

Recital

Revista de Educação,
Ciência e Tecnologia de Almenara/MG.

RELAÇÃO CINEMÁTICA ENTRE EIXOS MOTRIZES E EFICIÊNCIA EM TRAÇÃO DE UM TRATOR AGRÍCOLA: UM ESTUDO DE CASO

*Kinematic relationship between drive axles and traction efficiency of an agricultural
tractor: a case study*

Alexandre RUSSINI

Universidade Federal do Pampa
alexandrerrussini@unipampa.edu.br

José Fernando SCHLOSSER

Universidade Federal de Santa Maria
josefernandoschlosser@gmail.com

Catize BRANDELERO

Universidade Federal de Santa Maria
catize.brandelero@ufsm.br

Marcelo Silveira de FARIAS

Universidade Federal de Santa Maria
silveira_farias@hotmail.com

Gilvan BERTOLLO

Universidade Federal de Santa Maria
gilvanbertollo@yahoo.com.br

Rovian BERTINATTO

Universidade Federal de Santa Maria
engrovian@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.46636/recital.v6i1.363>



Resumo

O trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência em tração de um trator agrícola operando com diferentes relações cinemáticas, decorrentes da variação das pressões interna dos pneus e distribuição de massas sobre o eixo dianteiro, a partir de um estudo de caso. Para isto, foi utilizado um trator teste da marca John Deere, modelo 6415, com potência máxima do motor de 79,5 kW a 2.300 rpm, transmissão hidrostática e tração dianteira auxiliar (TDA), equipado com instrumentação eletrônica para aquisição de dados. O experimento foi conduzido em delineamento blocos ao acaso com arranjo trifatorial (2 x 3 x 3), proveniente da interação de duas superfícies (solo firme com cobertura vegetal e solo preparado), três pressões internas dos pneus (100, 160 e 200 kPa) e três distribuições estáticas de massa sobre o eixo dianteiro (41, 45 e 49%), disposto em parcelas subdivididas com três repetições. Os resultados demonstram que houve interação somente entre o fator superfície e massa sobre o eixo dianteiro, sendo que a relação cinemática que se traduz em maior eficiência em tração ocorre em condições de solo firme com distribuição de 45% da massa total do trator sobre o eixo dianteiro, diferindo das demais. Na condição de solo preparado as diferenças referentes à relação cinemática e eficiência em tração foram 1,77% inferior e 19,29% superior à condição de solo firme, respectivamente. No entanto, a relação cinemática adequada ocorre na distribuição de 41% da massa sobre o eixo dianteiro, sendo as demais consideradas acima dos valores tecnicamente recomendados para as condições que o experimento foi realizado.

Palavras-chave: Pneus agrícolas. Tração dianteira auxiliar. Avanço cinemático.

Abstract

This work aims to evaluate the traction efficiency of an agricultural tractor operating with different kinematic relationships, resulting from the variation of the internal pressure of the tires and mass distribution on the front axle, based on a case study. For this, a John Deere test tractor, model 6415, with maximum engine power of 79.5 kW at 2,300 rpm, hydrostatic transmission and auxiliary front-wheel drive (2WD), equipped with electronic instrumentation for data acquisition, was used. The experiment was carried out in a randomized block design with a three-factor arrangement (2 x 3 x 3), resulting from the interaction of two surfaces (firm soil with vegetation cover and prepared soil), three internal tire pressures (100, 160 and 200 kPa) and three distributions mass statics on the front axle (41, 45 and 49%), arranged in subdivided plots with three repetitions. The results demonstrate that there was interaction only between the surface and mass factor on the front axle, and the kinematic relationship, which translates into greater traction efficiency, occurs under firm ground conditions with a distribution of 45% of the total tractor mass over the front axle, differing from the others. In the prepared soil condition, the differences regarding the kinematic relationship and traction efficiency were 1.77% lower and 19.29% higher than the firm soil condition, respectively. However, the appropriate kinematic relationship occurs in the distribution of 41% of the mass on the front axle, with the others considered above the technically recommended values for the conditions under which the experiment was carried out.

Keywords: Agricultural tires. Mechanical front wheel drive. Kinematic advance.



INTRODUÇÃO

Na agricultura contemporânea, as máquinas agrícolas são empregadas para realizar diversas atividades ao longo do processo produtivo. O combustível representa elevado custo, o que desperta em muitos produtores rurais um novo olhar quanto ao modo de condução das operações mecanizadas. Desta forma, a adequação dos tratores agrícolas para executar as diferentes operações buscam, em suma, o aumento da eficiência e otimização dos recursos, acolhendo os vitais pressupostos de sustentação da produção primária.

Atualmente, predominam duas configurações de tração dentre os modelos de tratores ofertados no mercado brasileiro: 4 x 2 TDA (Tração Dianteira Auxiliar), no qual o eixo dianteiro pode tracionar quando necessário; e 4 x 4 (Tração Integral), que ocorre de forma permanente nos dois eixos, em geral, dotados de articulação do chassi. Cabe destacar que nos tratores 4 x 2 TDA existe a possibilidade de conectar e desconectar a tração dianteira, a critério do operador, admitindo versatilidade em manobras e menor desgaste dos pneus, o que oportuniza assumir versões diferentes no mesmo trator.

Neste contexto, a adequação dos tratores agrícolas mediante o estudo de diferentes configurações que interferem nos parâmetros de desempenho, é fundamental para o fortalecimento da agricultura moderna, que preza em seus pilares pela racionalização dos insumos, visando à sustentabilidade. Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar, a partir de um estudo de caso, a eficiência em tração de um trator agrícola operando com diferentes relações cinemáticas, decorrentes da variação da pressão interna dos pneus e distribuição de massas sobre o eixo dianteiro, em duas superfícies de deslocamento, sendo em solo firme com cobertura vegetal e solo preparado.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

Conforme Schlosser, Márquez e Linares (2004), a incorporação da tração auxiliar no eixo dianteiro com rodados de menor tamanho acarreta complicações adicionais já que, normalmente, entre os dois eixos do trator não se incorpora um diferencial que compense as diferenças cinemáticas que se produzem entre os rodados dianteiro e traseiro, estabelecendo uma discordância cinemática fixa. Conforme Márquez (2012), isto ocorre porque a transmissão entre ambos os eixos motrizes do trator, unidos cinematicamente entre si, ocorre de forma rígida através da caixa de transferência, de forma que a relação é invariável entre as velocidades angulares dos eixos.

Corroborando, Srivastava, Goering e Rohrbach (1993) destacam que, se não houver um diferencial conectando aos dois eixos, a ligação será rígida e haverá, obrigatoriamente, relação invariável entre as velocidades angulares. Janulevičius e Pupinis (2013) descrevem que as velocidades angulares teóricas dos rodados dianteiro e traseiro serão iguais quando a proporção dos seus raios de rolamento corresponder ao valor da relação de transmissão de velocidade dos eixos dianteiro e traseiro.

Deste modo, Linares, Catalán e Méndez (2006) descrevem que os tratores com TDA possuem uma ligação mecânica entre os eixos dianteiro e traseiro, de forma que o eixo dianteiro possui maior velocidade angular para compensar o menor diâmetro dos seus rodados.



Em síntese, a relação cinemática entre os eixos do trator depende de dois fatores: a relação de velocidade angular entre os eixos e os raios dos rodados dianteiro e traseiro do trator. O primeiro fator é fixo e depende do projeto do fabricante que o estabelece por meio das relações de transmissão entre os dois diferenciais. Geralmente esta relação de velocidades é maior que 1.0, em favor do eixo dianteiro, que gira mais rápido que o traseiro. Quanto ao segundo fator, Schlosser, Márquez e Linares (2001) e Feitosa *et al.* (2015) reportam que consiste no próprio raio dos rodados, que poderá ser alterado pelo usuário, por meio da troca dos pneus e/ou pela variação da distribuição de peso e/ou da pressão interna.

No que tange ao avanço cinemático, este corresponde à expressão da relação cinemática de forma percentual. Conforme Linares, Catalán e Méndez (2006), o avanço cinemático pode variar entre os modelos de tratores, sendo considerado como ideais os valores que estiverem em uma faixa de 1% a 5%. Quando os valores forem inferiores a 1%, a tração dianteira perde eficiência em tração e dificulta a realização de manobras, sendo que valores acima de 5% resultam no desgaste prematuro dos pneus.

Segundo Janulevičius e Pupinis (2013), a incompatibilidade cinemática entre a velocidade angular dos rodados sempre ocorre com máquinas que possuem vários eixos motrizes. Ainda, descrevem que isso ocorre devido à dificuldade de selecionar na transmissão, proporções aos eixos motrizes em que os rodados tenham as mesmas velocidades angulares em todas as condições, principalmente quando possuírem dimensões diferentes. Ademais, Schlosser, Márquez e Linares (2004) descrevem que na condição dinâmica, independente do estado da superfície, são os pneus que absorvem as diferenças entre as velocidades teóricas dos eixos, sendo que em solos firmes, os pneus se desgastarão e/ou suas garras se romperão. Ainda, destacam que o eixo que gira mais rápido terá que encurtar sua circunferência, enquanto o outro que gira mais devagar terá que fazer o contrário.

Por conseguinte, existem ocasiões em que as diferenças das velocidades angulares entre os eixos são grandes, resultando no fenômeno conhecido como *power hop* (SCHLOSSER; MÁRQUEZ; LINARES, 2001), ou “galope” do trator (SCHLOSSER *et al.*, 2020). Alguns procedimentos podem ser realizados para corrigir o *power hop*, sendo o primeiro e o mais simples, a verificação da configuração (tipos e medida) e das pressões internas dos pneus do trator, considerando a recomendação do fabricante.

Quando o trator está em operação, o avanço cinemático e a distribuição de massa entre os rodados interferem diretamente na eficiência em tração. Segundo Neujahr e Schlosser (2001), a eficiência em tração consiste na relação entre as potências de tração e a disponível nos eixos motrizes, sendo que a eficiência evidencia o nível de aproveitamento do trator, isto é, o maior ou menor uso dos recursos na geração de trabalho útil.

Conforme Battiato e Diserens (2013), o desempenho em tração do trator é resultado da interação entre a tensão de deformação dos rodados e a camada superficial do solo. Além disso, os autores relatam que esta interação é afetada por vários fatores como o comportamento mecânico da camada superficial do solo, distância entre eixos, altura da barra de tração, patinamento, bem como a carga incidente sobre os rodados e a pressão interna dos pneus.



Durante o deslocamento do trator, Janulevičius e Pupinis (2013) descrevem que, a força de tração exercida muda a distribuição da carga vertical sobre os eixos dianteiro e traseiro, sendo difícil definir a proporcionalidade na distribuição de massa em condições de trabalho. Desta maneira, Battiato e Diserens (2013) discorrem que a melhoria no desempenho em tração de um trator agrícola, por meio da lastragem ou redução da pressão interna dos pneus, requer uma compreensão mais aprofundada, a fim de definir melhor adequação nas configurações do trator.

2 METODOLOGIA

2.1 TRATOR UTILIZADO NA PESQUISA

Para a realização do experimento foi utilizado um trator John Deere, modelo 6415, com TDA, equipado com motor de ciclo Diesel, de quatro tempos, quatro cilindros e 4.500 cm³ de volume interno deslocado, turbocomprimido que, segundo o fabricante, resulta em 79,5 kW (108 cv) de potência máxima, a 2.300 rpm. A transmissão é do tipo hidrostática (PowrQuad[®]), com 16 marchas à frente e 12 à ré, com velocidade máxima de 30 km h⁻¹, divisor de potência de quatro marchas e inversor assistido com posição de neutro.

O trator estava equipado com pneus radiais, sendo os dianteiros Michelin 16.9 R 24 BIB x M18 T2 134 A8 131B, e os traseiros Michelin 700 18.4 R 38 146 A8 143B, que resultam numa relação de transmissão mecânica entre os eixos motrizes de 1,3828. A massa total do trator foi de 4.830 kgf (47,38 kN), com distribuição estática de massa variando em função dos tratamentos adotados, decorrentes de lastragem hidráulica e metálica.

2.2 EXPERIMENTO DE CAMPO

O estudo de caso foi realizado na localidade de Las Perdices, na cidade de Toledo, Espanha, por pesquisadores do Laboratório de Agrotecnologia, pertencente ao Núcleo de Ensaio de Máquinas Agrícolas da Universidade Federal de Santa Maria. O solo era de textura franco-arenoso, de origem aluvial, sendo a área utilizada predominantemente com o cultivo de culturas anuais em diferentes sistemas de manejo. A umidade média do solo no local do experimento foi de 0,0342 m³ m⁻³ a 0,20 m de profundidade.

Para a aplicação dos níveis de esforços na barra de tração e determinação do desempenho em tração, acoplou-se ao trator teste, um trator freio da marca John Deere, modelo 2800, de 68 kW (92 cv) e massa total de 5.280 kgf (51,79 kN), como unidade de carga constante. A definição da carga aplicada à barra de tração do trator teste ocorreu por meio da seleção de marchas do trator freio, buscando atingir, conforme descrito por Márquez (2012), um coeficiente de aderência de 0,6, para um patinamento médio dos rodados compreendidos entre 11 e 13%.

O experimento do estudo de caso foi conduzido em delineamento estatístico de blocos ao acaso, com arranjo trifatorial (2 x 3 x 3), disposto em parcelas subdivididas, composto pelos fatores superfície, pressão interna dos pneus e distribuição estática de massa. Os níveis de cada fator foram: solo firme, com cobertura vegetal composta por palhada de aveia branca (*Avena sativa*) e solo preparado, com grade aradora, complementado com duas operações de grade niveladora leve; três pressões internas dos pneus (100, 160 e 200 kPa); e três distribuições estáticas de massa sobre o eixo dianteiro (41, 45 e 49%). Para permitir o preparo de solo, bem como evitar o excesso de manobras do trator, o fator superfície constitui as parcelas principais do experimento arranjado no sentido transversal dos blocos e os fatores pressão interna dos pneus



e distribuição de massa sobre o eixo dianteiro correspondem às subparcelas no sentido longitudinal, com três repetições, totalizando 54 unidades experimentais. Desta forma, em cada um dos blocos, as passagens do trator ocorreram no sentido longitudinal, delimitado pelas faixas compostas pelas três distribuições de massa sobre o eixo dianteiro sendo que, especificamente dentro de cada faixa, procedeu-se paralelamente as passagens nas diferentes configurações de pressão.

Cada faixa, dentro das parcelas principais referentes às distribuições de massa, possuía nove metros de largura por 50 metros de comprimento, sendo destinados três metros para comportar as passagens paralelas nas diferentes configurações de pressão interna dos pneus. Ao término de cada tratamento, o trator era novamente configurado. Para a adequação das diferentes distribuições de massa sobre os eixos do trator, foi utilizada uma balança portátil para veículos do tipo plataforma, com capacidade de pesagem individual de 50 kN. As balanças foram dispostas de forma separada sob os quatro rodados do trator, permitindo ajustar os valores da distribuição de massa conforme definido nos tratamentos. Cabe destacar que se iniciou a lastragem considerando a maior distribuição estática de massa, retirando-se lastro hidráulico e metálico conforme os tratamentos subsequentes.

Para a obtenção dos dados foi utilizada uma instrumentação eletrônica calibrada, composta por um conjunto de sensores, célula de carga, receptor GPS (*Global Position System*), conexões, cabos e um condicionador de sinais. Ademais, a instrumentação contava com um software para aquisição e gravação de dados em um computador portátil. A partir dos dados coletados, foram calculadas as variáveis relação cinemática e eficiência em tração.

A relação cinemática foi medida e calculada com base na metodologia proposta por Linares (1996), utilizando os dados de velocidade dos rodados dianteiro e traseiro, com TDA acionada, sob carga dentro de cada tratamento, nas suas respectivas repetições. As relações cinemáticas (K_v) em cada condição de superfície foram calculadas a partir das velocidades teóricas dos rodados dianteiro e traseiro (Equação 1).

$$K_v = \frac{V_d}{V_t} \quad (1)$$

Em que:

K_v - Relação cinemática;

V_d - Velocidade teórica do rodado dianteiro;

V_t - Velocidade teórica do rodado traseiro.

A eficiência em tração, abreviada como “TE” (proveniente do inglês *Traction Efficiency*), é obtida, de acordo com Linares, Catalán e Méndez (2006), por meio do quociente entre a potência na barra de tração e a potência fornecida pelo motor, ambas em kW, conforme Equação 2.

$$TE = \left(\frac{N_B}{N_m} \right) \times 100 \quad (2)$$

Em que:

TE - Eficiência em tração (%);

N_B - Potência na barra de tração (kW);

N_m - Potência fornecida pelo motor (kW).



Para a análise estatística, os dados foram avaliados quanto a sua normalidade e homocedasticidade. As variáveis foram submetidas à análise de variância ($p \leq 0,05$). Em caso de significância, as médias foram analisadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), com o auxílio do programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentam efeito significativo apenas entre o tipo de superfície e a distribuição de massa sobre o rodado dianteiro. As demais, incluindo a interação entre os três fatores (superfície, pressão interna dos pneus e distribuição estática de massa sobre o eixo dianteiro), não apresentaram significância. Para os efeitos simples, houve efeito significativo para as superfícies e distribuições estáticas de massa sobre o eixo dianteiro, bem como para as variáveis relação cinemática e eficiência em tração (Tabela 1).

Tabela 1 - Resumo da análise de variância para os parâmetros de relação cinemática e eficiência em tração.

Fontes de variação	Quadrados médios	
	Relação cinemática	Eficiência em tração
Superfície (S)	0,00703*	0,13923*
Massa eixo dianteiro (M)	0,29432*	0,09356*
Pressão interna pneus (P)	0,00281	0,00087
S x M	0,02455*	0,01269*
S x P	0,00092	0,00029
M x P	0,00317	0,00086
S x M x P	0,00312	0,00085
CV (%)	3,27	3,27

* Efeito significativo ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autoria própria (2023).

Isoladamente, a pressão interna dos pneus não apresentou efeito significativo para as variáveis relação cinemática e eficiência em tração. Zoz e Grisso (2003), assim como Battiato e Diserens (2013), descrevem que o aumento da massa do trator (carga incidente sobre os rodados), obtido com lastragem e pressão interna ao considerar a sua massa, aumentam a força de tração desenvolvida na barra, embora não pareça resultar em uma variação significativa em termos de coeficiente dinâmico e eficiência em tração. Os autores ainda mencionam, que para um pneu radial com pressão interna adaptada para diferentes cargas, a influência na eficiência de tração foi desprezível.

Ao avaliar a interação entre a superfície e a distribuição estática de massa sobre o eixo dianteiro, verifica-se que na condição de solo firme e solo preparado, a relação cinemática diferiu entre as distribuições de massa sobre o eixo dianteiro. Da mesma forma, ocorreu diferença significativa entre as condições de solo individualmente para cada uma das distribuições de massa sobre o eixo dianteiro (Tabela 2).



Tabela 2 - Relação cinemática para diferentes percentagens de distribuição de massa sobre o eixo dianteiro, em solo firme e solo preparado.

Condições de solo	Distribuição de massa sobre o eixo dianteiro		
	41%	45%	49%
	Relação cinemática		
Solo firme	0,97 b C*	1,30 a A	1,12 b B
Solo preparado	1,06 a C	1,24 b A	1,16 a B

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autoria própria (2023).

As menores relações cinemáticas do trator (0,97 e 1,06) ocorreram na distribuição de 41% de massa sobre o eixo dianteiro, em solo firme e solo preparado, respectivamente. Segundo Márquez (2012), a relação cinemática pode variar de 0,97 a 1,13, porém, quando se deseja alta eficiência em tração, a relação deve ficar entre 1,01 e 1,05 para deslocamento adequado quando a TDA estiver acionada.

De forma independente, a respeito do comportamento das superfícies em relação à distribuição estática de massa sobre o eixo dianteiro para o solo firme, observou-se que a relação cinemática aumenta até 1,30 quando se eleva a quantidade de massa sobre o eixo dianteiro de 41% para 45%, caracterizando um avanço acima dos valores recomendados por Márquez (2012).

Ao considerar a distribuição de 45% de massa sobre o eixo dianteiro e na condição de solo firme, as relações cinemáticas foram 34,02% e 16,07% superiores, nesta ordem, para as distribuições de 41% e 49%. Mesmo diferindo estatisticamente na condição de solo preparado para esta mesma distribuição de massa, as relações cinemáticas foram 16,98% e 6,89% superiores, comparado às distribuições de 41% e 49% de massa sobre o eixo dianteiro, respectivamente.

Especificamente na condição de solo firme, similar ao Sistema de Plantio Direto brasileiro, cabe destacar que, na distribuição de 41% de massa sobre o eixo dianteiro do trator, a relação cinemática foi menor que um. Neste caso, os rodados dianteiros apresentaram velocidade angular menor em relação aos rodados traseiros (atraso), aumentando a resistência ao deslocamento do trator, justificando os menores valores referentes à eficiência em tração.

Corroboram Feitosa *et al.* (2015), os quais afirmam que avanços cinemáticos negativos ou relação cinemática menor que um, indicam que a velocidade tangencial dos rodados do eixo dianteiro é inferior à dos rodados traseiros, ou seja, tem-se relação de atraso, representando uma resistência passiva. Ainda, Janulevičiuse Pupinis (2013) menciona que, neste caso, os rodados dianteiros não geram força motriz mas, ao contrário, aumentam a resistência ao movimento da máquina, pois os rodados traseiros acabam empurrando os rodados dianteiros. Ademais, Janulevičius *et al.* (2017) mencionam que nos tratores agrícolas, a velocidade teórica dos rodados dianteiros deve ser 2 a 3 % mais alta em relação aos rodados traseiros.



Nas condições em que o experimento foi realizado, com a distribuição de 41% de massa sobre o eixo dianteiro em solo firme com cobertura vegetal e solo preparado, as relações cinemáticas apresentaram uma variação percentual de 9,28%, entre as condições de solo estudadas. Ao considerar as demais distribuições de massa, com 45% de massa sobre o eixo dianteiro, ocorreu uma redução na relação cinemática de 4,62%, enquanto que a distribuição de 49% da massa sobre o rodado dianteiro proporcionou um aumento de 3,57%, para as condições de solo firme e solo preparado, respectivamente.

Cabe destacar que as relações cinemáticas observadas na distribuição de 41% de massa sobre o eixo dianteiro são similares às obtidas por Schlosser *et al.* (2020), de modo que pode-se afirmar que os tratores com TDA devem ter distribuição estática próxima de 40% de massa total sobre o eixo dianteiro. Para estes avanços cinemáticos, Linares, Catalán e Méndez (2006) explanam que o desempenho do trator é otimizado, desde que o patinamento dos rodados motrizes não ultrapasse 20%.

Diante do exposto, pode-se inferir que as relações cinemáticas observadas nas distribuições de 45% e 49% de massa sobre o rodado dianteiro acarretam dificuldades na realização de manobras, maior desgaste dos pneus e sobrecarga no sistema de transmissão do trator, além do *power hope*, quando a velocidade angular dos rodados no eixo dianteiro é maior que a dos rodados traseiros.

Complementando, Rackham e Blight (1985) mencionam que o avanço cinemático pode ser alterado, já que depende da pressão interna dos pneus, carga sobre os rodados, transferência de peso e desgaste diferenciado dos pneus. Por isso, no momento da substituição dos pneus ou adequação do tipo de rodado para trabalho específico, o usuário deve sempre seguir as recomendações dos fabricantes de tratores e pneus agrícolas.

Referente à eficiência em tração (Tabela 3), os resultados diferiram estatisticamente para a condição de solo firme para ambas as distribuições de massa sobre o rodado dianteiro, sendo o mesmo observado para a condição de solo preparado. No entanto, as maiores eficiências foram observadas na condição de solo firme, nas distribuições de 45% e 49% de massa sobre o rodado dianteiro.

No entanto, os resultados divergem dos encontrados por Bashford (1985) e Schlosser, Márquez e Linares (2001) ao avaliarem a influência e a eficiência em tração em tratores agrícolas com tração dianteira auxiliar em diferentes configurações de massa. Para os autores, a eficiência em tração atingiu valor máximo com relações cinemáticas de 1,01, tendo como distribuição de massa valores compreendidos entre 30 e 35% da massa total disposta no eixo dianteiro. Além disso, distribuições de massa superiores a estes valores provocaram diminuição na eficiência em tração nas relações cinemáticas de 1,01 e 1,07, enquanto nas demais relações cinemáticas (0,97 e 1,13) o ponto de mínima eficiência em tração correspondeu a 30 e 35% da massa total sobre o eixo dianteiro.



Tabela 3 - Eficiência em tração para diferentes percentagens de distribuição de massa sobre o eixo dianteiro, em solo firme e solo preparado.

Condições de solo	Distribuição de massa sobre o eixo dianteiro		
	41%	45%	49%
	Eficiência em tração		
Solo firme	0,58 a C	0,78 a A	0,67 a B
Solo preparado	0,52 b C	0,62 b A	0,58 b B

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autoria própria (2023).

Os autores Burt *et al.* (1979) e Battiato e Diserens (2013) ressaltam que a influência da carga dinâmica na eficiência de tração em um solo compactado (firme) e não compactado (solo preparado), ao considerar a redução da velocidade de deslocamento em função do patinamento, o aumento na carga proporcionou na primeira condição uma diminuição da eficiência em tração.

No que tange o comportamento da eficiência em tração do trator, esta é maior para a condição de solo firme em relação ao solo preparado, para todas as distribuições de massa estática sobre o eixo dianteiro.

Para a condição de solo firme, os valores de eficiência em tração decimais atingiram 0,78 (78%) para a distribuição de 45% de massa sobre o eixo dianteiro do trator (Tabela 3). Desta forma, para as distribuições de 41% e 49% a eficiência em tração foi 25,64% e 14,10% menor, respectivamente, comparado à distribuição de 45% de massa sobre o rodado dianteiro.

Em suma, nas distribuições de massa sobre o eixo dianteiro superiores a 45% a eficiência em tração tende a diminuir. Pesquisas realizadas por Jenane e Bashford (2000) e Schlosser *et al.* (2004) demonstram que a máxima eficiência em tração para tratores agrícolas com TDA, compreendem valores de 66 a 90% para solo firme e 51 a 70% para solo preparado. Neste sentido, Neujahr e Schlosser (2001) mencionam que quanto maior a eficiência, menores serão as perdas envolvidas no processo de tração. Linares, Catalán e Méndez (2006) destacam que as condições de trabalho modificam continuamente os raios dos rodados, devido à variabilidade do terreno e distribuição da massa dinâmica entre os eixos, provocada pela tração.

Ademais, Ferreira *et al.* (2000) descrevem que diferentes pressões internas dos pneus do trator podem acarretar interferências entre os eixos motrizes dos tratores agrícolas; no entanto, no presente trabalho não houve diferença significativa. Schlosser *et al.* (2020) ressaltam que a capacidade de carga do pneu está diretamente relacionada com sua pressão interna, respeitando as especificações do fabricante do pneu conforme a carga aplicada *versus* pressão interna recomendada.



CONCLUSÃO

A condição de solo firme proporcionou eficiência em tração superior ao solo preparado, diferindo entre as distribuições de massa sobre o eixo dianteiro avaliadas, sendo que a relação cinemática que se traduz em maior eficiência em tração, ocorre em condições de solo firme com distribuição de massa de 45% sobre o eixo dianteiro do trator. A relação cinemática adequada ocorre na distribuição de massa de 41% sobre o eixo dianteiro, sem efeito das diferentes pressões internas utilizadas nos pneus, considerando as condições que o experimento foi realizado.

REFERÊNCIAS

- BASHFORD, L.L. Axle power distribution for a front-wheel assist tractor. **Transactions of the ASAE**, v.28, n.5, p.1385-1388, 1985.
- BATTIATO, A.; DISERENS, E. 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**, v.5, n.8, p. 197-2015, 2013.
- BURT, E. C., BAILEY, A. C., PATTERSON, R. M., TAYLOR, J. H. Combined effects of dynamic load and travel reduction on tire performance. **Transactions of the ASAE**, v.22, n.1, p.40-45, 1979.
- FEITOSA, J. R., FERNANDES, H. C., TEIXEIRA, M. M., CECON, P. R. Influência da pressão interna dos pneus e da velocidade de deslocamento nos parâmetros operacionais de um trator agrícola e nas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n.1, p.117-127, 2015.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v.37, n.4, p.529-535, 2019.
- FERREIRA, M. F., SCHLOSSER, J. F., NEUJAHN, E. B., SCHNEIDER, V. Relação cinemática em um trator 4 x 2 com tração dianteira auxiliar equipado com pneus radiais na eficiência de tração. **Ciência Rural**, v.30, n.6, p.983-986, 2000.
- JANULEVIČIUS, A., PUPINIS, G. Power circulation in driveline system when the wheels of tractor and trailer are driven. **Transport**, v.28, n.3, p.313-321, 2013.
- JANULEVIČIUS, A., PUPINIS, G., LUKŠTAS, J., DAMANAUSKAS, V., KURKAUSKAS, V. Dependencies of the lead of front driving wheels on different tire deformations for a MFWD tractor. **Transport**, v.32, n.1, p.23-31, 2017.
- JANULEVIČIUS, A., PUPINIS, G., & DAMANAUSKAS, V. Effect of tires' pressure on the kinematic mismatch of a four-wheeldrive tractor. **Mechanika**, v.19, n.1, p. 73-80, 2013.



JENANE, C., BASHFORD, L. L. Tractive performance of a mechanical front-wheel assist tractor as related to forward speeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.77, v.2, p.221-226, 2000.

LINARES, P. **Teoría de la tracción de tractores agrícolas**. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos da Universidad Politécnica de Madrid, 1996.

LINARES, P.; CATALÁN, H.; MÉNDEZ, V. **Teoría de la tracción de tractores agrícolas**. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos da Universidad Politécnica de Madrid, 2006.

MÁRQUEZ, L. **Tractores Agrícolas: Tecnología y utilización**. España: B&H Grupo Editorial, 2012.

NEUJAHN, E. B.; SCHLOSSER, J. F. Comportamento de pneus agrícolas radiais e diagonais em relação à tração. **Engenharia Agrícola**, v.21, n.2, p.180-189, 2001.

RACKHAM, D. H.; BLIGHT, D. P. Four wheel Drive Tractors - A Review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.31, n.3, p.185-201, 1985.

SCHLOSSER, J. F.; MÁRQUEZ, L.; LINARES, P. Desenvolvimento de metodologia para previsão do fenômeno de vibrações decorrentes da interferência entre eixos de um trator com tração dianteira auxiliar (TDA). **Ciência Rural**, v. 31, n.6, p.985-989, 2001.

SCHLOSSER, J. F.; MÁRQUEZ, L.; LINARES, P. Influência do avanço cinemático das rodas dianteiras sobre a eficiência em tração de tratores com quatro rodas motrizes não isodiamétricas. **Ciência Rural**, v. 34, n.6, p.1801-105, 2004.

SCHLOSSER, J. F.; CATALÁN, H.; BERTINATTO, R.; FARIAS, M. S. D.; MAS, G. D.; CELLA, M. C. Power hop in agricultural tractors. **Ciência Rural**, v. 50, n.8, p.1-4, 2020.

SRIVASTAVA, A.K., GOERING, C.E., ROHRBACH, R.P; BUCKMASTER, D.R. **Engineering principles of agricultural machines**. St Joseph, USA: 1993.

ZOZ, F. M.; GRISSO, R. D. **Traction and tractor performance**. Louisville: American Society of Agricultural Engineers, 2003.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil – Código Financeiro 001. Os autores também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de produtividade em pesquisa do último autor do estudo.

Recebido em: 13 de fevereiro de 2023

Aceito em: 14 de julho de 2023