que, utilizar pressões de inflação abaixo das recomendadas pelos fabricantes pode gerar redução da área de contato, pelo fato de a incidência de carga sobre o pneu ser transferida para a carcaça pela falta de ar, assim sobrecarregando os talões de forma que toda a carga seja acumulada sobre os talões, fazendo que

apenas as laterais da banda de rodagem toquem o solo, e o centro da banda de rodagem não toque mais o solo. O efeito inverso pode ocorrer na aplicação de alta pressão nos pneus, fazendo com que o excesso de ar pressione as paredes internas do pneu ao ponto de as laterais ficarem rígidas e apenas o centro da banda rodagem entrar em contato com solo. Os relatos discorridos acima ocorrem com os diagonais e radiais, os pneus-esteiras foram projetados para mitigar as falhas resultante das incorretas aplicações de pressões que impactam diretamente na área de contato dos pneus agrícolas convencionais.



Figura 22. Área de contato (m^2) dos pneus dianteiros e traseiros para os três tipos de pneus avaliados.

A área de contato está estreitamente relacionada ao grau de compactação do solo e a eficiência operacional e energética do trator. De acordo com Diserens et al. (2011) que avaliaram tratores em operações de preparo do solo. Os resultados obtidos por esses autores evidenciaram que os menores índices de patinação e consumo de combustível foi devido ao uso de pneus agrícolas de maior diâmetro externo, largura da banda de rodagem e quando foi aplicado a mínima pressão de inflação recomendada pelos fabricantes, todos esses fatores combinados resultaram em uma maior área de contato da banda de rodagem com o solo.

Os pneus diagonais novos e recauchutados foram montados com a quantidade de 75% de lastro líquido e câmara de ar o uso este item é obrigatório nos pneus conceituados com *tube type*, ou seja, não possuem o *linner* que é uma estrutura interna com a função de uma câmara de ar nos pneus conceituados com *Tubeless*. Na literatura científica não existem trabalhos que correlacionam redução da flexão lateral e da área de contato da banda de rodagem devido a utilização da câmara de ar. Segundo Kumar et al. (2018) a utilização de lastro líquido nos pneus agrícolas decorre na redução da

área de contato devido a minimização da flexão das laterais dos pneus, sendo os pneus de construção radial mais sensíveis ao uso da lastragem líquida.

4.1.3 Raio e espaço de giro

Os resultados obtidos para o raio de giro, característica dimensional que reflete na manobrabilidade do trator, encontram-se na Tabela 14. Quando equipado com os pneus-esteiras o trator apresentou maior raio e espaço de giro, sendo respectivamente da ordem de 3,7% para a condição sem freio e sem acionamento da TDA; 33,4% (com freio e sem TDA) e 9,4% na condição sem freio e com acionamento da TDA. Este maior raio e espaço de giro encontrado para o trator com pneus-esteiras se deve ao fato de que estes pneus apresentam largura superior aos diagonais, sendo 7,7 cm (dianteiros) e 16,5 cm (traseiros) mais largos que os pneus diagonais novos, correspondendo a 38% e 52%, respectivamente.

Em relação à simetria do raio de giro (ISrg, Tabela 15), de acordo com a norma NBR ISO 789-3:2016 (ABNT, 2016), o ideal que o trator apresente valores próximos para os raios de giro à esquerda e à direita, resultando em ótima simetria. No entanto, em todas as configurações avaliadas o ISrg foi classificado como regular ou deficiente, com valores de ISrg superiores a 6%, indicando que o trator apresentava uma diferença considerável no seu raio de giro à esquerda e direita, independentemente dos pneus utilizados.

Tabela 14. Raio de giro médio para o trator equipados com três tipos de pneus.

Pneu	Sem freio e sem TDA		Com freio e sem TDA		Sem freio e com TDA	
	RGE	RGD	RGE	RGD	RGE	RGD
Diagonal recauchutado	4,03	8,05	3,50	7,00	4,48	8,96
Pneu-esteira	4,16	8,31	4,67	9,34	4,90	9,80
Diagonal novo	4,01	8,03	3,50	7,01	4,49	8,98

RGE: Raio de giro esquerdo, RGD: Raio de giro direito.

Tabela 15. Valores e classificação quanto à qualidade do índice de simetria do raio de giro para o trator equipados com três tipos de pneus.

Pneu	Sem freio e sem TDA		Com freio e sem TDA		Sem freio e com TDA	
	ISRG (%) – Qualidade					
Diagonal recauchutado	1,87	Regular	2,20	Deficiente	6,20	Deficiente
Pneu-esteira	9,16	Deficiente	2,28	Deficiente	1,28	Regular
Diagonal novo	1,78	Regular	1,77	Regular	1,28	Regular

4.1.4 Patinagem dos rodados

Nas operações de preparo de solo e pulverização os pneus recauchutados, na alta pressão, proporcionaram o maior índice de patinagem (Figura 23). Na operação de preparo do solo a redução da pressão de inflação nos pneus diagonais recauchutados proporcionou a redução do índice de patinagem, fato esse também observado nos pneus diagonais novos.

O maior índice de patinagem demonstrado pelos pneus diagonais recauchutados pode ser justificado porque os moldes das reformadoras que vão formar o desenho das novas garras não conseguem produzir garras geometricamente assimétricas quando comparadas as garras dos pneus novos o que reflete no menor poder de tração, devido a redução do ângulo de ataque da garra com o solo, associada a menor autolimpeza da banda.

Os pneus-esteiras na operação de escarificação utilizando baixa pressão proporcionaram um índice de patinagem de 19,04%, quando comparado aos demais modelos de pneus na condição de baixa pressão, a patinagem foi respectivamente 48,58 %, 55,99 % menor que os pneus diagonais novos e diagonais recauchutados.

Nas Figuras 23.A e 23.B podemos observar que para todos os modelos de pneus a elevação da pressão de inflação proporcionou o aumento no índice de patinagem. De acordo com Lyasko (1994) a elevação da pressão de inflação dos pneus agrícolas aumenta o índice de patinagem e o consumo de combustível da máquina. Este fato pode ser explicado, porque quando se eleva a quantidade de ar atmosférico dentro da carcaça do pneu as suas laterais perdem flexibilidade o que resulta em uma menor área de contato da banda de rodagem com solo, e conseqüentemente aumento do índice de patinagem.

A quantidade de lastro do trator está estreitamente relacionada ao índice de patinagem. A relação massa/potência do trator com os pneus diagonais novos e recauchutados estavam respectivamente com 40,2 e 40,5 kg/cv. O trator com os pneus-esteiras apresentou a relação massa/potência de 37,3 kg/cv, ou seja, menos 2,9 kg/cv comparando quando o trator estava equipado com os pneus diagonais novos. Na escarificação e pulverização o trator com os pneus-esteiras nas diversas pressões de inflação apresentou menor índice de patinagem quando comparado aos demais modelos de pneus.

Como era previsto a operação de pulverização apresentou menor índice de patinagem dos rodados quando comparado à operação de escarificação, pelo fato da operação de pulverização demandar maior potência do trator pelo eixo da tomada de potência (TDP) e não exigir alto torque

como a operação de escarificação, onde o escarificador está com as suas hastes atuando e rompendo o perfil do solo.

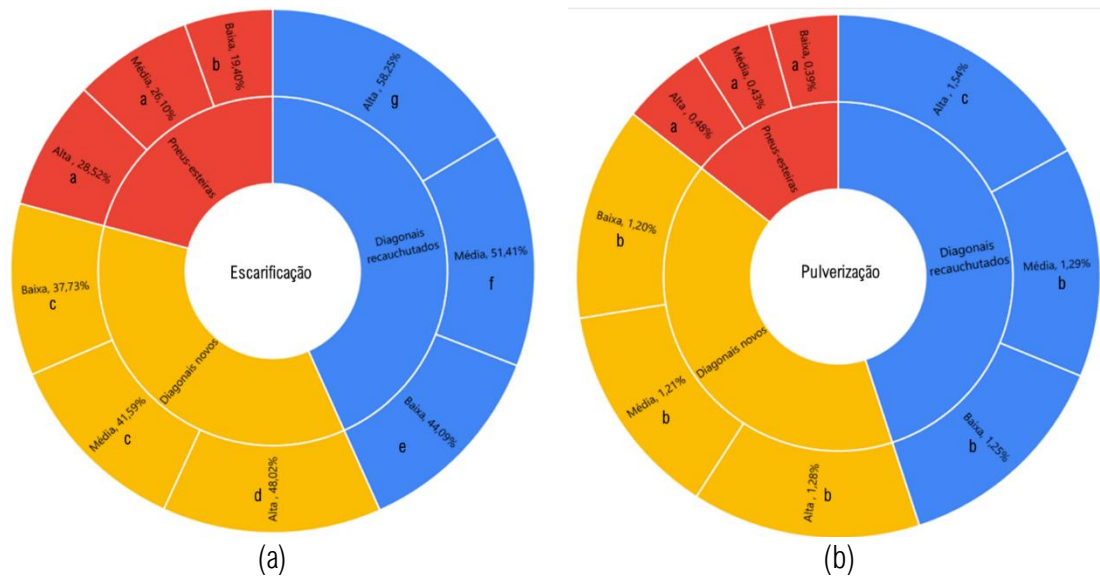


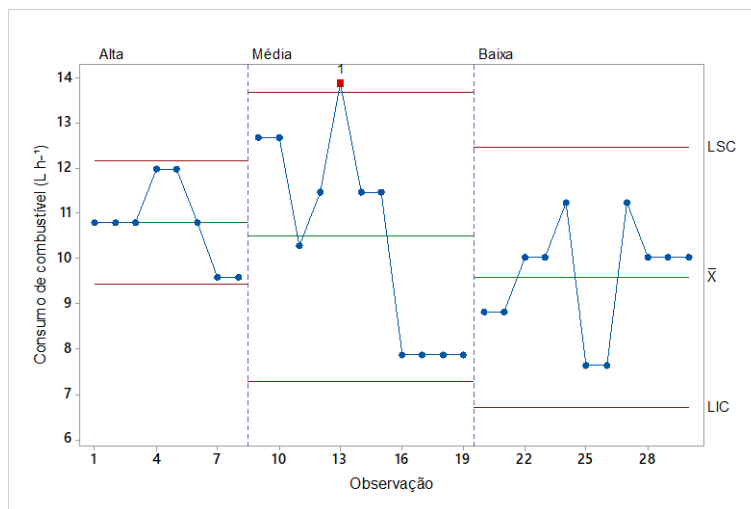
Figura 23. Patinagem dos rodados traseiros nas operações de escarificação e pulverização.

4.1.5 Consumo de combustível

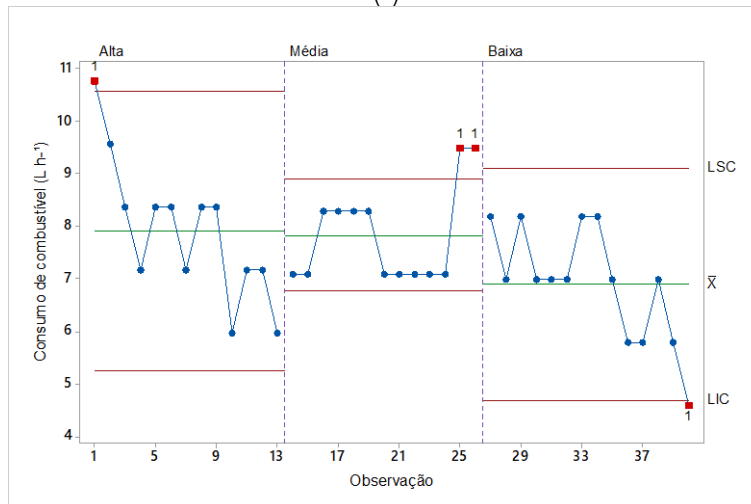
Na operação de escarificação somente o trator quando equipado com os pneus diagonais novos apresentou processos estáveis em todos os níveis de pressão de inflação, com todos os valores de consumo dentro dos limites de controle (Figura 24). Esta estabilidade também foi verificada quando o trator estava com os pneus diagonais recauchutados no nível médio de pressão de inflação. Já quando foram utilizados os pneus-esteiras os processos foram instáveis em todos os níveis de pressão de inflação. No entanto, mesmo apresentando pontos fora de controle, o trator equipado com os pneus-esteiras apresentou menor variabilidade no consumo horário de combustível em relação ao uso de pneus diagonais, novos ou recauchutados, exceto para o nível alto de pressão. Isso pode ser explicado pelo fato de que os pneus-esteiras são projetados para trabalhar com níveis mais baixos de pressão de inflação, devido suas laterais terem sido desenhadas e os compostos químicos nelas utilizadas para a obtenção da máxima flexibilidade. Quando os pneus-esteiras recebem uma alta pressão as suas laterais perdem a flexibilidade resultando em uma menor área de contato das garras da banda de rodagem com o solo. A banda de rodagem dos pneus-esteiras é classificada como R1W. Nas bandas de rodagem R1W as garras possuem 25% mais de altura quando comparadas as garras R1 e entre as suas garras existem algumas elevações. Essas características da banda R1W faz as suas garras penetrarem mais facilmente nos solos com alto teor de água e com a camada superficial

desagregada. As elevações entre as garras têm a função de promover a autolimpeza da banda, ou seja, expulsando todo o solo aderido a banda em uma curta distância percorrida. Nos solos mais compactados e com baixa quantidade de água a banda de rodagem R1W associada aplicação de alta pressão de inflação perde penetração das garras ao solo, resultado no aumento de consumo de combustível e índice de patinagem.

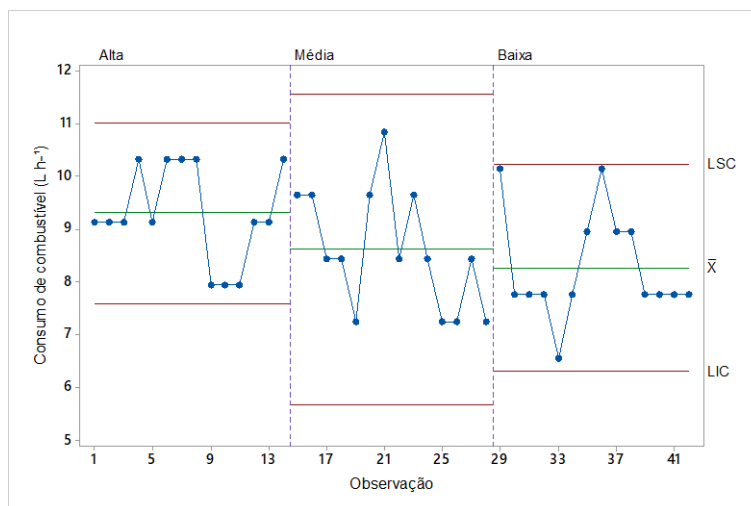
A menor variabilidade do consumo de combustível durante a escarificação foi obtida com o nível médio de pressão de inflação para o trator com pneus-esteiras, e com o nível alto de pressão de inflação para os pneus diagonais recauchutados e novos.



(a)



(b)



(c)

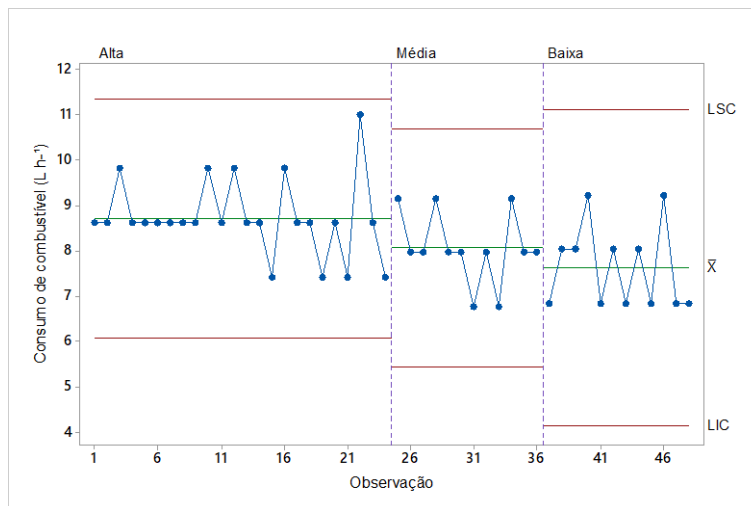
Figura 24. Consumo de combustível na operação de escarificação para o trator equipado com três níveis de pressão de inflação dos pneus: a) diagonais recauchutados; b) pneus-esteiras; c) diagonais novos. LSC: limite superior de controle, LIC: limite inferior de controle, \bar{x} : média dos valores individuais.

Ao analisarmos a média do consumo horário de combustível constatamos que o trator equipado com pneus esteiras apresentou menores médias, tanto em relação ao uso de pneus diagonais recauchutados (-27%, -25% e -27% para os níveis de pressão de inflação alta, média e baixa, respectivamente), quanto aos diagonais novos (-15%, -10% e -15%; alta, média e baixa, respectivamente). O baixo consumo de combustível dos pneus-esteiras quando comparados aos pneus diagonais, pode ser atribuído ao fato da desagregação da superfície do solo, antes da operação de escarificação na área foi realizada uma gradagem pesada que desagregou a superfície do solo. Os pneus-esteiras devido as suas características construtivas têm maior capacidade de se modelar e projetar no solo uma área de contato retangular que resulta em maior poder de tração, baixo índice de patinagem e menor consumo de combustível. Os pneus diagonais possuem laterais rígidas o que lhe conferem menor poder da banda de rodagem se moldar a superfície de solo, assim a resistência ao rolamento é maior nesse tipo de pneu e o trator tem que desprender maior gasto energético para conseguir a vencer a resistência imposta pelo implemento. O trator utilizando os pneus-esteiras, operou com uma massa de 245 kg menor, comparado ao trator equipado com os pneus diagonais novos. Robot et al. (2024) concluíram que o excesso de lastro metálico ou líquido no trator e nos pneus reduzem a vida útil ou quebra dos componentes da transmissão, redução final, das garras dos pneus e aumento no consumo de combustível horário.

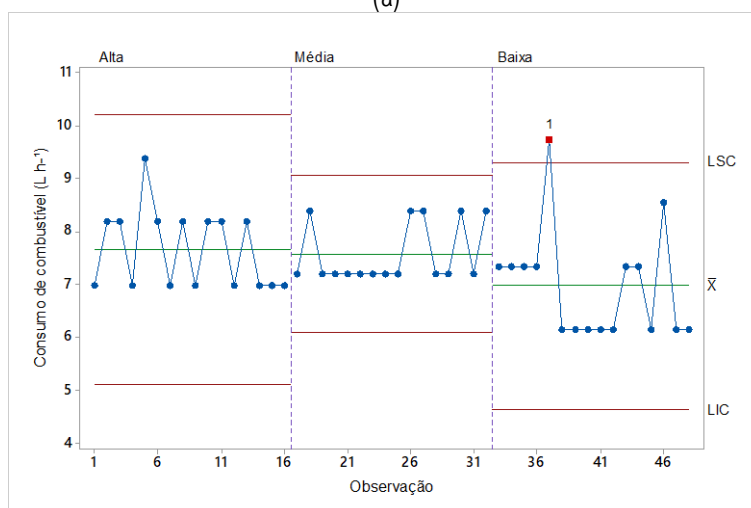
Quando observamos os resultados para a operação de pulverização notamos que somente o trator equipado com os pneus-esteiras no nível de baixa pressão de inflação apresentou processo

instável, com um valor de consumo fora dos limites de controle (Figura 25), sendo os processos considerados estáveis para todas as demais configurações.

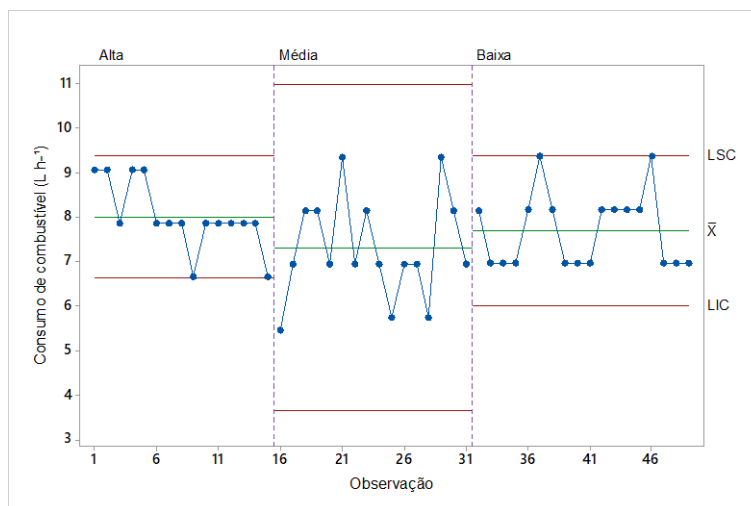
Na pulverização o trator quando equipado com os pneus-esteiras apresentou menor variabilidade no consumo horário de combustível em relação ao uso de pneus diagonais, novos ou recauchutados, para todos os níveis de pressão de inflação, exceto o nível alto utilizado nos pneus diagonais novos. Isso pode ser explicado pelo fato de que quando se aplica maior quantidade de pressão nos pneus-esteiras a flexão das suas laterais são minimizadas e a capacidade de flexão do pneu-esteira pode se assemelhar a flexibilidade das laterais do pneu diagonal e conseqüentemente ocorrer variação no consumo de combustível devido a redução da área de contato da banda com o solo, principalmente devido as características heterogêneas da superfície do solo.



(a)



(b)



(c)

Figura 25. Consumo de combustível na operação de pulverização para o trator equipado com três níveis de pressão de inflação dos pneus: a) diagonais recauchutados; b) pneus-esteiras; c) diagonais novos.

Nos solos com baixo teor de água os pneus diagonais que possuem garras baixas conseguem melhor desempenho, neste ensaio a banda de rodagem dos pneus diagonais novos dianteiros eram compostas por garras alternadas curtas e longas. As garras dos pneus diagonais novos traseiros eram todas garras longas. Altura das garras dos pneus diagonais dianteiros e traseiros novos são respectivamente 14 e 11 mm mais baixas quando comparada altura das garras dos pneus-esteiras. A geometria e altura dessas garras tem como benefício aumento do poder de tração devido a menor resistência ao rolamento, principalmente em operações que não demandam elevado torque, como no caso da pulverização.

Assim como na escarificação, a menor variabilidade do consumo de combustível durante a pulverização foi obtida com o nível médio de pressão de inflação para o trator com pneus-esteiras, e com o nível alto de pressão de inflação para os pneus diagonais recauchutados e novos.

Para a média do consumo horário de combustível durante a pulverização observamos que o trator equipado com pneus esteiras apresentou menores médias, tanto em relação ao uso de pneus diagonais recauchutados (-11%, -6% e -8% para os níveis de pressão de inflação alta, média e baixa, respectivamente), quanto aos diagonais novos (-4% e -9%; para os níveis de pressão de inflação alta e baixa, respectivamente). Porém, no nível de pressão média o trator com pneus diagonais novos apresentou consumo 4% inferior em relação ao uso dos pneus-esteiras. A operação de pulverização tem menor demanda torque e tração quando comparado a operação de escarificação, devido a essa menor exigência de tração conforme já discutido o pneu diagonal possui garras mais baixas o que

melhora o seu deslocamento sobre o solo mais seco e firme, e as garras mais baixas tem menor movimentação em seu corpo quando entram em contato com o solo, enquanto as garras do pneu-esteira devido a sua maior altura tem mais movimentações no seu corpo que chegam a formarem estrias nas bases das garras. As movimentações que ocorrem nas garras dos pneus-esteiras provocam uma maior resistência ao rolamento, assim elevando a demanda energética do trator.

Os pneus diagonais novos nas três condições de pressão os processos foram estáveis, porém na pressão alta dois pontos ficaram na linha do LIC e outros dois pontos na ficaram na linha do LSC para pressão baixa. De modo que, a variação das pressões de inflação influenciou no consumo de combustível.

4.2 Experimentos realizados em 2023 e 2024

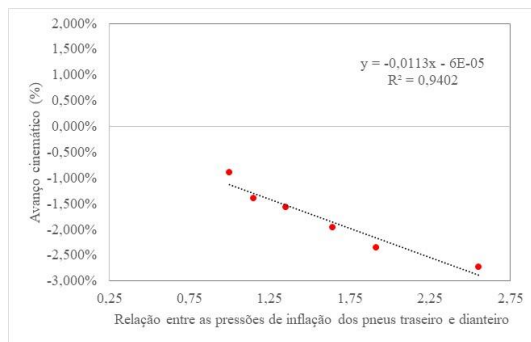
4.2.1 Avanço cinemático de acordo com a variação de pressão

Os valores do avanço cinemático do pneu-esteira estão ilustrados na Figura 22. Foram encontrados avanços positivos apenas em algumas das configurações com pressão nos pneus traseiros de 62 e 41 kPa (Figura 26.f e 26.g, respectivamente). No entanto, apenas para a relação de 0,26 resultante da combinação das pressões aplicadas de 159 kPa nos pneus dianteiros e 41 kPa nos pneus traseiros o valor do avanço cinemático ficou acima de 1%. As demais combinações de pressões apresentaram valores de avanço nulos ou negativos. A combinação de pressão 62 kPa nos pneus dianteiros e 159 kPa nos pneus traseiros apresentou a maior relação de 2,56 como ilustrado na Figura 26.a.

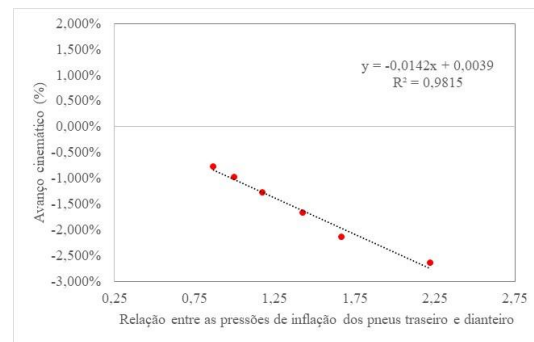
Os resultados indicam que, para o pneu-esteira, é recomendado utilizar a pressão máxima nos pneus dianteiros e a pressão mínima nos pneus traseiros para obtenção de avanço positivo na faixa adequada (1 a 5%), embora nenhum dos valores obtidos tenha se situado próximo ao valor ideal de 2,5%, conforme estabelecido Janulevicius et al. (2017). Em todas as combinações de pressões dos pneus dianteiros e traseiros os valores de R^2 evidenciaram uma alta correlação do avanço cinemático com as relações de pressões, demonstrando que as alterações nas pressões de inflação impactam diretamente no diâmetro e na circunferência de rolamento dos pneus causando alterações significativas nos valores do avanço cinemático. Apenas as relações de pressões que foram utilizadas as 41 e 97 kPa nos pneus traseiros apresentaram uma correlação com o R^2 abaixo de 0,80.

A redução da pressão de inflação dos pneus dianteiros para a pressão mínima de 62 kPa e a elevação para a pressão máxima de 159 kPa nos pneus traseiros, resultou no menor valor de avanço de todas as combinações, ou seja, valor de - 2,73%. Os valores do avanço cinemático referente a

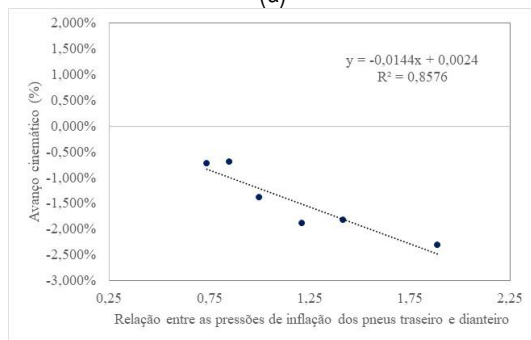
combinação de pressão dos pneus-esteiras estão ilustrados na Figura 27. Quando o índice de avanço estiver abaixo de 1%, ocorre um descompasso na velocidade tangencial das rodas dianteiras versus traseiras, significando que a velocidade das rodas dianteiras é menor que a velocidade das rodas traseiras, ou seja, o eixo traseiro empurra o eixo dianteiro e, parte do torque que está circulando na transmissão retorna ao eixo traseiro; isso provoca sobrecarga na transmissão, podendo resultar em possível quebra dos componentes mecânicos do trator (Battiato and Diserens, 2017).



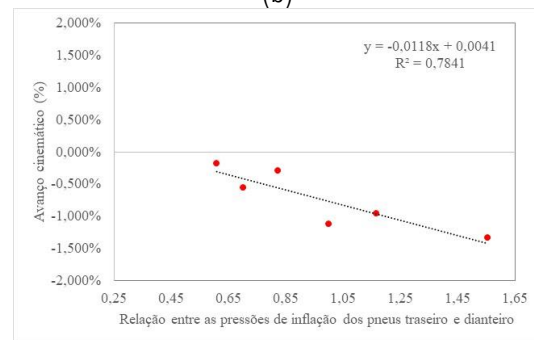
(a)



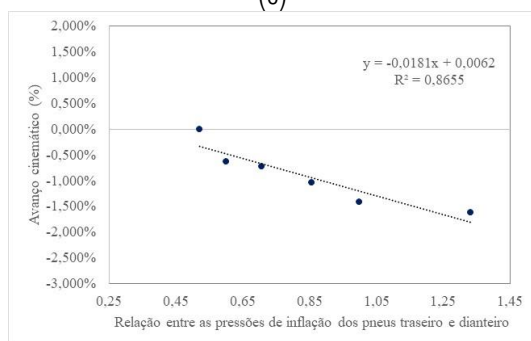
(b)



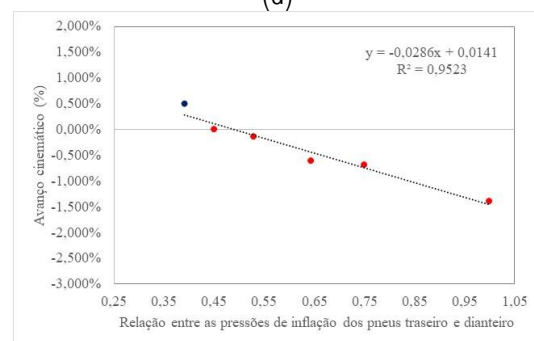
(c)



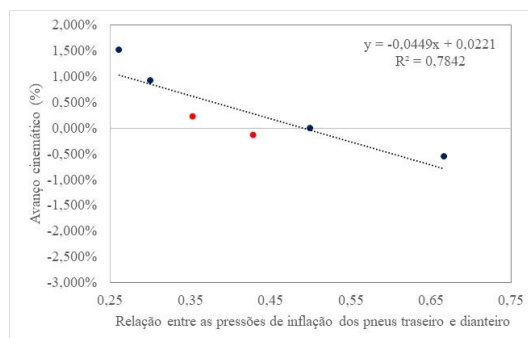
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 26. Valores do avanço cinemático para distintas relações de pressões entre os pneus dianteiros e traseiros do pneu-esteira, para pressão constante no pneu traseiro: a) 159 kPa; b) 138 kPa; c) 117 kPa; d) 97 kPa; e) 83 kPa; f) 62 kPa; g) 41 kPa.

A pressão de inflação é um fator determinante que impacta diretamente no valor do índice de avanço. Quando se altera a pressão interna do pneu, conseqüentemente ocorre uma variação no diâmetro externo dos pneus e esse fator está estreitamente relacionado à diminuição ou elevação na porcentagem do índice de avanço. Dentre outros fatores deve se também levar em consideração o tipo construtivo dos pneus, a distribuição de massa entre os eixos do trator, a carga aplicada sob o rodado e o tipo e condição do solo que os pneus estão se deslocando (Battiato e Diserens, 2015).

Foram analisadas 78 combinações de pressões e os resultados demonstram que apenas duas combinações apresentaram o valor ideal de avanço. Sendo que, 42 combinações apresentaram valores de 0 a 1% e 36 combinações apresentaram valores negativos. Comparando o valor do avanço mínimo de -2,73% em relação ao valor do avanço máximo 1,52% houve uma diferença de 79,27% entre esses valores. Conforme elevou se a pressão dos pneus dianteiros de forma gradativa partindo da pressão mínima de 41 kPa até a pressão máxima de 159 kPa, os valores do avanço foram inversamente proporcionais a elevação da pressão, ou seja, ocorreu a queda nos valores do avanço.

Dois combinações de pressões respectivamente dianteiro e traseiro, 83 kPa versus 41 kPa e 138 kPa versus 62 kPa apresentaram o avanço no valor de 0,00%. Nessas combinações em particular a velocidade tangencial dos pneus dianteiros e traseiros são iguais, significando que o eixo dianteiro não está exercendo tração, sendo que uma das suas funções é auxiliar o eixo traseiro a tracionar. Quando o avanço cinemático é 0,00% o trator durante a operação apresenta maior índice de patinação dos rodados, consumo de combustível e um desgaste acentuado dos pneus traseiros (Lovarelli e Bacenetti, 2017).

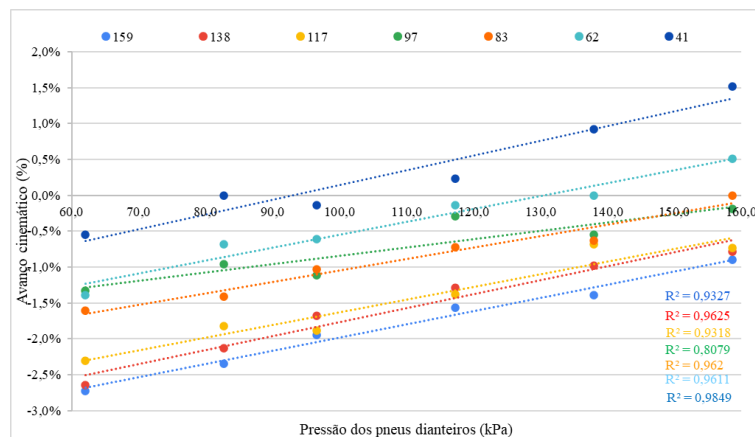


Figura 27. Valores do avanço cinemático nas combinações de pressões (kPa) dos pneus-esteiras dianteiros e traseiros.

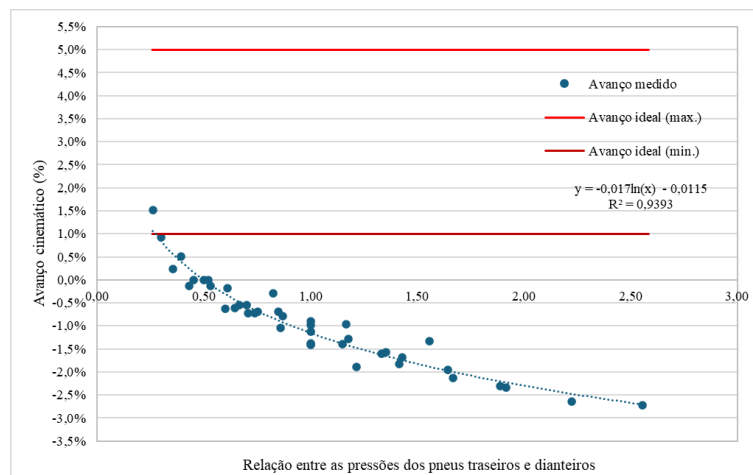


Figura 28. Regressão linear para o avanço cinemático nas pressões (kPa) nos pneus-esteiras dianteiros e traseiros.

Os pneus de construção diagonal apresentaram maiores valores de avanço quando comparados ao pneu-esteira, os valores de avanço dos diagonais estão ilustrados na figura 29. O valor mínimo do avanço obtido foi de 5,75% utilizando a pressão de 255 kPa nos pneus dianteiros e a pressão de 138 kPa nos pneus traseiros, o valor máximo do avanço foi 12,94% esse valor foi obtido utilizando as pressões de 310 kPa nos pneus dianteiros e 83 kPa nos pneus traseiros, a diferença entre o valor mínimo e máximo é de 125,15%. A diferença na variação dos valores de avanço mínimo e máximo entre o pneu diagonal e pneu-esteira foi 45,88%, sendo que, o diagonal teve a maior porcentagem de variação. O valor de avanço varia de acordo com o tipo construtivo da carcaça, dimensões, carga vertical e a pressão de inflação aplicada nos pneus (Cipliene et al., 2019).

Quando utilizou se a pressão mínima de 255 kPa nos pneus dianteiros o valor do avanço foi o menor em todas as combinações de pressões com os pneus traseiros, assim elevando a pressão dos pneus dianteiros resultou no aumento do índice de avanço. Este fato evidencia o quanto a pressão influenciou na circunferência de rolamento e no diâmetro externo dos pneus dianteiros, sendo que esses dois fatores estão intrinsecamente relacionados a variação nos valores do índice de avanço. Além desses dois fatores, podem ser considerados a área de contato e a resistência ao rolamento do pneu (Phakdee e Suvanjmrat, 2023).

A combinação de 255 kPa nos pneus dianteiros e 138 kPa nos pneus traseiros com o avanço de 5,75% foi o único valor que se aproximou do valor máximo de avanço recomendado. Quando o avanço cinemático está acima de 5% o eixo dianteiro do trator começa a vibrar e ocorre o desgaste prematuro dos pneus dianteiros (Żebrowski, 2010).

Nos pneus diagonais foram analisadas 50 combinações de pressões e os resultados demonstram que nenhuma das combinações apresentaram o valor ideal de avanço. Sendo que, 20 combinações apresentaram os valores de avanço abaixo 8% e 28 combinações apresentaram valores de avanço acima de 8% e apenas duas combinações apresentaram valores de avanço acima de 12%.

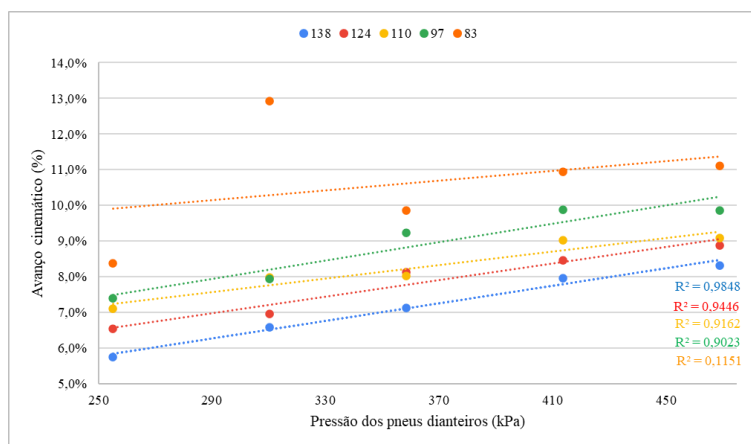


Figura 29. Valores do avanço cinemático nas combinações de pressões (kPa) nos pneus diagonais dianteiros e traseiros.

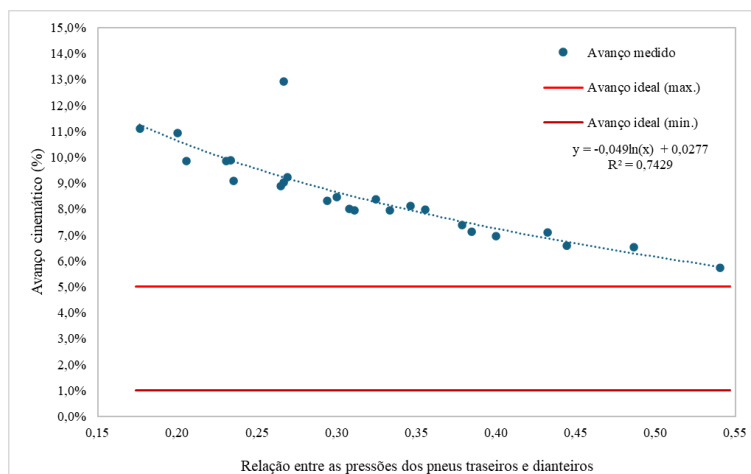


Figura 30. Regressão linear para o avanço cinemático nas pressões (kPa) nos pneus diagonais dianteiros e traseiros.

4.3 Índice de patinagem em operações de preparo do solo

Um processo estável é aquele no qual há somente a variabilidade natural do processo, ou seja, que se encontra sob a ação apenas das chamadas causas comuns. Na Figura 33 estão ilustradas as três operações, na qual a patinagem apresentou uma variabilidade na faixa estável. Os maiores valores de patinagem foram observados na escarificação seguido pela gradagem e aração, sendo que na aração o ponto 32 ficou muito próximo do limite superior de controle (LSC) e o ponto 31 apresentou o menor valor de patinagem próximo a zero e outros 9 pontos estão entre a média dos valores e limite inferior de controle (LIC). O maior valor de patinagem foi de 44% e o menor foi 5%. Os valores da patinagem entre as operações variaram devido a maneira com que cada órgão ativo dos implementos age sobre a estrutura física do solo, no caso do escarificador as hastes operam numa maior profundidade quando comparado com os implementos dotados de discos que fazem maior desagregação do solo e impõem menor resistência ao deslocamento do trator o que resulta em um menor deslizamento dos rodados sob solo.

Os pneus-esteiras devido as suas características construtivas, permitem o uso de baixa pressão de inflação e as suas laterais possuem alta flexibilidade, conferindo ao pneu maior área de contato da banda de rodagem com o solo, as garras presente na banda possuem geometria para elevar o coeficiente de tração e diminuir a resistência ao rolamento, ou seja, o pneu se molda a superfície do solo. Essas características contribuíram para que todos os pontos nas operações estivessem dentro da estabilidade do processo e na melhoria da capacidade por meio da redução da variabilidade.

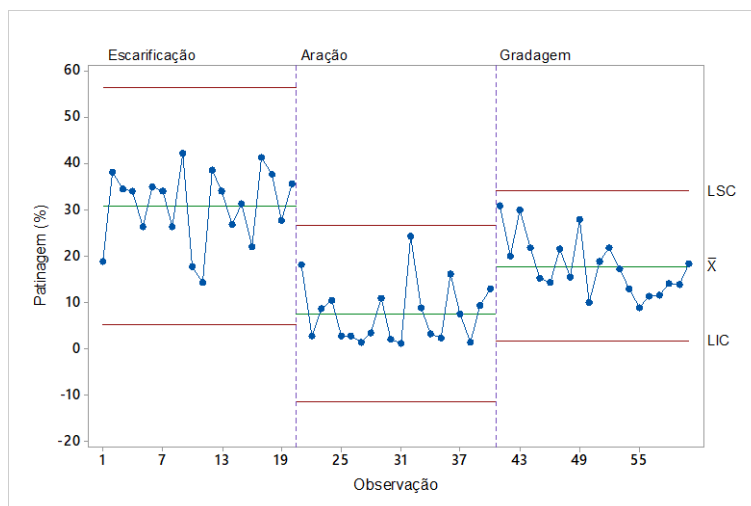


Figura 31. Carta de controle de valores individuais para a patinagem dos rodados do trator utilizando pneus-esteiras nas operações de preparo do solo escarificação, aração e gradagem. LSC: limite superior de controle, LIC: limite inferior de controle, \bar{x} : média dos valores individuais.

A ocorrência de pontos fora dos limites de controle indica a presença de causas especiais durante a operação, resultando na instabilidade do processo. Conforme ilustrado na Figura 30, os pneus diagonais apresentaram LSC superior ao LSC do pneus-esteiras. O ponto 18 da escarificação, o ponto 21 da aração e o ponto 42 da gradagem foram superiores ao LSC, assim gerando um processo instável. A operação de escarificação foi a qual apresentou maior quantidade de pontos próximo à média. A operação de aração foi a qual apresentou os menores valores de patinagem, sendo o ponto 33 que mais ficou próximo LIC.

Nas três operações os pneus diagonais proporcionaram um processo fora de controle estatístico, três pontos ficaram acima do LSC. Os maiores valores de patinagem foram obtidos na operação de escarificação com o valor de 83%. O menor valor apresentado foi de 8% na operação de aração.

Essa instabilidade nos processos está relacionada ao tipo construtivo dos pneus diagonais, eles são pneus com laterais mais rígidas, resultado em menor flexibilidade e conseqüentemente menor área de contato da banda de rodagem e baixa capacidade de se moldar a superfície do solo. Nesses pneus recomenda-se utilizar maior pressão de inflação, montagem com câmara de ar e a utilização de lastragem líquida, assim o seu desempenho é minimizado quando comparado ao pneu-esteira.

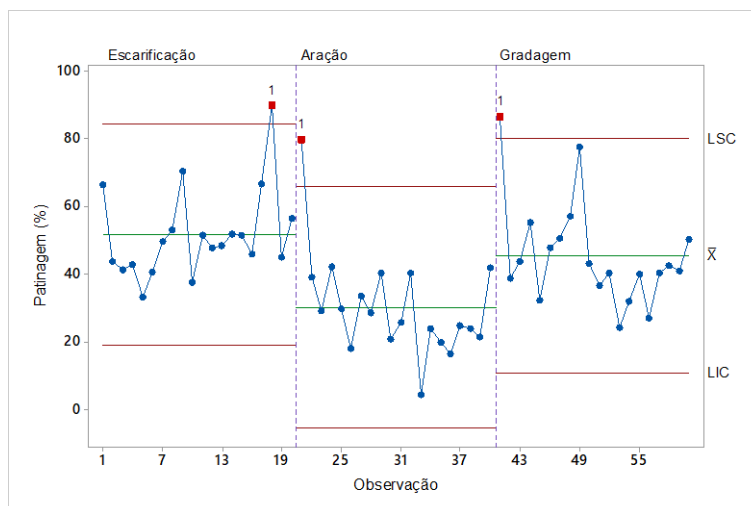


Figura 32. Carta de controle de valores individuais para a patinagem dos rodados do trator utilizando pneus diagonais. LSC: limite superior de controle, LIC: limite inferior de controle, \bar{x} : média dos valores individuais.

A operação com o arado de discos apresentou o menor índice de patinagem nos pneus-esteiras e diagonais, nessa operação o pneu diagonal teve uma patinagem média de 300,80% superior ao pneu-esteira. O escarificador proporcionou o maior índice de patinagem dos rodados para ambos os tipos construtivos de pneus, sendo que o pneu-esteira obteve uma patinagem 67,90% inferior ao pneu diagonal para este implemento. A Nas três operações o pneu diagonal mostrou-se menos eficiente que o pneu-esteira devido ao alto índice de patinagem demonstrado.

4.4 Consumo de combustível

Na Figura 35 está ilustrado o consumo volumétrico (L/h^{-1}) do trator equipado com os pneus-esteiras, nas operações de escarificação e gradagem todos os pontos estão situados entre o LSC e LIC. A operação de escarificação apresenta 14 pontos com o consumo abaixo da média.

O ponto 25 da operação de aração ficou abaixo do LIC, apesar de o processo ser considerado instável de acordo com a óptica do controle estatístico de processo, este possui 98 % dos pontos sob controle. Esta instabilidade está associada a qualidade do combustível utilizado, alguma micropartícula passou pelo sistema de filtragem e ocasionou interferência na leitura realizada pelos medidores de vazão. Foi utilizado no ensaio o diesel S 500, esse tipo de combustível pode apresentar algumas impurezas, essas partículas podem prejudicar a leitura do fluxo de combustível pelo aparelho. Dois pontos apresentaram consumo de combustível iguais e muito próximos do LSC.

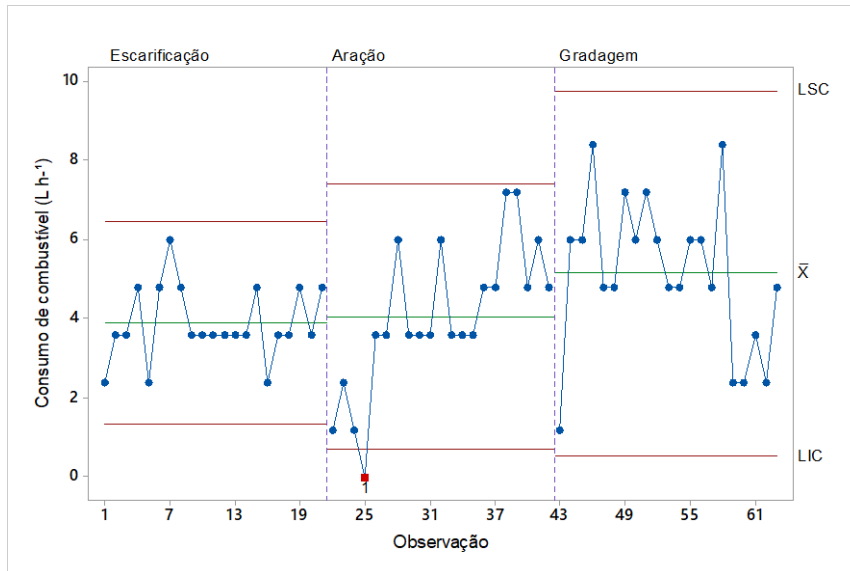


Figura 33. Carta de controle de valores individuais para o consumo de combustível do trator utilizando pneus-esteiras. LSC: limite superior de controle, LIC: limite inferior de controle, \bar{x} : média dos valores individuais.

Conforme ilustrado na Figura 36 as cartas de controle com o consumo de combustível do trator equipado com pneus diagonais nas operações de preparo do solo. Nas operações de escarificação e aração o processo se manteve estável. Na operação de aração 50% dos pontos ficaram acima da média e outros 50% ficaram abaixo da média. A operação de escarificação apresentou o maior volume do consumo de combustível de maneira que 12 pontos ficaram acima da média.

Na gradagem, um ponto acima do LSC tornou o processo instável, porém ocorreu uma elevada variação entre os pontos desde o consumo mínimo até o consumo máximo. Diferentemente dos demais implementos que foram acoplados no sistema de levante hidráulico de três pontos, a grade foi acoplada na barra de tração, nesse tipo de acoplamento ocorre maior perda de potência, torque e eficiência energética da transmissão do trator, neste caso é mais difícil controlar a profundidade de trabalho do implemento, porque ela pode variar devido as características físicas do solo, isto implica na imposição de mais carga e resistência do implemento ao trator, assim a bomba injetora entra em débito e o bico injetor precisa injetar mais combustível para dentro do cilindro para geração de elevada potência e os pistões pressionarem com maior velocidade o virabrequim afim de proporcionar mais torque para o trator vencer a resistência.

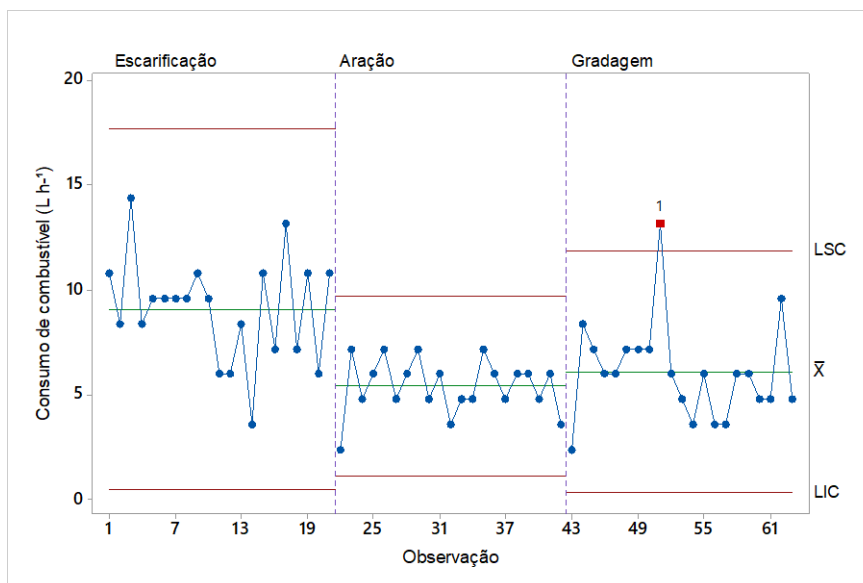


Figura 34. Carta de controle de valores individuais para o consumo de combustível do trator utilizando pneus diagonais. LSC: limite superior de controle, LIC: limite inferior de controle, \bar{x} : média dos valores individuais.

Nos dois pneus foram observados processos fora de controle estatístico, o pneu-esteira teve um ponto na operação de aração que ficou abaixo do LIC. No pneu diagonal na operação de gradagem observou-se um ponto acima do LSC. Nas demais operações os valores ficaram entre o LSC e LIC.

Nas três operações notou-se que o pneu-esteira apresentou menor consumo de combustível do que o pneu diagonal, de forma que a operação de escarificação denotou uma diferença significativa de 127% no consumo entre os pneus. Uma diferença no consumo de 33% foi evidenciada na operação de aração.

6 CONCLUSÃO

6.1 Operações na cultura do café

Os pneus diagonais recauchutados apresentaram os maiores valores de índice de avanço, seguidos pelos pneus-esteiras e pneus diagonais novos.

As maiores áreas de contato foram obtidas no nível de baixa pressão com os pneus-esteiras, a elevação da pressão provocou redução na área de contato. O maior raio e espaço de giro foram obtidos com os pneus-esteiras, na condição sem freio e sem acionamento da TDA,

Na pulverização os modelos de pneus apresentaram menor índice de patinação e consumo de combustível quando comparada a escarificação, os pneus diagonais recauchutados obtiveram o maior índice de patinação na condição de alta pressão.

O consumo de combustível na escarificação foi maior para os pneus recauchutados na condição da média pressão, operação de escarificação somente os pneus diagonais novos apresentaram processos estáveis.

6.2 Experimentos realizados em 2023 e 2024

O pneu-esteira apresentou apenas duas combinações de pressões entre os pneus dianteiros e traseiros que proporcionaram a porcentagem de avanço considerada ideal, as demais combinações apresentaram valores de avanço abaixo de 1% e negativos.

Nas três operações o índice de patinagem dos pneus diagonais proporcionou um processo fora de controle estatístico diferentemente do pneu-esteira onde o processo foi considerado estável.

O pneu-esteira apresentou menor consumo de combustível nas três operações, sendo que, a operação de gradagem para o pneu diagonal o processo foi considerado instável e no pneu-esteira a operação aração o processo foi considerado fora do controle estatístico. Na operação de escarificação denotou-se uma diferença significativa de 127% no consumo entre os pneus.

Essa nova concepção de pneu-esteira proporcionou aos tratores mais eficiência operacional quando comparado ao pneu diagonal.

7 REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR ISO 789-3 2016 Tratores agrícolas – Procedimentos de ensaio. Parte 3: Diâmetros de giro e do espaço de giro. 12-15 p

Andriolli I, Centurion JF. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Brasília, 1999. **Anais...** Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p.1-4.

AGCO (2024) Parts book of the tractors. 3: 87-89

Azimi NH, Karparvarfard SH, Naderi MB, Koushkaki RH (2019) Combined finite element and statistical models for predicting force components on a cylindrical mould board plough. **Biosystems Engineering** 186:168-181.

Barbosa JA, Vieira LB, Dias GP, Júnior, MSD (2005) Desempenho operacional de um trator agrícola equipado alternadamente com pneus radiais e diagonais. **Engenharia Agrícola** 25:474-480.

Battiato A, Diserens E (2015) Influence of tyre inflation pressure and wheel load on the traction performance of a 65 kW MFWD tractor on a cohesive soil. **Journal of Agricultural Science** 5:197–215.

Battiato A, Diserens E (2017) Tractor traction performance simulation on differently textured soils and validation: a basic study to make traction and energy requirements accessible to the practice. **Soil and Tillage Research** 166:18–32.

Cipliene A, Gurevicius P, Janulevicius A, Damanauskas V, (2019) Experimental validation of tyre inflation pressure model to reduce fuel consumption during soil tillage. **Biosystems Engineering** 186: 45–59.

Cutini M, Costa C, Brambilla M, Bisaglia C (2022) Relationship between the 3D footprint of an agricultural tire and drawbar pull using an artificial neural network. **Engineering in Agriculture ASABE** 38:293-301.

Diserens E, Défossez P, Duboisset A, Alaoui A (2011) Prediction of the area of agricultural traction tyres on firm soil. **Biosystems Engineering** 110: 73-82.

Diserens E (2009) Calculating the contact area of trailer tyres in the field. **Soil & Tillage Research** 103: 302-309.

Ekinci S, Çarman K, (2017) Effects of some properties of drive tires used in horticultural tractors on tractive performance. **Journal Agricultural Science** 23:84–94.

Firestone (2022) Technical Databook Agricultural Tyres. 3: 85-89.

Galileo Cup Wheel (2024) Tire Catalog Agriculture 2: 18-21.

Janulevicius A, Gurevicius P (2019) Impact of the inflation pressure of the tires on lead of front drive wheels and movement resistance force of tractors. **Transport** 34:628–638.

Janulevicius A, Damanauskas V, Pupinis G (2018) Effect of variations in front wheels driving lead on performance of a farm tractor with mechanical front wheel drive. **Journal of Terramechanics** 77:23-30.

Janulevicius A, Pupinis G, Lukstas J, Damanauskas V, Kurkauskas V (2017) Dependencies of the lead of front driving wheels on different tire deformations for a MFWD tractor. **Transport** 32:23-31.

Janulevicius A, Damanauskas V (2015) How to select air pressures in the tires of MFWD (mechanical front-wheel drive) tractor to minimize fuel consumption for the case of reasonable wheel slip. **Energy** 90:691-700.

Lyasko MI (1994) The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tyre on a rigid surface. **Journal of Terramechanics**. 31:239-246.

Kim WS, Kim YS, Kim TJ, Park SU, Choi Y, Choi IS, Kim YK, Kim YJ (2019) Analysis of power requirement of 78 kW class agricultural tractor according to the major field operation. **Korean Society of Mechanical Engineers** 43:911-917.

Kolator BA. (2021) Modeling of tractor fuel consumption. **Energies** 14: 274-280.

Kumar S, Noori MT, Pandey KP (2019) Performance characteristics of mode of ballast on energy efficiency indices of agricultural tyre in different terrain condition in controlled soil bin environment. **Energy** 182: 48-56.

Kumar S, Pandey KP, Kumar R, Kumar AA (2018) Effect of ballasting on performance characteristics of bias and radial ply tyres with zero sinkage. **Measurement** 121:218-24.

Kumar AA, Tewari VK, Gupta C, Pareek CM (2017) A device measure wheel slip to improve the fuel efficiency of off-road vehicles. **Journal of Terramechanics** 70: 1-11.

Lovarelli D, Fiala M, Larsson, G (2018) Fuel consumption and exhaust emissions during on-field tractor activity: A possible improving strategy for the environmental load of agricultural mechanization. **Computer Electronic. Agriculture**. 151, 238-248.

Lovarelli D, Bacenetti J (2017). Bridging the gap between reliable data collection and the environmental impact for mechanised field operations. **Biosystems Engineering** 160:109-123.

Márquez L (2012). Tractores agrícolas: Tecnología y utilización. Madrid B&H Editores 1v. 452p.

Mattetti M, Varani M, Paolini F, Molari G (2020) Tractive performance of Trelleborg PneuTrac tyres. **Journal of Agricultural Engineering** 28:62-69.

Michelin (2023). Technical Manual Agriculture Tires, 120-123.

Mitas (2023). Technical Manual Agriculture Tires, 241-244.

Moinfar A, Shahgholi G, Gilandeh YA, Gundoshmian TM (2020) The effect of the tractor driving system on its performance and fuel consumption. **Energy** 202:58-64.

Moitzi G, Haas M, Wagenristl H, Boxberger J, Gronauer A (2013) Energy consumption in cultivating and ploughing with traction improvement system and consideration of the rear furrow wheel-load in ploughing. **Soil and Tillage Research** 134:56–60.

Montgomery DC (2009) Introduction to Statistical Quality Control. 6th Edition, John Wiley & Sons, New York.

Nokian Heavy Tyres (2024). Technical Manual, 24-27.

Ohio State University (2018). First tests of tractors and agricultural tires, 35-49.

Osinenko PV, Geissler M, Herlitzius T (2015) A method of optimal traction control for farm tractors with feedback of drive torque. **Biosystems Engineering** 129:20–33.

Pentos K, Pieczarka K (2017) Applying an artificial neural network approach to the analysis of tractive properties in changing soil conditions. **Soil and Tillage Research**. 165, 113–120.

Phakdee S, Suvanmratt C (2023) Development of a tire machine for evaluating the performance of tractor tires based on the soil compaction. **Journal of Terramechanics** 110:13-25.

Regazzi N, Maraldi M, Molari G (2019) A theoretical study of the parameters affecting the power delivery efficiency of an agricultural tractor. **Biosystems Engineering** 186:214-217.

Robat AB, Arezoo K, Alipour K, Tarvirdizadeh B (2024) Dynamics modeling and path following controller of tractor-trailer-wheeled robot considering wheels slip. **ISA Transactions** 148:45-63.

Shafaei SM, Loghavi M, Kamgar S (2022) An Experimental Investigation of Drawbar Pull Performance of Front Wheel Assist Tractors. **Indian National Academy of Engineering** 7:1369–1380.

Shafaei SM, Loghavi M, Kamgar S (2020) Ascertainment of driving lead of tractor front wheels as loaded by draft force. **Measurement** 165:108-134.

Soylu S, Carman K (2021) Fuzzy logic based automatic slip control system for agricultural tractors. **Journal Terramechanics** 95: 25-32.

Schlosser JF, Linares P, Márquez L (2004) Influence of the kinematics advance on the traction efficiency of the front wheel assist tractor. **Ciência Rural** 34:1801-1805.

Taghavifar H, Mardani A (2015) Evaluating the effect of tire parameters on required drawbar pull energy model using adaptive neuro-fuzzy inference system. **Energy** 85:586–593.

Trelleborg (2022). Technical Manual Agriculture Tires, 72-73.

Venkatesan V, Nallusamy N, Nagapandiselvi P (2021) Performance and emission analysis on the effect of exhaust gas recirculation in a tractor diesel engine using pine oil and soapnut oil methyl ester. **Fuel** 290:120-127.

Xiao MH, Zhao J, Wang YW, Zhang HJ, Lu ZX, Wei WH (2018) Fuel economy of multiple conditions self-adaptive tractors with hydro-mechanical CVT. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** 11:102-109.

Xue L, Jiang X, Zhao Y, Wang J, Wang G, Xiao W (2022) Fault diagnosis of wet clutch control system of tractor hydrostatic power split continuously variable transmission. **Computers and Electronics in Agriculture** 194:106-112.

Żebrowski J (2010) Traction efficiency of a wheeled tractor in construction operations. **Automation in Construction** 19:100-108.