

MARCONI RIBEIRO FURTADO JÚNIOR

**ANÁLISE OPERACIONAL DE UM TRATOR AGRÍCOLA EM FUNÇÃO DA
PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS E INCLINAÇÃO DA LINHA DE TRAÇÃO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2013**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

F992a
2013

Furtado Júnior, Marconi Ribeiro, 1987-

Análise operacional de um trator agrícola em função da
pressão interna dos pneus e inclinação da linha de tração /
Marconi Ribeiro Furtado Júnior. – Viçosa, MG, 2013.
126f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Haroldo Carlos Fernandes

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Tratores agrícolas. 2. Mecanização agrícola. 3. Máquinas
agrícolas - Tração. 4. Pneumáticos. 5. Vibração. 6. Ergonomia.
7. Máquinas agrícolas. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.372

MARCONI RIBEIRO FURTADO JÚNIOR

**ANÁLISE OPERACIONAL DE UM TRATOR AGRÍCOLA EM FUNÇÃO DA
PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS E INCLINAÇÃO DA LINHA DE TRAÇÃO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

APROVADA: 18 de fevereiro de 2013.

Fábio Lúcio Santos

Renato Adriane Alves Ruas

Haroldo Carlos Fernandes
(Orientador)

“SEJA VOCÊ QUEM FOR, SEJA QUAL FOR A POSIÇÃO SOCIAL QUE VOCÊ TENHA NA VIDA, A MAIS ALTA OU A MAIS BAIXA, TENHA SEMPRE COMO META MUITA FORÇA, MUITA DETERMINAÇÃO E SEMPRE FAÇA TUDO COM MUITO AMOR E COM MUITA FÉ EM DEUS, QUE UM DIA VOCÊ CHEGA LÁ. DE ALGUMA MANEIRA VOCÊ CHEGA LÁ.”

AYRTON SENNA

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marconi e Simone; aos meus irmãos Breno e Mateus; e aos demais parentes que me incentivaram ao longo de mais essa caminhada.

À Deus, pela vida e pelos objetivos conquistados.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela realização do Programa de Pós-Graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Haroldo Carlos Fernandes pela oportunidade, orientação e conselhos.

Aos professores coorientadores Fábio Lúcio Santos e Paulo Roberto Cecon, pelas contribuições e sugestões.

Aos amigos e colegas da mecanização Flávio, Daniel, Danilo, Geice, Jardênia, Juliana, Robson, Raphael, Marcos, Wilker, Fred, Flora, Gracielly, Humberto, Cristian, André, Anderson, Marcos, Gustavo, Marcelo e Raquel.

Aos amigos Anderson Evaristo, Victor Gomes, Rafael Teixeira, John Lennon, Robson Silva, Rachid Feres, Raphael Hermano.

Aos demais que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho!

BIOGRAFIA

MARCONI RIBEIRO FURTADO JÚNIOR, filho de Marconi Ribeiro Furtado e Simone Lorem Gomides Furtado, nasceu em Itapecerica, Minas Gerais, em 25 de agosto de 1987.

De 2003 a 2005, formou-se no ensino médio pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, em Araxá, Minas Gerais.

De 2006 a 2010 graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

Em 2011, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Mestrado, área de concentração em Mecanização Agrícola, pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 2013, submeteu-se aos exames de defesa da dissertação, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE FIGURAS	xiii
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT	xviii
INTRODUÇÃO GERAL	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23

ARTIGO I - INFLUÊNCIA DA PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS E DA INCLINAÇÃO DA LINHA DE TRAÇÃO NO DESEMPENHO DE UM TRATOR AGRÍCOLA 4X2 TDA

Resumo	26
Abstract	27
1. Introdução	28
2. Material e Métodos	31
2.1. Tratores	31
2.2. Pneus utilizados.....	32
2.2.1. Pressões utilizadas	32
2.3. Magnitude e ângulo de aplicação da força na barra de tração	32
2.3.1. Ângulo de aplicação da força na barra de tração	32
2.3.2. Força de tração.....	33
2.4. Velocidade operacional.....	34
2.5. Caracterização da pista utilizada no experimento.....	34
2.5.1. Teor de água no solo	34
2.5.2. Densidade do solo	34
2.5.3. Resistência do solo à penetração	35
2.6. Instrumentação do trator e parâmetros operacionais diretos	35
2.6.1. Velocidade operacional do trator (V_{op})	36
2.6.2. Rotação dos eixos motrizes (n).....	36
2.6.3. Força de tração (F)	37
2.6.4. Consumo horário de combustível (C_h)	38
2.7. Parâmetros operacionais obtidos indiretamente	38
2.7.1. Raio de rolamento dos pneus (r_r).....	38

2.7.2. Deslizamento dos rodados do trator (s)	39
2.7.3. Relação mecânica entre eixos (R_M)	39
2.7.4. Relação entre os raios de rolamento dianteiro e traseiro (R_R)	40
2.7.5. Avanço cinemático (A_C)	40
2.7.6. Potência na barra de tração.....	41
2.7.7. Consumo específico de combustível	41
2.7.8. Transferência de peso entre os eixos motrizes	42
2.7.8.1. Peso do trator (P_t)	42
2.7.8.2. Centro de gravidade do trator (C_g).....	42
2.7.8.3. Peso dinâmico sobre o eixo dianteiro (C_{dd}).....	42
2.7.8.4. Peso dinâmico sobre o eixo traseiro (P_{dt})	43
2.7.8.5. Peso dinâmico total (P_{dt})	44
2.7.8.6. Resistência ao rolamento dos pneus utilizados (F_r).....	44
2.7.9. Eficiência na barra de tração (E_{bt}).....	45
2.7.10. Razão de tração do trator (RTT)	46
2.8. Procedimento na execução do experimento	46
2.9. Análise dos dados.....	46
3. Resultados e discussão.....	48
3.1. Caracterização da pista experimental.....	48
3.2. Dimensões dos pneus em condição dinâmica, relação entre raios, relação mecânica entre eixos e avanço cinemático.....	48
3.2.1. Deflexão.....	48
3.2.2. Raio de rolamento.....	48
3.2.3. Relação entre raios.....	49
3.2.4. Relação mecânica entre eixos.....	49
3.2.5. Avanço cinemático	49
3.3. Transferência de peso entre os eixos	50
3.3.1. Peso estático do trator	51
3.3.2. Peso dinâmico sobre o eixo traseiro	51
3.3.3. Peso dinâmico sobre o eixo dianteiro	52
3.3.4. Peso dinâmico total.....	53
3.4. Deslizamento dos rodados do trator	54
3.5. Potência na barra de tração.....	57
3.6. Consumo horário e específico de combustível	59
3.6.1. Consumo horário de combustível	59

3.6.2. Consumo específico de combustível	61
3.7. Eficiência na barra de tração e Razão de tração do trator	64
4. Conclusões.....	66
5. Referências bibliográficas	67

ARTIGO II - INFLUÊNCIA DA PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS, DA MAGNITUDE E DO ÂNGULO DE APLICAÇÃO DA FORÇA DE TRAÇÃO NOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO NA BASE DO POSTO DE OPERAÇÃO DE UM TRATOR AGRÍCOLA 4X2 TDA

Resumo	71
Abstract	72
1. Introdução	73
2. Material e métodos.....	77
2.1. Tratores	77
2.2. Pneus utilizados.....	78
2.2.1. Pressões internas utilizadas nos pneus.....	78
2.3. Magnitude e ângulo de aplicação da força na barra de tração	78
2.3.1. Ângulo de aplicação da força na barra de tração	78
2.3.2. Força de tração.....	79
2.4. Velocidade operacional teórica.....	80
2.5. Caracterização da pista utilizada no experimento.....	80
2.5.1. Teor de água no solo	80
2.5.2. Densidade do solo	80
2.5.3. Resistência do solo à penetração	81
2.6. Instrumentação do trator	81
2.6.1. Velocidade operacional do trator (V_{op})	82
2.6.2. Rotação dos eixos motrizes (n).....	82
2.6.3. Força de tração (F_t).....	83
2.6.4. Vibrações.....	84
2.7. Estudo do deslizamento dos rodados e das vibrações na base do posto de operação	84
2.7.1. Deslizamento dos pneus do trator (s)	84
2.7.2. Aceleração Média Quadrática (A_{RMS}).....	85
2.7.3. Espectro de frequências	85

2.8. Procedimento na execução do experimento	86
2.9. Análise estatística dos dados	86
3. Resultados e discussão.....	87
3.1. Deslizamento dos pneus do trator	87
3.2. Aceleração média quadrática na base do posto de operação	90
3.2.1. Aceleração horizontal	90
3.2.2. Aceleração vertical.....	93
3.2.3. Conforto e saúde do operador de acordo com as vibrações obtidas	98
3.3. Análise espectral das vibrações longitudinais e verticais.....	99
3.3.1. Vibração horizontal	99
3.3.2. Vibração vertical	102
4. Conclusões.....	105
5. Referências bibliográficas	106

ARTIGO III - VARIAÇÃO DA PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS DE UM TRATOR AGRÍCOLA 4X2 TDA EM FUNÇÃO DA FORÇA DE TRAÇÃO

Resumo.....	110
Abstract.	111
1. Introdução	112
2. Material e Métodos	115
2.1. Tratores.....	115
2.2. Pneus utilizados.....	116
2.3. Força de tração.....	116
2.4. Velocidade operacional teórica	117
2.5. Instrumentação do trator	117
2.5.1. Força de tração (F)	118
2.5.2. Pressão interna dos pneus (P).....	118
2.6. Variação da pressão interna dos pneus em condição dinâmica	119
2.8. Execução do experimento.....	120
2.9. Análise estatística dos dados.....	120
3. Resultados e discussão.....	121
4. Conclusões.....	124
5. Referências bibliográficas	125

LISTA DE TABELAS

ARTIGO I - INFLUÊNCIA DA PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS E DA INCLINAÇÃO DA LINHA DE TRAÇÃO NO DESEMPENHO DE UM TRATOR AGRÍCOLA 4X2 TDA

Tabela 1. Especificações do trator John Deere 5705	32
Tabela 2. Especificações nominais básicas sobre os pneus utilizados no experimento.....	32
Tabela 3. Classes de inclinação de aplicação da força na barra de tração	33
Tabela 4. Marchas utilizadas no trator lastro com suas respectivas forças de tração padronizadas.....	34
Tabela 5. Características da área experimental.....	48
Tabela 6. Deflexão dos pneus utilizados (m) para as respectivas pressões internas dos pneus.....	48
Tabela 7. Valores médios para o raio de rolamento (m) dos pneus utilizados para as combinações entre TDA ligada e desligada, pressão interna dos pneus e eixo.....	49
Tabela 8. Relação entre raios de rolamento para cada pressão interna utilizada nos pneus	49
Tabela 9. Avanço cinemático para cada pressão interna utilizada nos pneus	50
Tabela 10. Peso estático do trator e sua respectiva distribuição de peso entre os eixos.....	51
Tabela 11. Equações de regressão ajustadas para o deslizamento dos rodados do trator (s, em %) em função da pressão interna dos pneus e da força de tração e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações	54
Tabela 12. Valores médios de deslizamento dos rodados do trator, em %, para as combinações entre pressão interna dos pneus, força e inclinação da linha de tração	54
Tabela 13. Equações de regressão ajustadas para potência na barra de tração (P_{bt} , em kW) do trator em função da pressão interna dos pneus (P) e da força de tração (F) e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações	57
Tabela 14. Valores médios de potência na barra de tração do trator, em kW, para as combinações entre pressão, força de tração e inclinação.....	58

Tabela 15. Equações de regressão ajustadas para o consumo horário (C_h , em $L h^{-1}$) do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações	59
Tabela 16. Valores médios de consumo horário de combustível do trator, em $L h^{-1}$, para as combinações entre pressão, força de tração e inclinação	60
Tabela 17. Equações de regressão ajustadas para o consumo específico (C_e , em $Kg kW^{-1} h^{-1}$) do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações	62
Tabela 18. Valores médios de consumo específico de combustível do trator, em $Kg kW^{-1} h^{-1}$, para as combinações entre pressão, força de tração e inclinação	62

ARTIGO II - INFLUÊNCIA DA PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS, DA MAGNITUDE E DO ÂNGULO DE APLICAÇÃO DA FORÇA DE TRAÇÃO NOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO NA BASE DO POSTO DE OPERAÇÃO DE UM TRATOR AGRÍCOLA 4X2 TDA

Tabela 1. Especificações do trator John Deere 5705.	78
Tabela 2. Especificações nominais básicas sobre os pneus utilizados no experimento.....	78
Tabela 3. Classes de inclinação de aplicação da força na barra de tração.	79
Tabela 4. Marchas utilizadas no trator lastro com suas respectivas forças de tração padronizadas.....	80
Tabela 5. Características físicas da área experimental.	87
Tabela 6. Equações de regressão ajustadas para o deslizamento dos rodados do trator (s , em %) em função da pressão interna dos pneus (P) e da força de tração (F) e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações....	87
Tabela 7. Valores médios de deslizamento dos rodados do trator, em %, para as combinações entre pressão interna dos pneus, força e inclinação da linha de tração	88
Tabela 8. Equações de regressão ajustadas para a aceleração horizontal RMS (AH_{RMS} , em $m s^{-2}$) na base do posto de operação do trator em função da pressão interna dos pneus (P) e da força de tração (F) e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações.	90

Tabela 9. Valores médios de aceleração horizontal RMS (AH_{RMS}) na base do posto de operação do trator para as combinações entre pressão interna dos pneus (P), força de tração (F) e inclinação (I).....	91
Tabela 10. Equações de regressão ajustadas para a aceleração vertical RMS (AV_{RMS} , em $m\ s^{-2}$) na base do posto de operação do trator em função da pressão interna dos pneus (P) e da força de tração (F) e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações.	94
Tabela 11. Valores médios de aceleração vertical RMS (AV_{RMS}) na base do posto de operação do trator para as combinações entre pressão interna dos pneus (P), força de tração (F) e inclinação (I).....	94

ARTIGO III - VARIAÇÃO DA PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS DE UM TRATOR AGRÍCOLA 4X2 TDA EM FUNÇÃO DA FORÇA DE TRAÇÃO

Tabela 1. Especificações do trator John Deere 5705	116
Tabela 2. Peso estático do trator	116
Tabela 3. Especificações nominais básicas sobre os pneus utilizados no experimento.....	116
Tabela 4. Forças padronizadas utilizadas na condução do experimento.....	117
Tabela 5. Equações de regressão ajustadas para a variação média quadrática da pressão interna dos pneus do trator ($\Delta PRMS$, em kPa) em função da força de tração desenvolvida e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para os pneus dianteiros e traseiros	122

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I - INFLUÊNCIA DA PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS E DA INCLINAÇÃO DA LINHA DE TRAÇÃO NO DESEMPENHO DE UM TRATOR AGRÍCOLA 4X2 TDA

Figura 1. Trator John Deere® modelo 5705 utilizado no experimento.	31
Figura 2. Estrutura utilizada para variar o ângulo de aplicação da força.	33
Figura 3. Vista frontal do penetrômetro utilizado.	35
Figura 4. Unidade de radar utilizado para medição da velocidade instantânea.	36
Figura 5. Sensor indutivo utilizado para a determinação da velocidade angular dos rodados.	37
Figura 6. Posicionamento da célula de carga entre o cabo de aço e a barra de tração.	37
Figura 7. Fluxômetro utilizado para determinação do consumo de combustível.	38
Figura 8. Diagrama de forças e dimensões utilizadas na estimativa do peso dinâmico sobre os rodados dianteiros e traseiros do trator estudado.	43
Figura 9. Ângulos de aplicação da força na barra de tração do tator.	50
Figura 10. Variação do peso dinâmico sobre o eixo traseiro em função da força de tração para as respectivas classes de inclinação.	51
Figura 11. Variação do peso dinâmico sobre o eixo dianteiro em função da força de tração para as respectivas classes de inclinação.	52
Figura 12. Variação do peso dinâmico total do trator em função da força de tração para as respectivas classes de inclinação.	53
Figura 13. Equação ajustada e superfície de resposta para descrever o deslizamento do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração	56
Figura 14. Equação ajustada e superfície de resposta para descrever a potência na barra de tração em função da pressão interna dos pneus e da força de tração.	59
Figura 15. Equação ajustada e superfície de resposta para descrever o consumo horário do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração.	61
Figura 16. Equação ajustada e superfície de resposta para descrever o consumo específico de combustível do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração.	63

Figura 17. Eficiência na barra de tração e deslizamento do trator em função da razão de tração.	65
---	----

ARTIGO II - INFLUÊNCIA DA PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS, DA MAGNITUDE E DO ÂNGULO DE APLICAÇÃO DA FORÇA DE TRAÇÃO NOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO NA BASE DO POSTO DE OPERAÇÃO DE UM TRATOR AGRÍCOLA 4X2 TDA

Figura 1. Frequências características para cada parte do corpo.....	74
Figura 2. Trator John Deere® modelo 5705 utilizado no experimento.	77
Figura 3. Estrutura utilizada para variação do ângulo de aplicação da força.	79
Figura 4. Vista frontal do penetrômetro utilizado.	81
Figura 5. Unidade de radar utilizado para medição da velocidade instantânea.	82
Figura 6. Sensor indutivo utilizado para a determinação da rotação dos rodados. ..	83
Figura 7. Posicionamento da célula de carga entre o cabo de aço e a barra de tração.	83
Figura 8. Posicionamento dos acelerômetros na base do assento do operador.	84
Figura 9. Equação ajustada e superfície de resposta para representar o deslizamento dos rodados do trator.	89
Figura 10. Equação ajustada e superfície de resposta para representar a aceleração RMS na direção horizontal na base do posto de operação.....	91
Figura 11. Corte na superfície de resposta gerada para a aceleração horizontal. ...	92
Figura 12. Corte na superfície de resposta gerada para o deslizamento do trator. ..	93
Figura 13. Equação ajustada e superfície de resposta para representar a aceleração RMS na direção vertical na base do posto de operação.	96
Figura 14. Corte na superfície de resposta gerada para a aceleração vertical.....	96
Figura 15. Espectro de frequências para a aceleração horizontal na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 82,74 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).	99
Figura 16. Espectro de frequências para a aceleração horizontal na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 96,53 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).	100
Figura 17. Espectro de frequências para a aceleração longitudinal na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 110,32 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).	101

Figura 18. Espectro de frequências para a aceleração vertical na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 82,74 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).	102
Figura 19. Espectro de frequências para a aceleração vertical na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 96,53 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).	103
Figura 20. Espectro de frequências para a aceleração vertical na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 110,32 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).	104

ARTIGO III - VARIAÇÃO DA PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS DE UM TRATOR AGRÍCOLA 4X2 TDA EM FUNÇÃO DA FORÇA DE TRAÇÃO

Figura 1. Trator John Deere® modelo 5705 utilizado no experimento.	115
Figura 2. Célula de carga e estrutura suporte para a instalação no trator.	118
Figura 3. Sistema cinemático (A) que viabiliza mensurar a pressão interna do pneu em movimento. Detalhe do transdutor de pressão (B) utilizado nos testes.	119
Figura 4. Variação da pressão interna do pneus dianteiro direito (A), dianteiro esquerdo (B), traseiro direito (C) e traseiro esquerdo (D), em condição dinâmica para a força de tração de 23,92 kN.	121
Figura 5. Variação média quadrática da pressão interna dos pneus dianteiros e traseiros em função da força de tração.	123

RESUMO

FURTADO JÚNIOR, Marconi Ribeiro, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2013. **Análise operacional de um trator agrícola em função da pressão interna dos pneus e inclinação da linha de tração.** Orientador: Haroldo Carlos Fernandes. Coorientadores: Fábio Lúcio Santos e Paulo Roberto Cecon.

A importância da agricultura brasileira no cenário mundial está intimamente relacionada com a ampliação da fronteira agrícola ao longo do território nacional nas últimas décadas. Esse processo ocorreu mediante a utilização de novas técnicas, processos e equipamentos que permitiram a expansão dos cultivos para áreas antes consideradas impróprias. O trator agrícola teve papel fundamental no salto da agricultura nacional e pode ser considerada a principal fonte de potência no campo. A utilização de tratores na produção aprimora a qualidade do serviço realizado e garante a obtenção de maior rendimento operacional em todas as etapas da produção. O trator é uma máquina complexa, composta de uma série de mecanismos e elementos que operam concomitantemente para garantir a função básica de um trator, ou seja, fornecer potência para a agricultura. O desempenho de uma máquina em tração é afetado por diversas variáveis como a pressão interna dos pneus e a transferência de peso. Deste modo, objetivou-se com esse trabalho avaliar os seguintes quesitos: Influência da pressão interna dos pneus e da inclinação da linha de tração nos parâmetros operacionais e nas vibrações mecânicas na base do posto de operação; Alteração da pressão interna dos pneus em condição dinâmica decorrente da transferência de peso entre o eixo dianteiro e traseiro. Os trabalhos foram executados no campus da Universidade Federal de Viçosa, no período de março a agosto de 2012. O experimento conduzido para determinar o desempenho e a vibração no posto de operação foi realizado em pista de solo firme, sendo os tratamentos constituídos da combinação de três pressões internas dos pneus (12, 14 e 16 psi), três inclinações da linha de tração e quatro forças de tração (3,57; 6,86; 12,46 e 16,23 kN), no delineamento inteiramente casualizado, com oito repetições. O experimento conduzido para avaliar a variação da pressão interna dos pneus em condição dinâmica foi realizado em pista de concreto, com quatro tratamentos constituídos das forças de tração de 4,44; 14,57; 18,6 e 23,92 kN, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Foi utilizado um trator agrícola com tração dianteira auxiliar, equipado com pneus diagonais e um conjunto de transdutores para mensurar os parâmetros de interesse. Os resultados demonstraram que o deslizamento dos rodados do trator aumentou

progressivamente com o aumento da força de tração, que a redução da pressão interna dos pneus promoveu a redução do deslizamento dos rodados nas maiores forças de tração e que a inclinação da linha de tração apresentou efeito significativo apenas para a força de tração de 16,23 kN. O consumo horário de combustível aumentou cerca de 65% com o aumento da força de tração de 3,56 para 16,23 kN, a pressão interna dos pneus e a classe de inclinação da linha de tração apresentaram efeito reduzido sobre essa variável. A força de tração e a pressão interna dos pneus exerceram efeito positivo nos níveis de vibração longitudinal na base do posto de operação, sendo que os maiores níveis foram observados para a combinação entre a força de tração de 16,23 kN e a pressão interna de 110,32 kPa, com valores próximos a $0,61 \text{ m s}^{-2}$, e as menores para a força de 3,56 kN e pressão de 82,74 kPa, com valores próximos a $0,20 \text{ m s}^{-2}$. A força de tração e a pressão interna dos pneus apresentaram efeito quadrático nos níveis de vibração no sentido vertical na base do posto de operação, sendo os maiores níveis observados para a combinação entre a força de tração de 16,23 kN e a pressão interna de 110,32 kPa, com valores próximos a $0,75 \text{ m s}^{-2}$, e as menores para a força de 3,56 kN combinada com a pressão interna dos pneus de 82,74 kPa. A variação da transferência de peso atuando sobre cada eixo do trator foi capaz de propiciar a alteração da pressão interna dos pneus em condição dinâmica. A força de tração apresentou efeito linear na variação da pressão interna dos pneus durante o desenvolvimento de tração, sendo o modelo gerado considerado válido para estimar a força de tração a partir da variação da pressão interna dos pneus.

ABSTRACT

FURTADO JÚNIOR, Marconi Ribeiro, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, february de 2013. **Operational analysis of a farm tractor as a function of the tire internal pressure and inclination of traction line.** Adviser: Haroldo Carlos Fernandes. Co-advisers: Fábio Lúcio Santos and Paulo Roberto Cecon.

The importance of Brazilian agriculture in the global scenario is closely related to the expansion of the agricultural frontier throughout the country in recent decades. This process occurred through the use of new techniques, processes and equipment that allowed the expansion of crops for areas previously considered unsuitable. The tractor had an instrumental role in jump national agriculture and can be considered the main source of power in the field. The use of tractors in production enhances the quality of service performed and ensures achieving greater operational efficiency at all stages of production. The tractor is a complex machine, comprising a number of elements and mechanisms which operate concurrently to ensure basic function of a tractor, in other words, provide power for agriculture. The performance of a machine in traction is affected by several variables such as the internal pressure of the tires and weight transfer. Thus, the aim of this work was to evaluate the following questions: Influence of the internal pressure of the tires and the slope of the line traction in operating parameters and the mechanical vibration of the base station operation; Change in the internal pressure of the tire dynamic condition due to the weight transfer between front and rear axle. Work was done on the campus of the Federal University of Viçosa, in the period from March to August 2012. The experiment conducted to determine the performance and vibration in the post of operation was performed in firm ground track, and the treatments of the combination of three tire inflation pressure (12, 14 and 16 psi), three inclinations of traction line and four traction forces (3.57, 6.86, 12.46 and 16.23 kN), in a completely randomized design, with eight replications. The experiment conducted to evaluate the variation of the internal pressure of the tires in dynamic condition was performed on concrete track, with four treatments consisting of traction forces of 4.44, 14.57, 18.6 and 23.92 kN, in a completely randomized design, with four replications. We used a tractor with front wheel assist, equipped with bias tires and a set of transducers for measuring the parameters of interest. The results showed that the slip of wheelsets of the tractor increased progressively with increasing traction force, that reducing the internal pressure of the tires caused a reduction in the slip of the wheelsets in the greatest traction forces and that the inclination of the line traction had significant effect only for

the tensile strength of 16.23 kN. The hourly fuel consumption increased by about 65% with increasing tensile strength of 3.56 to 16.23 kN, the internal pressure of the tires and the class of inclination of the line traction had limited effect on this variable. The traction force and the internal pressure of the tire exerted a positive effect on levels of longitudinal vibration at the base of the post operating, the highest levels were observed for the combination of tensile strength of 16.23 kN and the internal pressure of 110,32 kPa, with values close to $0,61 \text{ m s}^{-2}$, and the lowest for the force of 3,56 kN and 82,74 kPa pressure, with values close to $0,20 \text{ m s}^{-2}$. The traction force and the internal pressure of the tires had a quadratic effect on vibration levels in the vertical direction at the base of the post operating, the highest levels were observed for the combination of traction force of 16,23 kN and the internal pressure of 110,32 kPa, with values close to 0.75 m s^{-2} , and the lowest for the force of 3,56 kN combined with the internal pressure of the tires of 82,74 kPa. The variation of weight transfer acting on each axle of the tractor was able to provide the change in the internal pressure of tires in dynamic condition. The traction force showed a linear variation of the internal pressure of the tire during the development of tensile, being generated model considered valid to estimate the traction force from the variation of the internal pressure of the tires.

INTRODUÇÃO GERAL

O grande salto da agricultura brasileira iniciou-se com o processo de modernização ocorrido nas décadas de 60 e 70. A partir de então, verificou-se um crescimento acentuado da produção agrícola ao longo das décadas, impulsionado pela criação e adoção de novas tecnologias que permitem obter maiores rendimentos.

De acordo com a CONAB (2012), a área plantada na safra 2012/2013 está estimada entre 50,9 e 52,2 milhões de hectares, levantamento esse que indica uma produção de 176,8 a 181,6 milhões de toneladas de grãos.

O cultivo de grandes extensões de terras, como no caso do Brasil, certamente só é possível e viável mediante a utilização de processos mecanizados, sendo dada aqui ênfase para o trator agrícola, que pode ser considerado a principal fonte potência no campo. De acordo com a ANFAVEA (2012), apenas no ano de 2011 foram comercializados 52.296 tratores agrícolas no mercado brasileiro, o que corresponde a um aumento grandioso se comparado com as 1.679 unidades comercializadas a 50 anos atrás.

Segundo Prassana Kumar (2012), o trator agrícola é elemento essencial para elevar a produtividade agrícola. O aspecto multifuncional dessa máquina fez com que ela se propagasse rápido nas aplicações agrícolas, florestais e industriais, desempenhando as mais diversas operações com agilidade e eficiência. Para Kathirvel et al. (2001), a eficiência de um trator agrícola está relacionada com a habilidade de fornecer energia mecânica para uma série de equipamentos e desempenhar operações inerentes ao processo produtivo.

O trator, como qualquer máquina, necessita de ajustes para realizar determinada operação com qualidade e eficiência. Diversos fatores interferem no desempenho de um trator agrícola como, por exemplo, o tipo de pneu utilizado, a quantidade de lastro, a pressão interna dos pneus, as condições da superfície trafegada, a transferência de peso, dentre outros.

A transferência de peso é caracterizada pela alteração do peso entre os eixos dianteiro e traseiro em decorrência da força de tração exercida. A capacidade de tração de um dispositivo é função das características da superfície, das características do dispositivo e da carga aplicada sobre o eixo que suporta tal dispositivo.

Ao desenvolver força na barra de tração, parte do peso atuando sobre o eixo dianteiro em condição estática é transferido e acrescido ao peso estático do eixo traseiro. No caso de tratores desprovidos de tração dianteira auxiliar (TDA) é desejável que a transferência de peso para o eixo traseiro seja a máxima aceitável, visto que apenas este apresenta tração. Em tratores providos de TDA o decréscimo do peso sobre o eixo dianteiro pode resultar na redução da capacidade de tração dos pneus nele suportados. De acordo com Pranav & Pandey (2008), a carga dinâmica é um fator considerável na capacidade de tração, sendo de suma importância a adequação dos lastros e sua interação com a transferência de peso.

O acréscimo de peso/carga sobre o eixo de veículos de transporte eleva a pressão interna do pneu previamente estabelecida em calibração. Com o atrito do pneu com o asfalto a temperatura interna do ar do pneus também se eleva, ocasionando por vezes a explosão do pneu. A transferência de peso nos tratores altera a distribuição de peso do trator, variando dessa forma, o peso sobre os pneus.

A pressão interna dos pneus é um fator relevante nas operações com tratores agrícolas. Através da variação da pressão interna é possível alterar a área de contato do pneu com o solo e, dessa forma, conseguir ajustar a capacidade de tração de acordo com a operação realizada.

O deslizamento dos rodados, a potência na barra de tração e o consumo horário e específico são parâmetros importantes na caracterização do desempenho de um trator agrícola em tração, sendo alvo de muitos estudos (SPAGNOLO et al., 2012; SAFA et al., 2010; BAKKEN et al., 2009; FURLANI et al., 2010; MOLARI et al., 2012).

A operação com máquinas é fonte de vibrações mecânicas que podem ter efeito maléfico a saúde de seus operadores, tornando-se importante o estudo das características de tais vibrações para verificar se estão no limite de segurança exigido pelas normas.

Nos tratores agrícolas desprovidos de amortecedores nos eixos, o amortecimento é realizado pelos pneus e por conjuntos de amortecedores e molas associados ao assento do operador. Quanto maior a pressão interna do pneu menor é sua capacidade de absorção de impactos devido ao aumento da rigidez do mesmo. O assento do operador nos tratores mais simples apresentam amortecedores e molas associados à sua estrutura, Franchini (2007) encontrou eficiências de amortecimento entre assento e piso de -2 a 12% para esse tipo de assento.

Objetivou-se com este trabalho avaliar os seguintes aspectos: Desempenho operacional e vibrações mecânicas na base do posto de operação de um trator agrícola em função da pressão interna dos pneus, da inclinação da linha de tração e da força de tração; Variação da pressão interna dos pneus em decorrência da transferência de peso entre eixos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **“Autoveículos - Produção em 2011”**. São Paulo, 2012.

BAKKEN, A. K.; BRANDSÆTER, L. O.; ELTUN, R.; HANSEN, S.; MANGERUD, K.; POMMERESCHE, R.; RILEY, H. Effect of tractor weight, depth of ploughing and wheel placement during ploughing in an organic cereal rotation on contrasting soils. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 433-441, 2009. ISSN 0167-1987.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO. **“Acompanhamento de safra brasileira: grãos, primeiro levantamento, outubro 2012”**. Brasília, 2013.

FRANCHINI, D. **Análise do nível de vibrações verticais no assento de um trator agrícola**. 2007. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Mecanização Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

FURLANI, C. E. A.; CORTEZ, J. W.; TOLEDO, A. D.; SILVA, R. P. D.; GROTTA, D. C. C.; REIS, G. N. D. Tractor performance as a function of speed and seeder s tire inflation pressure. **Ciência Rural**, v. 40, p. 1726-1731, 2010. ISSN 0103-8478.

KATHIRVEL, K.; MANIAN, R.; BALASUBRAMANIAN, M. Tractive Performance of Power Tiller Tyres. **Agric Mech Asia Afr Lat Am**, v. 32, n. 2, p. 32-36, 2001. ISSN 0084-5841.

MOLARI, G.; BELLENTANI, L.; GUARNIERI, A.; WALKER, M.; SEDONI, E. Performance of an agricultural tractor fitted with rubber tracks. **Biosystems Engineering**, v. 111, n. 1, p. 57-63, 2012. ISSN 1537-5110.

PRANAV, P. K.; PANDEY, K. P. Computer simulation of ballast management for agricultural tractors. **Journal of Terramechanics**, v. 45, n. 6, p. 185-192, 2008. ISSN 0022-4898.

PRASANNA KUMAR, G. V. Development of a computer program for the path generation of tractor hitch points. **Biosystems Engineering**, v. 113, n. 3, p. 272-283, 2012. ISSN 1537-5110.

SAFA, M.; SAMARASINGHE, S.; MOHSSEN, M. Determination of fuel consumption and indirect factors affecting it in wheat production in Canterbury, New Zealand. **Energy**, v. 35, n. 12, p. 5400-5405, 2010. ISSN 0360-5442.

SPAGNOLO, R. T.; VOLPATO, C. E. S.; BARBOSA, J. A.; PALMA, M. A. Z.; BARROS, M. M. D. Fuel consumption of a tractor in function of wear, of ballasting and tire inflation pressure. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 131-139, 2012. ISSN 0100-6916.

Artigo I

Influência da pressão interna dos pneus e da inclinação da linha de tração no desempenho de um trator agrícola 4 x 2 TDA

Influência da pressão interna dos pneus e da inclinação da linha de tração no desempenho de um trator agrícola 4 x 2 TDA

Resumo: Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito da pressão interna dos pneus, da inclinação da linha de tração e a força de tração desenvolvida no desempenho em tração de um trator agrícola. Foram utilizadas três pressões internas nos pneus (12, 14 e 16 psi), três inclinações da linha de tração e quatro forças de tração (3,57; 6,86; 12,46 e 16,23 kN), no delineamento inteiramente casualizado com oito repetições. Foi utilizado um trator agrícola 4x2 com tração dianteira auxiliar, equipado com pneus de construção diagonal. O trator recebeu uma série de transdutores conectados a um sistema de aquisição de dados para mensurar os parâmetros de interesse. Os fatores pressão interna dos pneus e força de tração apresentaram efeito linear e quadrático no deslizamento dos rodados do trator. A classe de inclinação apresentou efeito significativo para a maior força de tração dentro de cada pressão interna dos pneus, sendo que os maiores valores foram observado para a classe de inclinação que variava de 2 a 4° abaixo do plano horizontal de referência, que apresentava a maior transferência de peso teórica. Os maiores valores de deslizamento ocorreram na combinação entre a maior pressão interna dos pneus e a maior força de tração, sendo o valor próximo a 13%. A pressão interna dos pneus e a força de tração apresentaram efeito linear positivo na potência demandada na barra de tração do trator, sendo que o efeito da força foi mais pronunciado que o da pressão. Também foi observado efeito linear e positivo da pressão interna dos pneus e da força de tração para a variável consumo horário de combustível, sendo novamente o efeito da força de tração mais pronunciado que o da pressão.

Palavras-chave: Deslizamento dos rodados, potência, consumo horário, barra de tração, mecanização agrícola.

Influence of tire internal pressure and the line traction inclination in the performance of a MFWD farm tractor

Abstract: The objective of this work was to evaluate the effect of the internal pressure of tires, line traction inclination and traction force on the farm tractor performance. Were used three internal pressures in the tires (12, 14 e 16 psi), three inclinations of the line traction and four traction forces (3,57; 6,86; 12,46 e 16,23 kN), in completely randomized design, with four replicates. Was used a MFWD farm tractor, equipped with diagonal tires construction. The tractor received a serie of transducers connected to a data acquisition system to measure the interest parameters. The internal pressure of the tires and traction force had linear effect in the slip of tractor wheelsets. The inclination class had significant effect for the larger traction force in each internal pressure of the tires, being the high values observed for class of inclination ranging from 2 to 4 ° below the horizontal plane of reference. The higher slip values occurred in the combination between the higher internal pressure of the tires with the higher traction force, being the values next to 13%. The internal pressure of the tires and the traction force had positive linear effect on drawbar power demand, being the force effect higher than pressure. also was observed positive linear effect of internal pressure of the tires and traction force on the fuel consumption, being the force effect higher than pressure.

Key words: slip of wheelsets, power, fuel consumption, drawbar, agricultural mechanization

1. Introdução

Dentre os avanços tecnológicos advindos do processo de modernização da agricultura brasileira, a mecanização agrícola tem papel de destaque uma vez que possibilitou a ampliação das áreas cultivadas, aumentando dessa forma os rendimentos agrícolas.

Segundo Prasanna Kumar (2012), os tratores agrícolas correspondem a parte mais representativa da mecanização agrícola e apresentam extrema importância no aumento da produtividade na agricultura. Outro aspecto importante na mecanização é otimizar o emprego da mão de obra no campo, pois com o uso de processos mecanizados o homem consegue obter produtividade superior à conseguida com trabalhos puramente manuais. A logística das atividades ao longo do ano agrícola também é facilitada devido ao alto rendimento operacional dos conjuntos mecanizados, permitindo assim, melhor planejamento das atividades pelo agricultor.

O trator agrícola aparece como principal fonte de potência no campo, caracterizando-se por ser uma máquina extremamente dinâmica e multifuncional, podendo ser utilizada em quase todas as operações compreendidas entre o plantio e a colheita. O desenvolvimento e incorporação de novas tecnologias no projeto dos tratores favoreceram o desempenho e a eficiência de tais máquinas ao longo das décadas. De acordo com Kolator & Białobrzewski (2011), as máquinas agrícolas modernas caracterizam-se pelo elevado nível tecnológico, pela presença marcante da automação e pela integração entre os seus módulos.

De um modo mais amplo, o desempenho de um trator pode ser medido pela competência com a qual a máquina converte a energia proveniente do combustível em potência disponível para a realização de trabalho em qualquer um dos seus meios de utilização de potência. A maioria dos tratores agrícolas utilizam motores de ignição por compressão, destacando-se os motores a diesel. A energia gerada pela queima do óleo diesel não é totalmente convertida em energia para realização de trabalho, devido às perdas que ocorrem ao longo dos elementos de transmissão até chegar aos meios de aproveitamento de potência do trator.

O rendimento mecânico de um trator pode ser expresso pela eficiência tratória e/ou pelo rendimento de tração. A eficiência tratória é definida como sendo a razão entre a potência de saída e a potência de entrada de um dispositivo de tração (ASABE, 2003), ou seja, é a relação entre a potência disponível na barra de tração e potência final no sistema de transmissão. De acordo com Shell et al. (1997) e Turner

et al. (1997), o rendimento de tração é a fração da potência disponível no motor que é disponibilizada para a realização de esforços na barra de tração.

A barra de tração é o meio de aproveitamento mais utilizado nos tratores, principalmente quando o objetivo é tracionar implementos mais largos e mais pesados. Apesar da ampla utilização, a barra de tração é o meio de aproveitamento que apresenta menor eficiência devido a grande perda de energia na interface solo-máquina, representada pelos rodados do trator.

Segundo Barbosa et al. (2005), o pneu de um trator é um de seus componentes mais importantes, pois é responsável pela sustentação, equilíbrio, deslocamento, direcionamento e realização do esforço tratório. A capacidade de fornecer potência para tracionar implementos e realizar satisfatoriamente as operações agrícolas depende da configuração do rodado que equipa o trator. De acordo com Arvidsson et al. (2011), dispositivos de tração com maior área de contato com o solo reduzem a compactação e são capazes de fornecer uma maior capacidade de tração.

Para Zoz & Grisso (2003), os principais fatores que afetam o rendimento de tratores agrícolas de pneus são a carga aplicada sobre o eixo motriz, a transferência de peso, tamanho e pressão interna dos pneus. Outro fator, extrínseco à máquina, que interfere na capacidade de tração são as condições da camada superficial do solo, pois a resposta do solo ao cisalhamento interfere negativa ou positivamente na capacidade do solo em resistir aos esforços de tração impostos pelos rodados do trator.

O cisalhamento do solo devido ao estresse mecânico gera uma força potencial no solo que permite o deslocamento da roda sobre o mesmo, sendo que esta força se correlaciona positivamente com a resistência do solo à penetração. Segundo Garciano et al. (2010), a resistência ao rolamento de veículos fora-de-estrada está diretamente relacionada com a compressibilidade, de modo que o índice de cone de um solo pode ser um indicador adequado para caracterizar o comportamento em tração de um veículo.

A capacidade de tração é também influenciada pela transferência de peso, que corresponde à parcela do peso estático dianteiro que pode ser somado ao peso estático traseiro, em condição dinâmica, durante o desenvolvimento do esforço de tração. De acordo com Pranav et al. (2008), um fator considerável no desempenho em tração de um trator é a quantidade de carga dinâmica que atua sobre o eixo,

ressaltando-se então a importância do uso adequado dos lastros e sua interação com a transferência de peso.

Numa análise bidimensional, onde é atribuído ao trator características de um corpo rígido atuando sobre uma superfície indeformável e que a resultante das forças atuantes é nula, é possível fazer uma estimativa da transferência de peso entre o eixo dianteiro e traseiro. As equações que fornecem tal estimativa levam em consideração o ângulo com o qual a força é aplicada na barra de tração, sendo assim a transferência de peso é influenciada pela magnitude e inclinação da linha de tração realizada pelo trator. Sahay & Tewari (2004), realizaram uma simulação computacional para caracterizar a influência da inclinação, obtida pela alteração da altura de acoplamento do implemento, no desempenho em tração. Esses autores concluíram que quanto mais baixo o ponto de acoplamento do implemento, maior a tração desenvolvida.

O efeito combinado do tipo de dispositivo de tração, da característica do solo e da transferência de peso, exerce influência fundamental no deslizamento apresentado pelo trator. A maior redução de eficiência ocorre no contato do rodado com o solo por meio do deslizamento relativo entre as superfícies do solo e do rodado, e que pode ser definido como uma razão entre as velocidades translacional e rotacional do dispositivo de tração. Além do deslizamento relativo entre as duas superfícies, considera-se também o efeito da deformação dos pneus e do solo na redução da velocidade translacional, esses fatores atuando concomitantemente são definidos pela ASABE (2003), pelo termo de razão redução de percurso.

É importante conhecer o índice de deslizamento durante uma determinada operação, pois elevadas taxas acarretam redução da eficiência tratória e num consequente consumo desnecessário de combustível. Segundo Šmerda & Čupera (2010), existem duas maneiras básicas para se reduzir os índices de deslizamento, uma delas é por meio da adição de lastros e a outra pelo aumento da área de contato entre rodado e solo. De acordo Lyasko (2010), a pressão dos pneus exerce grande influência no desempenho em tração de um trator agrícola. A redução na pressão de um pneu resulta no aumento de sua área de contato com o solo, o que eleva a capacidade de tração e reduz o potencial de compactação por ele causado.

Objetivou-se com este trabalho verificar a influência da pressão dos pneus, da força de tração e do seu respectivo ângulo de aplicação na barra de tração, nos parâmetros de desempenho de um trator agrícola 4 x 2 TDA.

2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido no campo experimental “Diogo Alves de Mello”, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa – UFV, localizada no município de Viçosa, Minas Gerais.

O experimento foi realizado com um trator agrícola 4 x 2 TDA equipado com pneus diagonais, sendo analisada a influência da pressão dos pneus, da força de tração desenvolvida e da inclinação da linha de tração no desempenho do trator. O experimento foi estabelecido em esquema fatorial 3 x 3 x 4 (três pressões, três classes de inclinações da linha de tração e quatro níveis de força de tração), no delineamento inteiramente casualizado, com oito repetições. Todos os tratamentos foram realizados numa pista uniforme de solo compactado (“chão batido”), com trinta metros de comprimento e três metros de largura, totalizando uma área experimental de noventa metros quadrados.

2.1. Tratores

Para a realização do trabalho, foi utilizado um trator John Deere® (Figura 1), modelo 5705 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e potência de 62,56 kW (85 cv) no motor a 2400 rpm, o qual recebeu a instrumentação necessária para a condução do trabalho (Tabela 1).

Para atuar como lastro e fonte variação do esforço de tração do trator ensaiado foi utilizado um trator da marca Valtra-Valmet®, modelo 800, 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e potência de 58,88 kW (80 cv) no motor a 2400 rpm.



Figura 1. Trator John Deere® modelo 5705 utilizado no experimento.

Tabela 1. Especificações do trator John Deere 5705

Especificações	
Potência do motor na rotação nominal	63 kW
Potência da TDP na rotação nominal do motor	53 kW
Rotação de potência máxima	2400 rpm
Faixa de rotação com potência constante	2000 – 2400 rpm
Torque máximo	330 Nm
Rotação de torque máximo	1600 rpm
Número de cilindros do motor	4
Cilindrada	4500 cm ³
Aspiração	Turboalimentado
Relação peso/potência	498,29 kW N ⁻¹

FONTE: John Deere®.

2.2. Pneus utilizados

No experimento foi utilizado o modelo Pirelli® TM 95 18.4-30 no eixo traseiro e Goodyear® Dyna Torque II 12.4-24 no eixo dianteiro. Um resumo das especificações fornecidas pelos fabricantes está disposto na Tabela 2. Não foi utilizado lastro líquido em nenhum dos pneus do trator.

Tabela 2. Especificações nominais básicas sobre os pneus utilizados no experimento

Pneu	Banda de rodagem	Largura da seção	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro do aro (mm)	Carga máxima (Kg)	Nº de lonas
18.4 – 30	R1	0,4674	1551,9	760,0	2815	10
12.4 – 24	R1	0,3150	1163,3	609,6	1200	6

FONTE: Catálogo Goodyear® e Pirelli®.

2.2.1. Pressões utilizadas

Foram utilizadas as pressões de 82,74 kPa (12 psi); 96,53 kPa (14 psi) e 110,32 kPa (16 psi); sendo que os pneus do eixo dianteiro e traseiro receberam a mesma pressão na condução do experimento.

2.3. Magnitude e ângulo de aplicação da força na barra de tração

2.3.1. Ângulo de aplicação da força na barra de tração

Os ângulos de aplicação da força na barra de tração (inclinação da linha de tração) foram obtidos a partir de uma estrutura (Figura 2) acoplada ao para-choque do trator lastro. Essa estrutura possui três alças de atrelamento espaçadas entre si em 420 mm. O trator ensaiado tracionou o trator lastro através de um cabo de aço, que conectava a barra de tração a uma das alças de atrelamento da estrutura.

Foram então determinadas classes de inclinação da linha de tração (Tabela 3). Cada classe engloba uma faixa de variação do ângulo de inclinação, determinadas a partir imagens laterais do acoplamento analisadas em programa de CAD.



Figura 2. Estrutura utilizada para variar o ângulo de aplicação da força.

Tabela 3. Classes de inclinação de aplicação da força na barra de tração

Classe	Faixa
1	-2° a -4°
2	5° a 7°
3	15° a 17°

Observação: O sinal negativo indica que o ângulo está abaixo de um plano horizontal posicionado na altura da barra de tração do trator ensaiado.

2.3.2. Força de tração

A variação da força aplicada na barra de tração foi obtida a partir da seleção das marchas do trator lastro, que durante a tração permaneceu com o motor desligado e engrenado com a marcha que fornecia força de tração utilizada em cada tratamento. Nessa condição, a resistência ao deslocamento do trator lastro é originária do sistema de transmissão e do torque de cada marcha selecionada para o tratamento.

No experimento, a força de tração foi monitorada por meio de uma célula de carga associada ao cabo de aço que fazia a ligação entre os dois tratores. Para uma mesma marcha do trator lastro, a força variava em função do ângulo com a qual era aplicada na barra de tração do trator ensaiado, sendo necessária uma padronização para facilitar a análise do experimento. As forças foram decompostas e a componente horizontal média foi estabelecida como padrão no experimento. As

marchas do trator lastro e as respectivas forças de tração estão relacionadas na Tabela 4.

Tabela 4. Marchas utilizadas no trator lastro com suas respectivas forças de tração padronizadas

Força	Marcha	Tração dianteira	Força padrão (kN)	CV (%)
1	3ª Simples	Ligada	3,57	6,69
2	1ª Simples	Ligada	6,86	7,89
3	3ª Reduzida	Ligada	12,46	6,48
4	2ª Reduzida	Desligada*	16,23	7,99

(*) – A resistência gerada por essa marcha com a tração dianteira ligada estava acima da capacidade de tração do trator ensaiado. Nessa condição os pneus traseiros eram arrastados sobre o solo.

2.4. Velocidade operacional

Em todos os tratamentos do experimento foi utilizada a marcha 1ª B do trator, que proporciona uma velocidade operacional média de $1,48 \text{ m s}^{-1}$, com o motor na rotação de 2400 rpm.

2.5. Caracterização da pista utilizada no experimento

O desempenho em tração de qualquer veículo é dependente das características da superfície por ele trafegada, sendo assim foi realizada uma caracterização física da área experimental. A metodologia e procedimento utilizado para tal caracterização segue o proposto pela Embrapa (1997).

2.5.1. Teor de água no solo

Foi utilizado o método gravimétrico padrão, com base na massa de terra seca em estufa à temperatura de $105 - 110^\circ \text{ C}$ até atingir massa constante, conforme Embrapa (1997). A amostragem foi realizada antes da execução do experimento, sendo coletadas dez amostras na pista experimental, para camada de 0 a 0,15 m de profundidade.

2.5.2. Densidade do solo

A amostragem foi realizada antes da aplicação dos tratamentos, sendo retiradas dez amostras na pista de teste, para a camada de 0 a 0,15 m de profundidade. Utilizou-se o método do anel volumétrico, conforme descrito pela Embrapa (1997).

2.5.3. Resistência do solo à penetração

Foi obtida com um penetrômetro, modelo PNT-2000 (Figura 3). A coleta dos dados foi realizada no dia da execução do experimento, em trinta pontos dentro da pista de testes. Os valores de resistência à penetração do solo foram obtidos para a camada de 0 a 0,15 m, sendo seus valores expressos em MPa.



Figura 3. Vista frontal do penetrômetro utilizado.

2.6. Instrumentação do trator e parâmetros operacionais diretos

Com objetivo de tornar a coleta de dados mais simples, rápida e confiável o trator recebeu um conjunto de transdutores para a avaliação dos parâmetros de interesse. Todos os transdutores foram conectados a um sistema de aquisição de dados, que por sua vez foi conectado a um computador que armazenou os dados para posterior processamento.

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados da marca Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), modelo Spider 8[®], gerenciado pelo software HBM Catman[®] 2.2 instalado em um computador portátil embarcado no trator, em uma estrutura construída especificamente para esse propósito. Os dados adquiridos pelo computador foram armazenados para posterior processamento.

Os transdutores utilizados foram previamente calibrados, de modo a se conhecer sua resposta elétrica (tensão ou frequência) em função do parâmetro não elétrico medido, o que permite a configuração do software da melhor forma possível.

O sistema foi configurado para obter informações de todos os transdutores utilizados com uma taxa de amostragem de 50 Hz, ou seja, 50 dados para cada segundo de deslocamento do trator ao longo da parcela. No final de cada parcela o

sistema era interrompido e os dados gerados pelos transdutores eram salvos numa planilha eletrônica.

2.6.1. Velocidade operacional do trator (V_{op})

A velocidade desenvolvida pelo trator durante a operação, que corresponde à velocidade translacional dos pneus, foi obtida com o uso de uma unidade de radar de efeito Doppler, da marca Dickey John®, modelo Radar II (Figura 4). O radar utilizado é capaz de medir velocidades entre 0,53 e 96,6 Km h⁻¹, apresentando uma precisão de $\pm 3\%$ para a faixa de velocidade que engloba a utilizada na condução do experimento. Antes da realização do experimento o radar foi calibrado, resultando numa frequência de 59,95 mHz para cada 1 m s⁻¹ de velocidade operacional do trator.



Figura 4. Unidade de radar utilizado para medição da velocidade instantânea.

2.6.2. Rotação dos eixos motrizes (n)

A velocidade angular das rodas motrizes do trator foi monitorada com o auxílio de transdutores indutivos tubulares associados a cada uma das rodas por meio de suportes. A alteração do campo magnético (indução) dos transdutores ocorre pela passagem de aletas equidistantes dispostas na periferia de uma coroa circular afixada concentricamente dentro da calota do rodado, servindo assim como sistema referencial.

O sistema de aquisição de dados foi configurado para fazer a leitura da frequência com a qual ocorria a alteração do campo magnético dos transdutores de modo que cada alteração correspondesse a 1 Hz, sendo assim o sistema foi

calibrado para 45 Hz rps⁻¹. Os transdutores utilizados foram da marca Autonics, modelo PRCM 18 (Figura 5), cilíndrico, com distância de detecção de 5 mm e 18 mm de diâmetro.



Figura 5. Sensor indutivo utilizado para a determinação da velocidade angular dos rodados.

2.6.3. Força de tração (F)

A força necessária para tracionar o trator lastro foi monitorada por meio de uma célula de carga conectada ao sistema de aquisição de dados. Foi utilizada uma célula de carga da marca Kratos[®], com capacidade máxima para 50 kN e com sinal de resposta de 306,63 N mV⁻¹.

A célula de carga foi ligada entre o cabo de aço e a barra de tração do trator, conforme a Figura 6.



Figura 6. Posicionamento da célula de carga entre o cabo de aço e a barra de tração.

2.6.4. Consumo horário de combustível (C_h)

O volume de combustível consumido durante o experimento foi determinado com o uso do medidor de fluxo volumétrico devidamente instalado no sistema de alimentação de combustível do motor do trator ensaiado, sendo o volume expresso por unidade de tempo ($L h^{-1}$).

O medidor de fluxo de combustível utilizado foi da marca FLOWMATE M-III[®], modelo LSF41C (Figura 7). O consumo foi obtido com base na frequência de rotação dos rotores que constituem o medidor, sendo que a calibração prévia resultou num fluxo de $3,59 L h^{-1} Hz^{-1}$.



Figura 7. Fluxômetro utilizado para determinação do consumo de combustível.

2.7. Parâmetros operacionais obtidos indiretamente

Os parâmetros operacionais citados nos itens anteriores são obtidos de forma direta, uma vez que são decorrentes da conversão analógico-digital proporcionada pelo sistema de aquisição de dados e pela calibração prévia dos transdutores utilizados na mensuração de tais parâmetros.

A seguir serão relacionados parâmetros que foram obtidos a partir de equações que dependem de alguns dos parâmetros ditos diretos e de algumas determinações realizadas no trator ensaiado.

2.7.1. Raio de rolamento dos pneus (r_r)

O raio de rolamento é aquele que contribui efetivamente para o deslocamento periférico do pneu ao longo de uma volta completa do eixo motriz, em condições que o deslizamento seja desprezível. Foram obtidos os raios de rolamento dos pneus em

cada uma das pressões utilizadas no experimento, com a tração dianteira auxiliar ligada e desligada.

A determinação foi realizada em pista de concreto, em uma velocidade operacional média de $1,29 \text{ m s}^{-1}$, com a velocidade angular de cada eixo sendo monitorada e registrada pelo computador. O raio de rolamento foi obtido pela Equação 1.

$$r_r = \frac{V_{op}}{2 \pi n} \quad (1)$$

em que,

r_r = Raio de rolamento (m);

V_{op} = Velocidade operacional (m s^{-1}); e,

n = Rotação do eixo motriz (rps).

2.7.2. Deslizamento dos rodados do trator (s)

Foi obtido através da relação entre velocidade translacional e rotacional para cada um dos rodados da máquina, de acordo com a Equação 2.

$$s = \frac{2 \pi n r_r - V_{op}}{V_{op}} 100 \quad (2)$$

em que,

s = Deslizamento do trator (%);

n = Rotação do eixo motriz (rps);

r_r = Raio de rolamento do pneu (m); e,

V_{op} = Velocidade operacional do trator (m s^{-1}).

2.7.3. Relação mecânica entre eixos (R_M)

Os tratores agrícolas dotados de tração dianteira auxiliar são caracterizados visualmente por apresentarem pneus não isodiamétricos, sendo os maiores no eixo traseiro e os menores no dianteiro. Para um funcionamento adequado da máquina é desejável que a velocidade tangencial periférica dos pneus do eixo dianteiros seja a igual ou ligeiramente superior a dos pneus do eixo traseiro. Para se obter tal efeito, é

necessário que os eixos que transmitem torque aos pneus tenham rotações distintas para compensar a diferença entre o raio dos pneus dianteiros e traseiros.

Como os pneus dianteiros apresentam o menor diâmetro, é de se esperar que a rotação do eixo dianteiro seja superior àquela encontrada no eixo traseiro. A relação mecânica é o quociente da divisão entre a velocidade angular do eixo dianteiro pela velocidade angular do eixo traseiro, conforme denota a Equação 3.

$$R_M = \frac{n_d}{n_t} \quad (3)$$

em que,

R_M = Relação mecânica entre eixos (adm);

n_d = Rotação do eixo dianteiro (rps); e,

n_t = Rotação do eixo traseiro (rps).

2.7.4. Relação entre os raios de rolamento dianteiro e traseiro (R_R)

Conforme relatado no item 2.7.2, a velocidade tangencial periférica dos pneus são dependentes da rotação do eixo motriz e do raio de rolamento desenvolvido pelo pneu. Dessa forma, torna-se importante conhecer a relação entre os raios dos pneus dianteiros e traseiros que equipam um trator 4 x 2 TDA. Tal relação é obtida pela Equação 4.

$$R_R = \frac{r_{rd}}{r_{rt}} \quad (4)$$

em que,

R_R = Relação entre raios (adm);

r_{rd} = Raio de rolamento dos pneus dianteiros (m); e,

r_{rt} = Raio de rolamento dos pneus traseiros (m).

2.7.5. Avanço cinemático (A_C)

Expressa a relação entre a velocidade tangencial periférica dos pneus dianteiros e traseiros. Conhecendo essa relação é possível verificar se a velocidade proporcionada por um pneu, em diferentes condições operacionais, garante um funcionamento adequado do trator. Uma relação alta indica que a velocidade

proporcionada pelo pneu dianteiro supera aquela obtida pelo pneu traseiro, e vice-versa. Quando essas relações são muito extremas surgem situações que diminuem a eficiência do trator, podendo causar deslizamento muito elevado no pneu dianteiro (alta relação) ou o arraste desse mesmo pneu sobre a superfície (baixa relação). O avanço cinemático é calculado pela Equação 5.

$$A_C = (R_M R_R - 1) 100 \quad (5)$$

em que,

A_C = Avanço cinemático (%);

R_M = Relação mecânica entre eixos (adm); e,

R_R = Relação entre raios (adm).

2.7.6. Potência na barra de tração

A potência média exigida na barra de tração para tracionar o trator lastro foi estimada pela Equação 6.

$$P_{bt} = F V_{op} \quad (6)$$

em que,

P_{bt} = Potência na barra de tração (kW);

F = Força de tração média (kN); e,

V_{op} = Velocidade operacional do trator ($m s^{-1}$).

2.7.7. Consumo específico de combustível

O consumo de combustível por unidade de potência, por hora trabalhada foi calculado pela Equação 7.

$$C_e = \frac{C_h}{P_{bt}} \quad (7)$$

em que,

C_e = Consumo específico de combustível ($L h^{-1} kW^{-1}$);

C_h = Consumo horário de combustível ($L h^{-1}$); e,

P_{bt} = Potência na barra de tração (kW).

2.7.8. Transferência de peso entre os eixos motrizes

O peso dinâmico sobre os eixos é proveniente da alteração da condição de equilíbrio estático do trator, quando o mesmo inicia um processo de tração. Essa alteração é decorrente da transferência de peso entre os eixos dianteiros e traseiros, ocorrendo então um, acréscimo ou subtração de parte da carga estática sobre cada eixo em condição dinâmica (tração).

A transferência de peso, e a consequente alteração da carga dinâmica sobre os eixos, podem ser estimadas com equações matemáticas onde se assume que o trator atua como um corpo rígido operando sobre superfície indeformável, em aceleração nula ou constante. Os cálculos foram baseados na força de tração média obtida em cada parcela e com os respectivos ângulos de aplicação na barra de tração.

2.7.8.1. Peso do trator (P_t)

O peso total e o peso sobre cada eixo motriz do trator foi determinado em balança rodoviária. Durante a pesagem o trator estava com o tanque de combustível completamente cheio e sem lastro líquido nos rodados.

2.7.8.2. Centro de gravidade do trator (C_g)

Para realizar a estimativa da transferência de peso durante o desenvolvimento de tração, é necessário ter conhecimento da localização do centro de gravidade do trator. A determinação do centro de gravidade do trator estudado foi realizada pelo método das pesagens conforme metodologia disponível em Goering et al. (2003).

2.7.8.3. Peso dinâmico sobre o eixo dianteiro (C_{dd})

O peso dinâmico atuando sobre o eixo dianteiro do trator ensaiado foi estimado a partir da Equação 8, que utiliza as forças e dimensões representadas na Figura 8.

$$P_{dd} = \frac{P_t x_1 - F \sin(\alpha) x_3 - F \cos(\alpha) z - F_{rd} r_{rd} - F_{rt} r_{rt}}{x_1 + x_2} \quad (8)$$

em que,

P_{dd} = Peso dinâmico sobre o eixo dianteiro (kN);

P_t = Peso total do trator (kN);

F = Força de tração (kN);

x_1 = Distância entre o eixo traseiro e o centro de gravidade (m);

x_2 = Distância entre o eixo dianteiro e o centro de gravidade (m);

x_3 = Distância entre o eixo traseiro e a barra de tração (m);

z = Altura da barra de tração em relação ao solo (m);

F_{rd} = Resistência ao rolamento do pneu dianteiro (kN);

F_{rt} = Resistência ao rolamento do pneu traseiro (kN);

r_{rd} = Raio de rolamento do pneu dianteiro (m);

r_{rt} = Raio de rolamento do pneu traseiro (m); e

α = Ângulo de aplicação da força na barra de tração ($^\circ$).

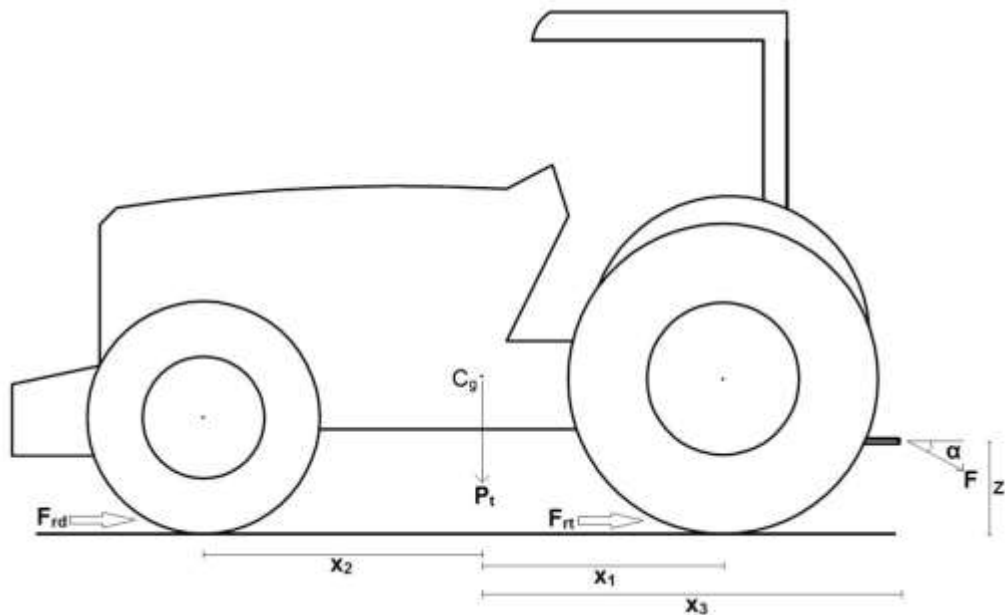


Figura 8. Diagrama de forças e dimensões utilizadas na estimativa do peso dinâmico sobre os rodados dianteiros e traseiros do trator estudado.

2.7.8.4. Peso dinâmico sobre o eixo traseiro (P_{dt})

O peso dinâmico atuando sobre o eixo traseiro do trator ensaiado foi estimada a partir da Equação 9.

$$P_{dt} = P_t + F \sin(\alpha) - C_{dd} \quad (9)$$

em que,

P_{dt} = Peso dinâmico sobre o eixo traseiro (kN);

P_t = Peso total do trator (kN);

F = Força de tração (kN);

α = Ângulo de aplicação da força na barra de tração ($^{\circ}$); e,

C_{dd} = Carga dinâmica sobre o eixo dianteiro (kN).

2.7.8.5. Peso dinâmico total (P_{dt})

O ângulo de atuação e a magnitude da força aplicada na barra de tração influenciam no peso total do trator em condição dinâmica. O peso dinâmico total é a soma do peso dianteiro e traseiro em condição dinâmica (Equação 10).

$$P_{dt} = P_{dt} + P_{dd} \quad (10)$$

em que,

P_{dt} = Peso dinâmico total (kN);

P_{dt} = Peso dinâmico sobre o eixo traseiro (kN); e,

P_{dd} = Peso dinâmico sobre o eixo dianteiro (kN).

2.7.8.6. Resistência ao rolamento dos pneus utilizados (F_r)

A resistência ao rolamento é basicamente a força necessária para movimentar um pneu sobre uma determinada superfície com uma aceleração nula. A magnitude de tal força é dependente da condição de superfície, das características do pneu e da carga que atua sobre o eixo motriz.

A estimativa da resistência ao rolamento dos pneus utilizados no experimento foi feita com base na metodologia disponível em ASABE (2011) (Equação 11).

$$F_r = C_d (B_n^{-1} + 0,04 + 0,5 s B_n^{-1/2}) \quad (11)$$

em que,

F_r = Resistência ao rolamento do pneu (kN);

C_d = Carga dinâmica sobre o eixo motriz (kN);

B_n = Índice de mobilidade do pneu (adm); e,

s = Deslizamento do trator (decimal).

O índice de mobilidade do pneu é estimado pela Equação 12.

$$B_n = \frac{I_c L_p D_p}{C_d} \left(\frac{1+5 \delta/h}{1+3 L_p/D_p} \right) \quad (12)$$

em que,

B_n = Índice de mobilidade do pneu (adm);

I_c = Índice de cone para a camada de 0 a 15 cm (kPa);

L_p = Largura indeformada do pneu (m);

D_p = Diâmetro indeformada do pneu (m);

C_d = Carga dinâmica sobre o eixo motriz (kN);

δ = Deflexão do pneu (m); e,

h = Altura da seção do pneu (m).

2.7.9. Eficiência na barra de tração (E_{bt})

A eficiência na barra de tração remete a fração da potência nominal do motor que é utilizada na barra de tração durante o desenvolvimento de determinada tarefa pelo trator. A eficiência é calculada de acordo com a Equação 13.

$$E_{bt} = \frac{P_{bt}}{P_{nm}} \quad (13)$$

em que,

E_{bt} = Eficiência na barra de tração (adm);

P_{bt} = Potência na barra de tração (kW); e,

P_{nm} = Potência nominal do motor (kW).

2.7.10. Razão de tração do trator (RTT)

A capacidade de tração de um trator é dependente do peso que este apresenta em condição de trabalho, sendo que quanto maior o peso maior é a tração. A razão de tração do trator estabelece uma relação entre a força desenvolvida na barra de tração e o peso total do trator em condição dinâmica, sendo calculada de acordo com a Equação 14.

$$RTT = \frac{F_t}{P_{dt}} \quad (14)$$

em que,

RTT = Razão de tração do trator (adm);

F_t = Força de tração (kN); e,

P_{dt} = Peso dinâmico total do trator (kN).

2.8. Procedimento na execução do experimento

A pista utilizada no experimento possuía um comprimento de 30 metros e mais 15 metros adicionais para estabilizar o deslocamento do trator. O conjunto formado pelo trator ensaiado e trator lastro, denominado comboio, percorria todo o comprimento da parcela experimental com o sistema de aquisição operando. Quando o comboio chegava ao final da parcela o sistema era pausado e os dados referentes aos parâmetros operacionais de interesse eram salvos em planilha eletrônica para posterior análise.

A tração dianteira auxiliar (TDA) foi mantida ligada em todos os tratamentos, com a finalidade de se obter a máxima tração possível do trator ensaiado.

Para otimizar todo o procedimento foram utilizadas pressões decrescentes e dentro de cada pressão foram sorteadas as combinações entre magnitude e ângulo de aplicação da força na barra de tração. Antes de percorrer cada parcela, era selecionada a marcha do trator lastro e o ângulo de aplicação da força a partir das alças de atrelamento do suporte.

2.9. Análise dos dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, independentemente da interação tripla ser ou não significativa optou-se pelo desdobramento completo dos fatores devido ao interesse no estudo. A interação

entre os fatores pressão interna dos pneus e força de tração foi analisada por meio de regressão linear dentro de cada classe de inclinação, sendo os modelos selecionados com base no coeficiente de determinação, no comportamento do fenômeno e na significância dos coeficientes de regressão com a utilização do teste t. O efeito da classe de inclinação de aplicação da força na barra de tração (fator qualitativo) foi estudado dentro de cada combinação entre os fatores pressão interna dos pneus e força de tração, sendo efetuado o teste de Tukey.

Posteriormente, os fatores pressão interna dos pneus e força de tração foram estudados por meio de regressão linear englobando todas as classes de inclinação, com o intuito de extrapolar o estudo para uma condição real de trabalho do trator, onde se verifica a variação constante da inclinação da linha de tração.

Para a realização dos procedimentos estatísticos foi utilizado o programa computacional R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012).

3. Resultados e discussão

Inicialmente serão apresentados os resultados necessários para se efetuar os cálculos da transferência de peso do trator, pois essa análise é importante na compreensão dos demais fatores estudados posteriormente nesse trabalho.

3.1. Caracterização da pista experimental

Os resultados da caracterização física da pista utilizada no experimento estão apresentados na Tabela 5. A pista destina-se tipicamente ao tráfego de máquinas entre as lavouras do campo experimental.

Tabela 5. Características da área experimental

Característica	Valor
Resistência à penetração	1105 kPa
Densidade	1,5083 g cm ⁻³
Teor de água	0,1501 kg kg ⁻¹

3.2. Dimensões dos pneus em condição dinâmica, relação entre raios, relação mecânica entre eixos e avanço cinemático

3.2.1. Deflexão

A diferença entre o diâmetro indeformado e deformado foi obtido para cada uma das pressões utilizadas nos pneus durante o experimento. As deflexões médias estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Deflexão dos pneus utilizados (m) para as respectivas pressões internas dos pneus

Pneu		Pressão		
Eixo	Medida	82,74 kPa	96,53 kPa	110,32 kPa
Traseiro	18.4 – 30	0,0638	0,0564	0,0467
Dianteiro	12.4 – 24	0,0462	0,0359	0,0431

3.2.2. Raio de rolamento

Os resultados obtidos na determinação do raio de rolamento dos pneus utilizados no experimento estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Valores médios para o raio de rolamento (m) dos pneus utilizados para as combinações entre TDA ligada e desligada, pressão interna dos pneus e eixo

Pressão (kPa)	TDA ligada		TDA desligada	
	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro
82,74	0,7092 A	0,5279 B	0,7127 A	0,5348 B
96,53	0,7216 A	0,5366 B	0,7189 A	0,5400 B
110,32	0,7291 A	0,5431 B	0,7257 A	0,5473 B

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, maiúscula na linha e para a mesma condição de acionamento da TDA, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Foram realizadas três repetições.

Não houve influencia significativa entre a determinação do raio de rolamento com a tração dianteira ligada e desligada. A pressão interna dos pneus apresentou efeito linear sobre o raio de rolamento em todas as situações. O raio de rolamento utilizado nos cálculos posteriores serão as médias obtidas para a condição de TDA ligada, uma vez que o experimento foi conduzido nessa condição.

3.2.3. Relação entre raios

A divisão do raio de rolamento do pneu dianteiro pelo do pneu traseiro, resulta na relação entre raios. Essa relação é utilizada na determinação do avanço cinemático entre os eixos motrizes do trator. As relações obtidas nas diferentes pressões estudadas no trabalho estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Relação entre raios de rolamento para cada pressão interna utilizada nos pneus

Pressão (kPa)	Relação entre raios (dianteiro/traseiro)
82,74	0,7444
96,53	0,7436
110,32	0,7449

3.2.4. Relação mecânica entre eixos

A relação mecânica é uma característica constante, dependente apenas do sistema de transmissão do trator. Para o trator estudado a relação mecânica determinada foi de 1,3415.

3.2.5. Avanço cinemático

A diferença percentual entre a velocidade tangencial periférica do pneu dianteiro e do traseiro (avanço cinemático) obtida para cada uma das pressões estudadas no trabalho está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9. Avanço cinemático para cada pressão interna utilizada nos pneus

Pressão (kPa)	Avanço cinemático	CV (%)
82,74	-0,1387%	0,2109
96,53	-0,2461%	0,1759
110,32	-0,0717%	0,1401

CV – Coeficiente de variação.

Valores negativos de avanço cinemático indicam que a velocidade tangencial periférica dos pneus do eixo dianteiro são inferiores a dos pneus do eixo traseiro. As relações obtidas neste estudo foram muito estreitas, não interferindo assim no funcionamento do trator. De acordo com Linares et al. (2006) o desempenho do trator é otimizado quando o avanço cinemático fica entre 1 e 5%, desde que o deslizamento não exceda 20%.

Os pneus utilizados em cada eixo foram produzidos fabricantes diferentes (Pirelli e Goodyear), o que pode ter influenciado nos valores de avanço cinemático devido à peculiaridades na arquitetura dos pneus.

3.3. Transferência de peso entre os eixos

A transferência de peso é influenciada pela magnitude e pelo ângulo de aplicação da força na barra de tração do trator ensaiado. Foi realizada uma estimativa da transferência de peso de acordo com as combinações entre a força de tração e seu ângulo de aplicação na barra.

As classes de inclinação de aplicação da força na barra de tração e suas faixas de variação estão representadas na Figura 10.

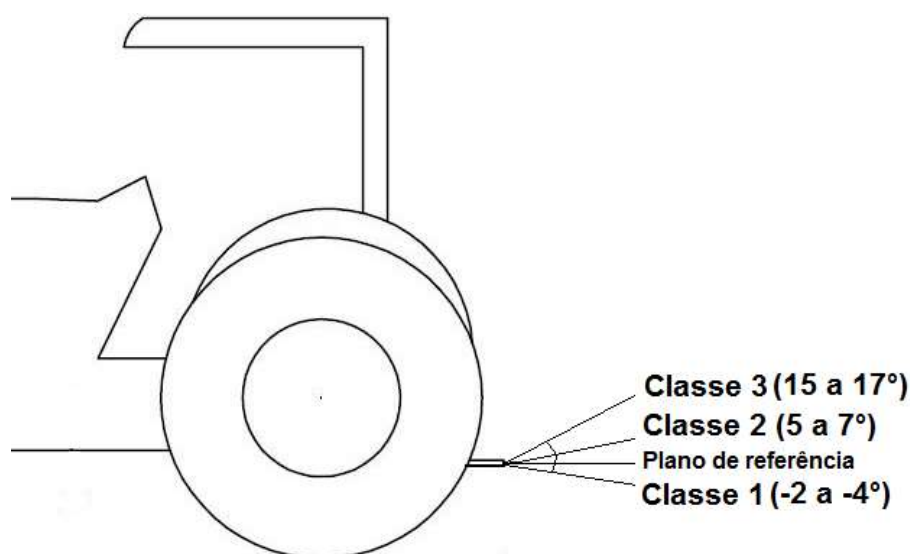


Figura 9. Ângulos de aplicação da força na barra de tração do tator.

3.3.1. Peso estático do trator

O peso total e o peso sobre cada eixo do trator, sem lastro líquido nos pneus e com o tanque de combustível completo, obtidos em balança rodoviária estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Peso estático do trator e sua respectiva distribuição de peso entre os eixos

Eixo	Peso (kN)	Distribuição (%)	Peso/Potência (kN/kW)
Dianteiro	14,60	46,54	-
Traseiro	16,77	53,46	-
Total	31,37	100,00	0,4979

3.3.2. Peso dinâmico sobre o eixo traseiro

As estimativas das alterações do peso atuando sobre o eixo traseiro devido ao esforço de tração realizado pelo trator estão apresentadas na Figura 10.

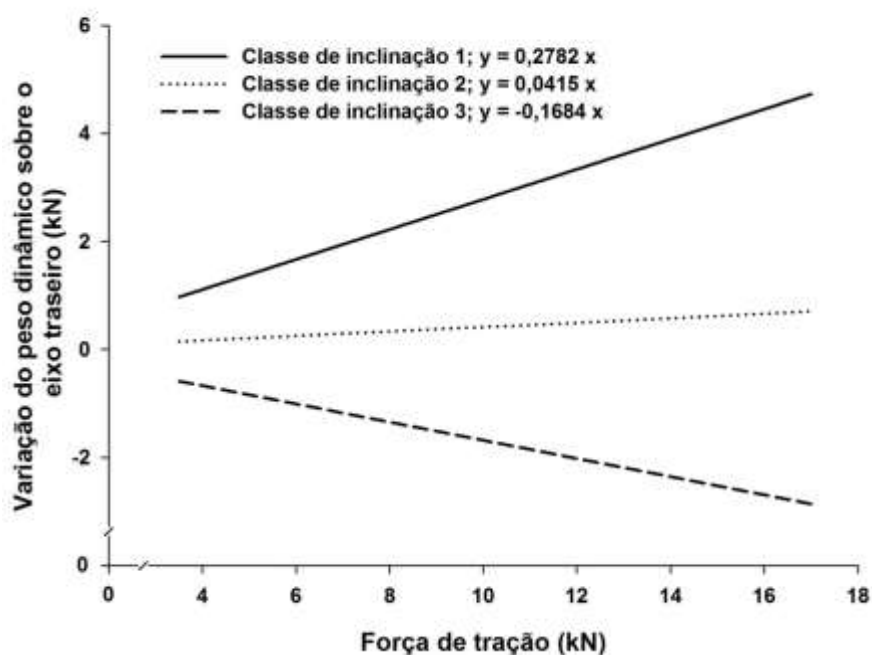


Figura 10. Variação do peso dinâmico sobre o eixo traseiro em função da força de tração para as respectivas classes de inclinação.

A classe de inclinação 3, que corresponde a faixa de ângulo que varia de 15 a 17° de inclinação acima do plano horizontal fictício situado na altura da barra de tração, promoveu um decréscimo gradual do peso dinâmico atuando sobre o eixo traseiro do trator em função da magnitude da força de tração desenvolvida. Nessa classe de inclinação, a força aplicada na barra de tração apresenta uma componente vertical para cima que tende a reduzir o peso sobre o eixo traseiro do trator. O

aumento da força de tração desenvolvida pelo trator resulta numa consecutiva redução do peso sobre o eixo traseiro em condição dinâmica.

A classe de inclinação 1, que corresponde a faixa de ângulo que varia de 2 a 4° de inclinação abaixo do plano de referência, promoveu um efeito contrário ao da classe 3, ou seja, resultou no acréscimo de carga sobre o eixo traseiro do trator. Nesse caso, o aumento da força aplicada na barra de tração apresenta uma componente vertical para baixo que tende a aumentar o peso sobre o eixo traseiro do trator.

A classe de inclinação 2 (5 a 7° acima do plano de referência) também resultou num acréscimo de peso sobre o eixo traseiro, porém em menor escala do que foi observado na classe 1 (-2 a -4°). Esse efeito é explicado pelo fato que a componente da força, vertical e para cima, apresenta menor magnitude do que a classe 1 (-2 a -4°), decorrente do menor ângulo de aplicação da força.

3.3.3. Peso dinâmico sobre o eixo dianteiro

O peso dinâmico sobre o eixo dianteiro é dependente da magnitude e do ângulo de aplicação da força na barra de tração. Quando um trator traciona algum implemento, na maioria dos casos, é de se esperar uma redução do peso dinâmico sobre o eixo dianteiro. O comportamento do peso dinâmico sobre o eixo dianteiro de acordo com os tratamentos estudados está representado na Figura 11.

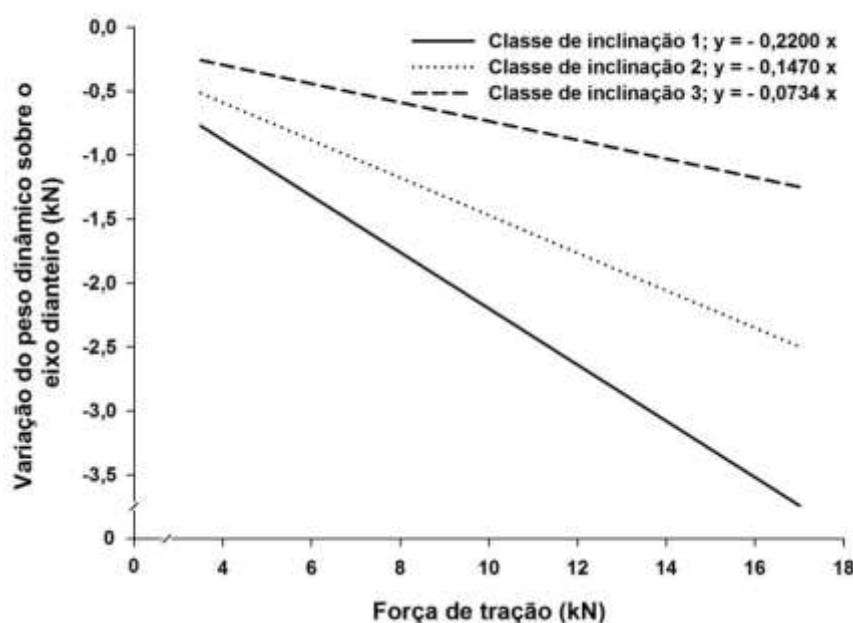


Figura 11. Variação do peso dinâmico sobre o eixo dianteiro em função da força de tração para as respectivas classes de inclinação.

De modo geral, as três classes de inclinação utilizadas no experimento proporcionam uma redução do peso dianteiro estático, decorrente da transferência de peso do eixo dianteiro para o traseiro.

Analisando as Figuras 11 e 12 podemos observar que a classe de inclinação 1 (-2 a -4°) proporcionou a maior transferência de peso entre eixos, seguida pela classe 2 (5 a 7°) e pela classe 3 (15 a 17°).

3.3.4. Peso dinâmico total

O peso dinâmico total do trator corresponde à soma do peso dianteiro e traseiro em condição dinâmica. Na Figura 12 estão apresentados os resultados dos cálculos do peso dinâmico total do trator em função das classes de inclinação e das forças utilizadas no experimento.

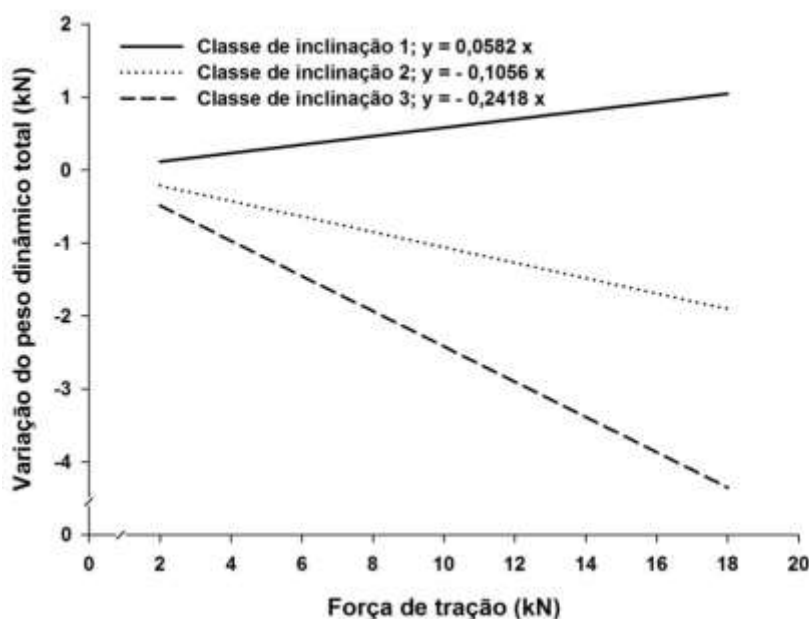


Figura 12. Variação do peso dinâmico total do trator em função da força de tração para as respectivas classes de inclinação.

As classes de inclinação 2 (5 a 7°) e 3 (15 a 17°), por apresentarem uma componente da força de tração vertical e para cima, retiram peso do sistema em condição dinâmica, prejudicando a capacidade de tração do trator. A classe de inclinação 1 (-2 a -4°) contribui para o acréscimo de peso no sistema, favorecendo dessa forma a capacidade de tração do trator.

3.4. Deslizamento dos rodados do trator

Em detrimento do reduzido valor de avanço cinemático apresentado pelo trator nas pressões estudadas, a velocidade tangencial periférica dos rodados dianteiros e traseiros é praticamente a mesma, o que resultou numa diferença não significativa entre o deslizamento observado nos pneus de eixos distintos. A análise foi então baseada na taxa média de deslizamento entre os dois eixos.

Tabela 11. Equações de regressão ajustadas para o deslizamento dos rodados do trator (s, em %) em função da pressão interna dos pneus e da força de tração e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações

Inclinação	Equação ajustada	R^2
1 (-2 a -4°)	$\hat{s} = 0,0287^{**} P - 0,8127^{**} F + 0,0868^{**} F^2$	0,9589
2 (5 a 7°)	$\hat{s} = 0,0292^{**} P - 0,7424^{**} F + 0,0758^{**} F^2$	0,9595
3 (15 a 17°)	$\hat{s} = 0,0185^{**} P - 0,4253^{**} F + 0,0569^{**} F^2$	0,9485

** - Significativo ao nível de 1% pelo teste t. s – Deslizamento dos rodados, P – Pressão interna dos pneus e F – Força de tração.

A variável pressão interna dos pneus apresentou efeito linear no percentual de deslizamento dos rodados do trator (Tabela 11). Para uma mesma força de tração, o incremento de uma unidade na pressão interna dos pneus resulta no acréscimo de 0,0287; 0,0292 e 0,0185% no deslizamento dos rodados do trator para as classes de inclinação 1, 2 e 3, respectivamente.

A variável força de tração apresentou efeito quadrático no percentual de deslizamento dos rodados do trator (Tabela 11), com ponto de mínimo em 4,68; 4,89 e 3,73 kN para as classes de inclinação 1, 2 e 3, respectivamente.

Na Tabela 12 estão apresentados os valores médios de deslizamento dos rodados do trator para as combinações entre os fatores estudados.

Tabela 12. Valores médios de deslizamento dos rodados do trator, em %, para as combinações entre pressão interna dos pneus, força e inclinação da linha de tração

F (kN)	P1 - 82,74 kPa			P2 - 96,53 kPa			P3 - 110,32 kPa		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
3,57	0,59a	1,06a	1,13a	0,99a	0,72a	0,68a	0,97a	0,96a	0,74a
6,86	2,30a	1,87a	0,92a	1,45a	1,43a	1,44a	1,73a	1,82a	1,64a
12,46	4,67a	4,48a	4,88a	5,80a	5,99a	6,01a	6,00a	4,40b	6,44a
16,23	12,30a	8,71b	8,59b	13,17a	11,52b	8,75c	12,75a	12,41a	11,69a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na linha e para cada pressão, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. P – Pressão interna dos pneus (kPa), F – Força de tração (kN) e I – Inclinação da linha de tração.

Para as pressões internas dos pneus de 82,74 (P1) e 96,53 kPa (P2), observou-se diferença estatística entre as classes de inclinação apenas para a força de tração de 16,23 kN. Nas referidas pressões combinadas com a força de tração de

16,23 kN, a classe de inclinação 1 (I1) apresentou os maiores percentuais de deslizamento dos rodados do trator. Para a pressão de 82,74 kPa (P1) não houve diferença estatística entre as classes de inclinação 2 (I2) e 3 (I3), não sendo observado o mesmo comportamento para a pressão de 96,53 kPa (P2), onde a classe de inclinação 3 (I3) forneceu o menor percentual de deslizamento dos rodados do trator.

Na pressão de 110,32 kPa (P3) houve diferença estatística apenas na força de tração de 12,46 kN, não sendo observada a mesma tendência citada nas pressões anteriores. A pressão de 110,32 kPa apresentou, de modo geral, os maiores percentuais de deslizamento devido a reduzida área de contato do pneu com o solo, então a influência significativa apresentada pela classe de inclinação dentro desse desdobramento pode ter cunho estocástico.

Para a força de tração de 16,23 kN é possível observar que as taxas de deslizamento reduzem ao longo das classes de inclinação. Esse comportamento pode ser explicado pela transferência de peso do eixo dianteiro para o traseiro, resultando assim, em um menor peso dinâmico sobre o eixo dianteiro, o que contribui para o aumento do deslizamento dos rodados do trator devido à redução da capacidade de tração de cada pneu dianteiro.

Na Figura 13 está apresentada a equação ajustada e sua respectiva superfície de resposta para descrever o deslizamento dos rodados do trator, em função da pressão interna dos pneus e da força de tração exercida, englobando todas as classes de inclinação. Nota-se que a força de tração exerceu maior influência no deslizamento que a pressão interna dos pneus. A pressão interna dos pneus promoveu alterações mais bruscas na medida em que a força de tração atingiu níveis mais elevados.

$$\hat{s} = 0,0861^{**} P - 1,2864^{**} F - 0,0006^{**} P^2 + 0,0713^{**} F^2 + 0,0069^{**} P F \quad (R^2=0,9519)$$

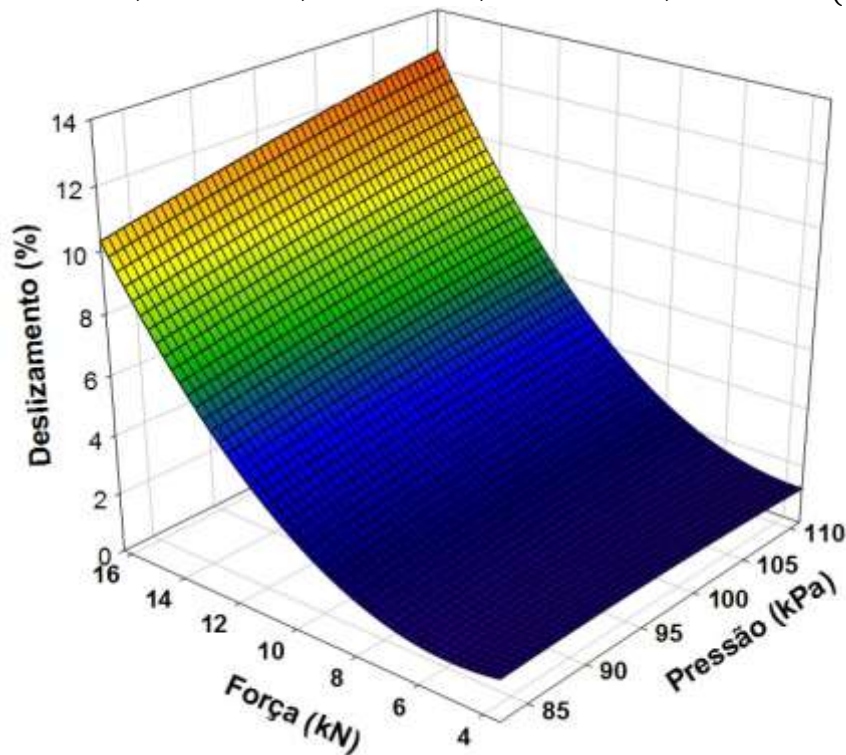


Figura 13. Equação ajustada e superfície de resposta para descrever o deslizamento do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração. ** - Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

Analisando a superfície de resposta é possível identificar que a redução da pressão interna dos pneus de 110,32 para 82,74 kPa culminou na redução do deslizamento dos rodados do trator, principalmente quando a força de tração desenvolvida foi superior a 10 kN. A área de contato com o solo aumenta com a redução da pressão interna do pneu, e dessa forma há um incremento da capacidade de tração, com uma concomitante redução do potencial de compactação do pneu. Os resultados encontrados condizem com os obtidos por Šmerda & Čupera (2010), ao analisarem a influência da pressão de pneus de construção radial no desempenho em tração de um trator agrícola.

Numa simulação computacional, os autores Sahay & Tewary (2004) concluíram que quanto maior o componente vertical e para cima da força aplicada na barra de tração de um trator 4 x 2 simples, menor é a sua capacidade de tração. No presente experimento, observamos que o efeito dessa mesma componente foi contrário ao observado por tais autores por se tratar de um trator 4 x 2 com tração dianteira auxiliar, que se encontrava ligada durante a realização do experimento.

Num trator 4 x 2 sem tração dianteira auxiliar, é desejável que a transferência de peso do eixo dianteiro para o traseiro seja máxima (sem comprometer a dirigibilidade), visto que apenas o eixo traseiro desempenha tração e que quanto

maior o peso sobre o rodado maior será sua capacidade de desenvolver esforço tratório. No caso de um trator 4 x 2 com tração dianteira auxiliar, operando com ela acionada, é necessário equilibrar a transferência de peso para que a tração gerada pelos pneus do eixo dianteiro seja otimizada durante a operação.

3.5. Potência na barra de tração

Foi observado que dentro de cada classe de inclinação as variáveis independentes, pressão interna dos pneus e força de tração, apresentaram efeito linear na potência exigida na barra de tração (Tabela 13).

Tabela 13. Equações de regressão ajustadas para potência na barra de tração (P_{bt} , em kW) do trator em função da pressão interna dos pneus (P) e da força de tração (F) e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações

Inclinação	Equação ajustada	R^2
1 (-2 a -4°)	$\widehat{P}_{bt} = 0,0123^{**} P + 1,1945^{**} F$	0,9980
2 (5 a 7°)	$\widehat{P}_{bt} = 0,0100^{**} P + 1,2323^{**} F$	0,9986
3 (15 a 17°)	$\widehat{P}_{bt} = 0,0088^{**} P + 1,2488^{**} F$	0,9993

** - Significativo ao nível de 1% pelo teste t. P_{bt} – Potência na barra de tração (kW), P – Pressão interna dos pneus (kPa) e F – Força de tração (kN).

Verificou-se que a pressão interna dos pneus teve pouca influência na potência exigida na barra de tração, pois os coeficientes associados a essa variável foram inferiores aos associados a variável força de tração. Apesar de reduzido, o efeito da pressão interna dos pneus na potência na barra de tração foi positivo, o que pode ser explicado pelo fato que o aumento da pressão interna dos pneus resulta no aumento do raio de rolamento dos pneus e que por sua vez eleva a velocidade operacional do trator.

Para uma mesma força de tração, o incremento de uma unidade na pressão interna dos pneus resulta no acréscimo de 0,0123; 0,0100 e 0,0088 kW de potência na barra de tração para as classes de inclinação 1, 2 e 3, respectivamente. De maneira análoga, para uma mesma pressão interna dos pneus, verifica-se que o incremento de uma unidade na força de tração resulta no acréscimo de 1,1945; 1,2323 e 1,2488 kW de potência na barra de tração para as classes de inclinação 1, 2 e 3, respectivamente.

Na Tabela 14 estão apresentados os valores médios de potência na barra de tração do trator para as combinações entre os fatores estudados.

Tabela 14. Valores médios de potência na barra de tração do trator, em kW, para as combinações entre pressão, força de tração e inclinação

F (kN)	P1 – 82,74 kPa			P2 – 96,53 kPa			P3 – 110,32 kPa		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
3,57	5,03a	5,07a	5,10a	5,12a	5,10a	5,08a	5,14a	5,17a	5,18a
6,86	9,46a	9,54a	9,72a	9,69a	9,72a	9,62a	9,72a	9,68a	9,65a
12,46	16,88a	16,80a	16,81a	16,75a	16,72a	16,62a	16,72b	17,19a	16,67b
16,23	19,75b	20,98a	20,98a	20,01c	20,46b	20,89a	20,01b	20,27ab	20,61a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na linha e para cada pressão, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. P – Pressão interna dos pneus (kPa), F – Força de tração (kN) e I – Inclinação da linha de tração.

Para as pressões internas dos pneus de 82,74 (P1) e 96,53 kPa (P2), observou-se diferença estatística entre as classes de inclinação apenas para a força de tração de 16,23 kN. Nas referidas pressões combinadas com a força de tração de 16,23 kN, a classe de inclinação 1 (I1) apresentou os menores valores para a potência na barra de tração. Para a pressão interna de 82,74 kPa (P1) não houve diferença estatística entre as classes de inclinação 2 (I2) e 3 (I3), não sendo observado o mesmo comportamento para a pressão interna de 96,53 kPa (P2), onde a classe de inclinação 3 (I3) forneceu o maior valor para a potência na barra de tração do trator.

A potência na barra de tração é inversamente proporcional ao percentual de deslizamento apresentado pelos rodados do trator, pois quanto maior o deslizamento menor é a velocidade operacional, o que condiciona a redução do resultado do produto força de tração e velocidade. Pela comparação das Tabelas 12 e 14 é possível observar a associação entre estas duas variáveis.

Na Figura 14 está apresentada a equação ajustada e sua respectiva superfície de resposta para descrever a potência demandada na barra de tração, em função da pressão interna dos pneus e da força de tração exercida, englobando todas as classes de inclinação. Nota-se a baixa influência da pressão interna dos pneus na potência exigida durante a condução do experimento.

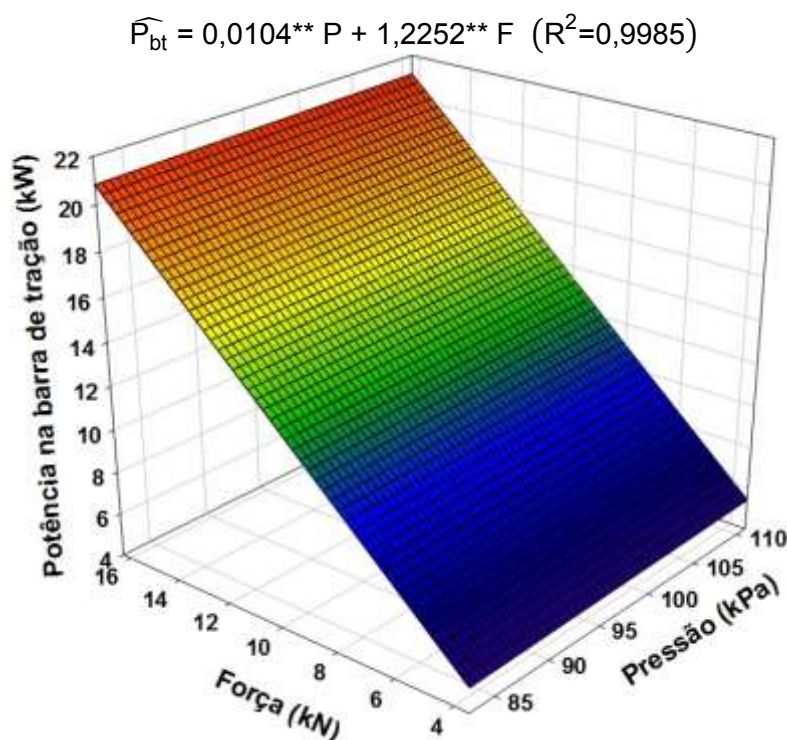


Figura 14. Equação ajustada e superfície de resposta para descrever a potência na barra de tração em função da pressão interna dos pneus e da força de tração. ** - Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

Os resultados encontrados para a potência na barra de tração condizem com os encontrados por Palma et al. (2010) ao analisarem o comportamento em tração de um trator agrícola semelhante ao utilizado neste experimento, na condição em que os percentuais de deslizamento permaneceram na faixa de 10 a 15% durante operação de semeadura direta.

3.6. Consumo horário e específico de combustível

3.6.1. Consumo horário de combustível

Foi observado que dentro de cada classe de inclinação as variáveis independentes, pressão interna dos pneus e força de tração, apresentaram efeito linear na potência exigida na barra de tração (Tabela 15).

Tabela 15. Equações de regressão ajustadas para o consumo horário (C_h , em $L\ h^{-1}$) do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações

Inclinação	Equação ajustada	R^2
1 (-2 a -4°)	$\widehat{C}_h = 5,1893 - 0,0003^{**} P + 0,3681^{**} F$	0,9424
2 (5 a 7°)	$\widehat{C}_h = 5,2884 - 0,0004^{**} P + 0,3377^{**} F$	0,9671
3 (15 a 17°)	$\widehat{C}_h = 5,3916 + 0,0027^{**} P + 0,2983^{**} F$	0,9113

** - Significativo ao nível de 1% pelo teste t. C_h – Consumo horário ($L\ h^{-1}$), P – Pressão interna dos pneus (kPa) e F – Força de tração (kN).

A força de tração apresentou efeito positivo, sendo que o acréscimo de uma unidade na força de tração resulta no acréscimo de 0,3681; 0,3377 e 0,2983 L h⁻¹ no consumo do trator para as classes de inclinação 1, 2 e 3, respectivamente e para uma mesma pressão interna dos pneus.

A pressão interna dos pneus apresentou efeito linear negativo, exceto para a classe de inclinação 3, sendo em todos os casos um coeficiente inferior ao observado para a força de tração, refletindo dessa forma a baixa influência da pressão interna dos pneus no consumo horário do trator.

Na Tabela 16 estão apresentados os valores médios de consumo horário do trator para as combinações entre os fatores estudados.

Tabela 16. Valores médios de consumo horário de combustível do trator, em L h⁻¹, para as combinações entre pressão, força de tração e inclinação

F (kN)	P1 – 82,74 kPa			P2 – 96,53 kPa			P3 – 110,32 kPa		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	3
3,57	6,52a	6,52a	6,64a	6,48a	4,42a	6,46a	6,55a	6,54a	6,72a
6,86	7,81a	7,54ab	7,49b	7,65a	7,66a	7,67a	7,62a	7,60a	8,02a
12,46	9,58a	9,62a	9,76a	9,63a	9,68a	9,77a	9,60a	8,99b	9,55a
16,23	11,12a	10,51b	10,32b	11,36a	10,99a	10,25b	11,23a	10,81a	10,23b

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na linha e para cada pressão, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. P – Pressão interna dos pneus (kPa), F – Força de tração (kN) e I – Inclinação da linha de tração.

Em todas as pressões internas utilizadas nos pneus observou-se diferença estatística entre as classes de inclinação para a força de tração de 16,23 kN, com os seguintes comportamentos: Para a pressão interna de 82,74 kPa (P1) a classe de inclinação 1 (I1) apresentou os maiores valores de consumo horário, não sendo observado diferença entre as demais classes (I2 e I3). Para as pressões internas dos pneus de 96,53 e 110,32 kPa, as classes de inclinação 1 (I1) e 2 (I2) apresentaram os maiores valores de consumo horário, não sendo observado diferença estatística entre elas.

Para as pressões internas dos pneus de 82,74 (P1) e 110,32 kPa (P3) observou-se diferença estatística para as forças de tração de 6,86 e 12,46 kN, respectivamente, sendo o resultado explicado pelos índices de deslizamento dos rodados.

Pela análise das Tabelas 11 e 15 é possível identificar que o consumo horário está relacionado com o percentual de deslizamento dos rodados do trator. O aumento do percentual de deslizamento dos rodados conduz a um maior consumo de combustível, pois o aproveitamento energético na barra de tração se torna menos eficiente.

Na Figura 15 está apresentada a equação ajustada e sua respectiva superfície de resposta para descrever o consumo horário de combustível do trator em função da força de tração e da pressão interna dos pneus, englobando todas as classes de inclinação. Analisando a superfície de resposta é possível identificar que a pressão dos pneus exerceu uma influência mínima no consumo horário.

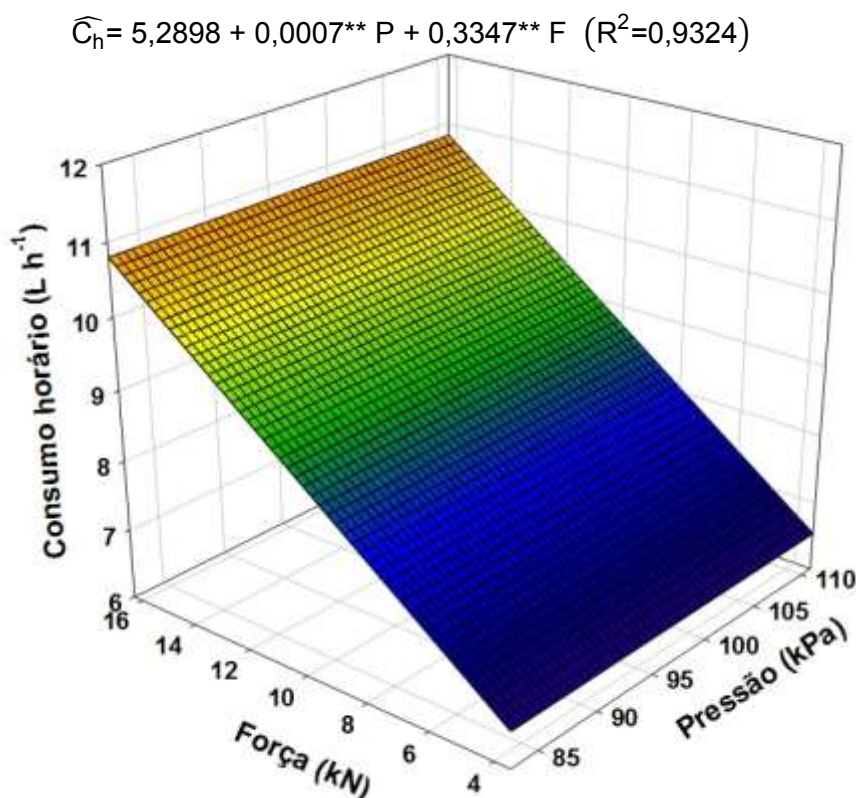


Figura 15. Equação ajustada e superfície de resposta para descrever o consumo horário do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração. ** - Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

O consumo horário é extremamente dependente da força de tração desenvolvida pelo trator, pois quanto maior a exigência de torque maior é o fluxo de combustível direcionado para o motor. Os resultados encontrados no presente trabalho se assemelham aos encontrados por Spagnolo et al. (2012), estudando um trator semelhante ao utilizado no presente experimento. O mesmo autor encontrou que as pressões dos pneus não foram responsáveis por gerar grandes mudanças no consumo horário apresentado pelo trator.

3.6.2. Consumo específico de combustível

A variável pressão interna dos pneus apresentou efeito linear no consumo específico de combustível (Tabela 17).

Tabela 17. Equações de regressão ajustadas para o consumo específico (C_e , em $\text{Kg kW}^{-1} \text{h}^{-1}$) do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações

Inclinação	Equação ajustada	R^2
1 (-2 a -4°)	$\widehat{C_e} = 0,0139^{**} P - 0,0796^{**} F + 0,0016^{**} F^2$	0,9424
2 (5 a 7°)	$\widehat{C_e} = 0,0139^{**} P - 0,0737^{**} F + 0,0013^{**} F^2$	0,9488
3 (15 a 17°)	$\widehat{C_e} = 0,0139^{**} P - 0,0843^{**} F + 0,0020^{**} F^2$	0,9365

** - Significativo ao nível de 1% pelo teste t. C_e – Consumo específico ($\text{Kg kW}^{-1} \text{h}^{-1}$), P – Pressão interna dos pneus (kPa) e F – Força de tração (kN).

Para uma mesma força de tração, o incremento de uma unidade na pressão interna dos pneus resulta no acréscimo de $0,0139 \text{ Kg kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ no consumo específico do trator, independente da classe de inclinação da linha de tração.

A força de tração apresentou efeito quadrático no consumo específico de combustível, com ponto de mínimo em 24,87; 28,34 e 21,08 kN para as classes de inclinação 1, 2 e 3, respectivamente. Pelo fato dos pontos de mínimo obtidos estarem fora do intervalo estudado pode-se assumir que o menor consumo específico de combustível ocorreu na força de 16,23 kN.

Na Tabela 18 estão apresentados os valores médios de consumo específico de combustível do trator para as combinações entre os fatores estudados.

Tabela 18. Valores médios de consumo específico de combustível do trator, em $\text{Kg kW}^{-1} \text{h}^{-1}$, para as combinações entre pressão, força de tração e inclinação

F (kN)	P1			P2			P3		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
3,57	1,08a	1,07a	1,08a	1,05a	1,05a	1,06a	1,06a	1,05a	1,08a
6,86	0,69a	0,64b	0,64b	0,66a	0,66a	0,66a	0,65a	0,65a	0,66a
12,46	0,47a	0,48a	0,48a	0,48a	0,48a	0,49a	0,48a	0,44b	0,48a
16,23	0,47a	0,42b	0,41b	0,47a	0,45a	0,41b	0,46a	0,45a	0,41b

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na linha e para cada pressão, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. P – Pressão interna dos pneus (kPa), F – Força de tração (kN) e I – Inclinação da linha de tração.

Em todas as pressões internas utilizadas nos pneus observou-se diferença estatística entre as classes de inclinação para a força de tração de 16,23 kN, com os seguintes comportamentos: Para a pressão interna de 82,74 kPa (P1) a classe de inclinação 1 (I1) apresentou os maiores valores de consumo horário, não sendo observado diferença entre as demais classes (I2 e I3). Para as pressões internas dos pneus de 96,53 e 110,32 kPa, as classes de inclinação 1 (I1) e 2 (I2) apresentaram os maiores valores de consumo específico, não sendo observado diferença estatística entre elas.

Também foi observado efeito significativo da inclinação da linha de tração para a força de 6,86 kN combinada com a pressão interna dos pneus de 82,74 kPa

(P1) e para a força de 12,46 kN combinada com a pressão de 110,32 kPa, apresentando a classe de inclinação 1 os maiores consumos específicos de combustível.

O consumo específico de combustível é dependente dos valores de potência na barra de tração (P_{bt}) e do consumo horário (C_h), que estão apresentados nas Tabelas 13 e 15, respectivamente. Quanto menor o deslizamento, maior é a eficiência energética na barra de tração, ou seja, menos combustível é consumido para a realização de esforço de tração.

Na Figura 16 está apresentada a equação ajustada e sua respectiva superfície de resposta para descrever o consumo específico de combustível do trator em função da força de tração e da pressão interna dos pneus, englobando todas as classes de inclinação.

$$C_e = 0,0124^{**} P - 0,0113^{**} F - 6,4501 \cdot 10^{-5} P^2 + 8,3439^{**} F^{-2} \quad (R^2=0,9979)$$

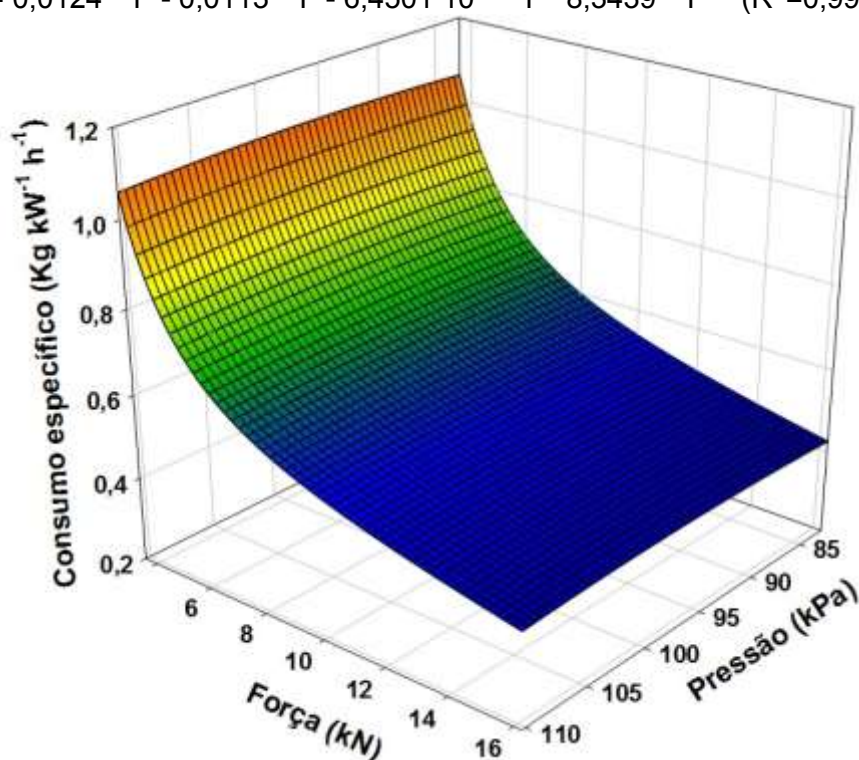


Figura 16. Equação ajustada e superfície de resposta para descrever o consumo específico de combustível do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração. ** - Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

Apesar do efeito significativo apresentado pelo fator pressão na análise de variância, verifica-se a partir da superfície de resposta que a influência de tal fator no consumo específico foi extremamente reduzida. A faixa de pressão utilizada no experimento não proporcionou alteração suficientemente elevada na capacidade de tração, de modo a fornecer alteração mais brusca nessa variável resposta, sendo

que esse efeito já foi encontrado por Frantz (2011) ao estudar o comportamento de pneus diagonais trabalhando numa amplitude de pressão próxima à estudada nesse trabalho.

O efeito da força de tração foi bem pronunciado, sendo que o consumo específico reduziu cerca de $0,6 \text{ Kg kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ quando a força de tração se elevou de 3,57 para 16,23 kN. Como a rotação do motor foi mantida constante durante a realização do experimento, o torque exigido do motor foi aumentando gradualmente com o aumento da força de tração, dessa forma, houve um decréscimo do consumo específico de combustível, tornando então a conversão da energia do combustível em potência disponível na barra de tração mais eficiente.

3.7. Eficiência na barra de tração e Razão de tração do trator

Os resultados da eficiência na barra de tração (E_{bt}) e a razão de tração do trator (RTT) serão apresentados graficamente (Figura 17) e em conjunto com o deslizamento do trator (s_{trator}), por serem parâmetros de desempenho correlatos.

Nota-se que o deslizamento do trator aumenta com o aumento da razão de tração, ou seja, quanto mais o trator “converte” seu peso dinâmico em força na barra de tração maior é o índice de deslizamento. Apesar de não ter sido observado no presente trabalho, existe um limiar de RTT onde o deslizamento do trator atinge o máximo (1,0 ou 100 %). Nesse mesmo limiar, a eficiência na barra de tração passa a ser nula, ou seja, a potência desenvolvida na barra de tração é igual à zero. A partir da Figura 17 também é possível identificar que a pressão interna dos pneus exerceu influência reduzida nesses parâmetros.

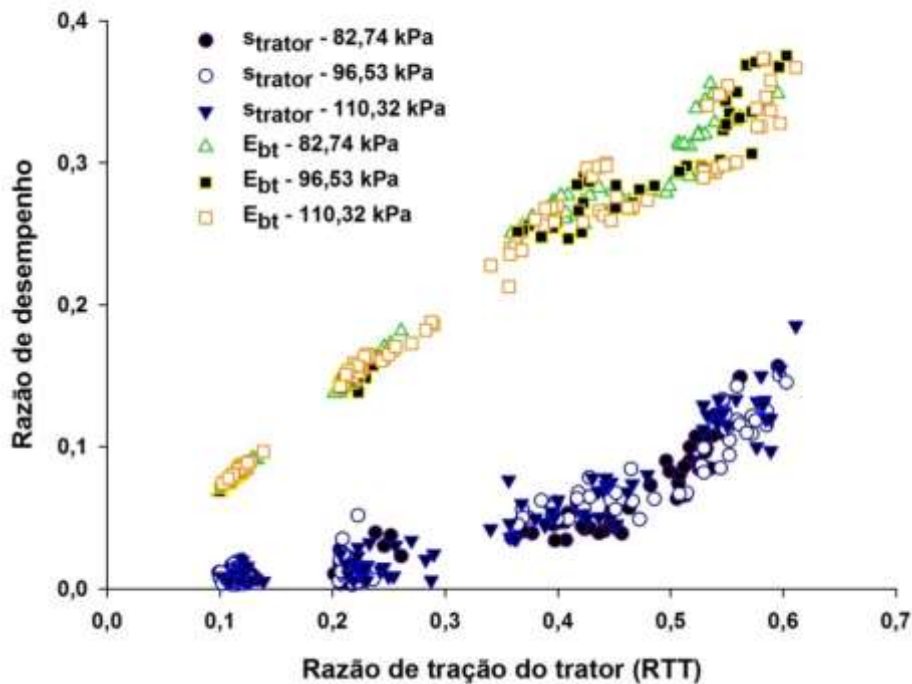


Figura 17. Eficiência na barra de tração e deslizamento do trator em função da razão de tração.

A eficiência na barra de tração e a razão de tração do trator são parâmetros que permitem uma boa caracterização do desempenho de um trator em campo. Os resultados obtidos aqui são referentes a uma superfície firme (solo compactado) e são válidos apenas para a combinação de pneus que equipava o trator durante o experimento. Esses dois parâmetros podem ser utilizados para comparar o desempenho do trator sobre diferentes condições superficiais e de configuração (quantidade de lastro, tipo de pneu, rodados duplos, etc...).

As curvas aqui obtidas, apesar da diferença entre os tratores utilizados, seguem o mesmo comportamento das obtidas por Zoz et al. (2002), porém apresentam inclinação mais abrupta devido ao menor peso do trator utilizado no presente trabalho.

4. Conclusões

- É possível obter estimativa do comportamento operacional do trator, com base nas estimativas de transferência de peso, baseadas na força e na inclinação da linha de tração.
- A redução da pressão interna dos pneus proporcionou redução nos percentuais de deslizamento dos rodados, principalmente quando a força de tração foi superior a 10 kN.
- A classe de inclinação 3 (15 a 17°) forneceu os menores percentuais de deslizamento dos rodados do trator.
- As variáveis respostas consumo horário de combustível, consumo específico de combustível e potência na barra de tração foram mais sensíveis à força aplicada na barra de tração em comparação com a pressão interna dos pneus.
- A inclinação da linha de tração exerceu influência em alguns poucos parâmetros operacionais, não evidenciando muito bem seus efeitos no desempenho do trator.

5. Referências bibliográficas

ARVIDSSON, J.; WESTLIN, H.; KELLER, T.; GILBERTSSON, M. Rubber track systems for conventional tractors – Effects on soil compaction and traction. **Soil and Tillage Research**, v. 117, n. 0, p. 103-109, 2011. ISSN 0167-1987.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS: **General Terminology for Traction of Agricultural Traction and Transport Devices and Vehicles: ASAE S296.5**. ASABE Standard. St. Joseph, Michigan. 2003.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS: **Agricultural Machinery Management Data: ASAE D497.7**. ASABE Standard. St. Joseph, Michigan. 2011.

BARBOSA, J. A.; VIEIRA, L. B.; DIAS, G. P.; DIAS JÚNIOR, M. D. S. Desempenho operacional de um trator agrícola equipado alternadamente com pneus radiais e diagonais. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 474-480, 2005. ISSN 0100-6916.

EMBRAPA. **Manual e métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Atual, 1997. 212p

FRANTZ, U. G. **Análise de desempenho em tração de rodado simples e duplo em um trator agrícola**. 2011. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2011.

GARCIANO, L. O.; UPADHYAYA, S. K.; JONES, R. A. Measurement of soil parameters useful in predicting tractive ability of off-road vehicles using an instrumented portable device. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 5, p. 295-305, 2010. ISSN 0022-4898.

GOERING, C.E., STONE, M.L.; SMITH, D.W.; TURNQUIST, P.K. **Off-Road Vehicle Engineering Principles**. ASAE, St. Joseph, Mich., 2003.

KOLATOR, B.; BIAŁOBRZEWSKI, I. A simulation model of 2WD tractor performance. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 76, n. 2, p. 231-239, 2011. ISSN 0168-1699.

LINARES, P.; MÉNDEZ, V.; CATALÁN, H. Design parameters for continuously variable power-split transmissions using planetaries with 3 active shafts. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 5, p. 323-335, 2010. ISSN 0022-4898.

LYASKO, M. Multi-pass effect on off-road vehicle tractive performance. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 5, p. 275-294, 2010. ISSN 0022-4898.

PALMA, M. A. Z.; VOLPATO, C. E. S.; BARBOSA, J. A.; SPAGNOLO, R. T.; BARROS, M. M. D.; VILAS BOAS, L. D. A. Efeito da profundidade de trabalho das hastes sulcadoras de uma semeadora-adubadora na patinagem, na força de tração e no consumo de combustível de um trator agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 1320-1326, 2010. ISSN 1413-7054.

PRANAV, P. K.; PANDEY, K. P. Computer simulation of ballast management for agricultural tractors. **Journal of Terramechanics**, v. 45, n. 6, p. 185-192, 2008. ISSN 0022-4898.

PRASANNA KUMAR, G. V. Development of a computer program for the path generation of tractor hitch points. **Biosystems Engineering**, v. 113, n. 3, p. 272-283, 2012. ISSN 1537-5110.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. 2012. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

SAHAY, C. S.; TEWARI, V. K. Computer Simulation of Tractor Single-point Drawbar Performance. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 4, p. 419-428, 2004. ISSN 1537-5110.

SHELL, L. R., F. ZOZ, and R. J. TURNER. 1997. Field performance of rubber belt and MFWD tractors in Texas soils. In *Belt and Tire Traction in Agricultural Vehicles*, 65–73. SAE SP–1291. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers.

ŠMERDA, T.; ČUPERA, J. Tire inflation and its influence on drawbar characteristics and performance – Energetic indicators of a tractor set. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 6, p. 395-400, 2010. ISSN 0022-4898.

SPAGNOLO, R. T.; VOLPATO, C. E. S.; BARBOSA, J. A.; PALMA, M. A. Z.; BARROS, M. M. D. Fuel consumption of a tractor in function of wear, of ballasting and tire inflation pressure. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 131-139, 2012. ISSN 0100-6916.

TURNER, R., L.R. SHELL and F.M. ZOZ.1997. Field Performance of Rubber Belt and MFWD Tractors in Southern Alberta Soils, SAE Paper 972730. SAE. ZOZ, F.; GRISSO, R.D. *Traction and tractor performance*. St Joseph: ASAE. 2003. 46 p.

ZOZ, F. M.; TURNER, R. J.; SHELL, L. R. Power delivery efficiency: A valid measure of belt and tire tractor performance. **Transactions of the ASABE**, v. 45, n. 3, p. 509-518, 2002.

ZOZ, F.M., GRISSO, R.D. **Traction and Tractor Performance**: ASAE Distinguished Lecture # 27, Agricultural Equipment Technology Conference, 9-11 February 2003, Louisville, Kentucky USA. ASAE Publication Number 913C0403.

Artigo II

Influência da pressão interna dos pneus, da magnitude e do ângulo de aplicação da força de tração nos níveis de vibração na base do posto de operação de um trator agrícola 4 x 2 TDA

Influência da pressão interna dos pneus, da magnitude e do ângulo de aplicação da força de tração nos níveis de vibração na base do posto de operação de um trator agrícola 4 x 2 TDA

Resumo: A exposição a vibrações mecânicas pode trazer uma série de malefícios à saúde dos operadores de máquinas agrícolas. Os modelos mais simples de tratores agrícolas são desprovidos de sistemas de amortecedores associados ao eixo, sendo o amortecimento proveniente dos pneus e do assento do operador. Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito da pressão interna dos pneus, da inclinação da linha de tração e a força de tração desenvolvida nas vibrações longitudinais e verticais na base do posto de operação de um trator agrícola. Foram utilizadas três pressões internas nos pneus (82,74; 96,53 e 110,32 kPa), três inclinações da linha de tração e quatro forças de tração (3,57; 6,86; 12,46 e 16,23 kN), no delineamento inteiramente casualizado com oito repetições. No experimento foi utilizado um trator agrícola 4x2 com tração dianteira auxiliar, equipado com pneus de construção diagonal. O trator recebeu uma série de transdutores conectados a um sistema de aquisição de dados para mensurar os parâmetros de interesse. Os fatores pressão interna dos pneus e força de tração apresentaram efeito linear positivo nas vibrações no sentido longitudinal na base do posto de operação dentro das três classes de inclinação. O fator classe de inclinação não exerceu influência nas vibrações longitudinais na base do posto de operação. Os fatores pressão interna dos pneus e força de tração apresentaram efeito quadrático nas vibrações no sentido vertical na base do posto de operação dentro das três classes de inclinação. O fator classe de inclinação exerceu influência nos níveis de vibração vertical apenas para as pressões internas de 96,53 e 110,32 kPa, prevalecendo as maiores vibrações na classe de inclinação 1. Os maiores valores de vibração no sentido longitudinal e vertical ocorreram na combinação da maior força de tração com a maior pressão interna dos pneus.

Palavras-chave: aceleração RMS, transformada de Fourier, pneus diagonais, vibração vertical, vibração horizontal.

Influence of the internal pressure of the tires, magnitude and angle of application of the traction force vibration levels in the base station operating a MFWD farm tractor

Abstract: The mechanical vibrations exposure can bring a serie of damage health of agricultural machines operators. The most simple models of farm tractors have no dampers associated to axle, being the damping provided by the tires and operator's seat. The objective of this work was to evaluate the effect of the internal pressure of the tires, line traction inclination and traction force developed in the longitudinal and vertical vibrations in the seat operator's base. Were used three internal pressures of the tires (82,74; 96,53 e 110,32 kPa), three inclinations of the traction line and and four traction forces (3,57; 6,86; 12,46 e 16,23 kN), in completely randomized design, with eight replications. In experiment was used a MFWD farm tractor equipped with diagonal construction tires. The tractor received a serie of transducers connected to a acquisitions system to measure the interest parameters. The internal pressure of the tires and traction force had positive linear effect in the longitudinal vibrations on seat operator's base in each inclination class of traction line. The inclination class of traction line had no effect on the longitudinal vibrations. The internal pressure of the tires and traction force had quadratic effect in the vertical vibrations on seat operator's base in each inclination class of traction line. The internal pressure of the tires and traction force had quadratic effect in the vertical vibrations only for the pressures of 96,53 and 110,32 kPa, being the higher vibrations occurred in the inclination class 1. The higher values of vertical and longitudinal vibrations occurred in the combination of the higher pressure and higher force.

Key words: RMS acceleration, Fourier transform, diagonal tires, vertical vibration, longitudinal vibration.

1. Introdução

O trator é a principal fonte de potência no meio agrícola, caracterizando-se por ser uma máquina multifuncional empregada nas diversas etapas da produção agropecuária. De acordo com a ANFAVEA (2012), foram vendidos 52.296 tratores agrícolas de pneus no mercado brasileiro no ano de 2011, o que corresponde a um incremento de cerca de 85% nos dez últimos anos.

Ao longo dos anos, o projeto e a concepção de novos modelos de tratores agrícolas tem voltado sua atenção para o conforto, segurança e a ergonomia das máquinas produzidas. Essa melhoria não é de difícil constatação, podendo ser facilmente detectada através da mídia especializada. Dentre alguns aspectos, pode-se citar o aumento do número de tratores com cabine climatizada, o posicionamento lateral das alavancas de câmbio, acionamento remoto de implementos, comandos eletro-hidráulicos, entre outros.

A maior parte dos tratores produzidos e comercializados no Brasil é desprovida de suspensão em qualquer um dos eixos, sendo a absorção dos impactos realizada basicamente pelos pneus e amortecedores conjugados ao assento do operador e, se presente, na cabine de operação.

A transmissão de vibrações mecânicas aos operadores de máquinas em geral tem sido alvo de muitos estudos devido aos malefícios causados pela exposição prolongada a tais vibrações (Rakheja et al., 2010; Milosavljevic et al., 2012; Cutini et al., 2012). Segundo Servadio et al. (2007), as vibrações de baixa frequência em tratores agrícolas geram desconforto aos operadores e podem ocasionar lesões na coluna vertebral.

De acordo com Soeiro (2011), o corpo humano apresenta uma frequência natural característica para cada parte (Figura 1). Quando o corpo é submetido a uma vibração exógena com a mesma frequência que determinada parte do corpo, pode ocorrer a ampliação do movimento e o incremento da energia que é dissipada nos tecidos do corpo em decorrência do fenômeno de ressonância.

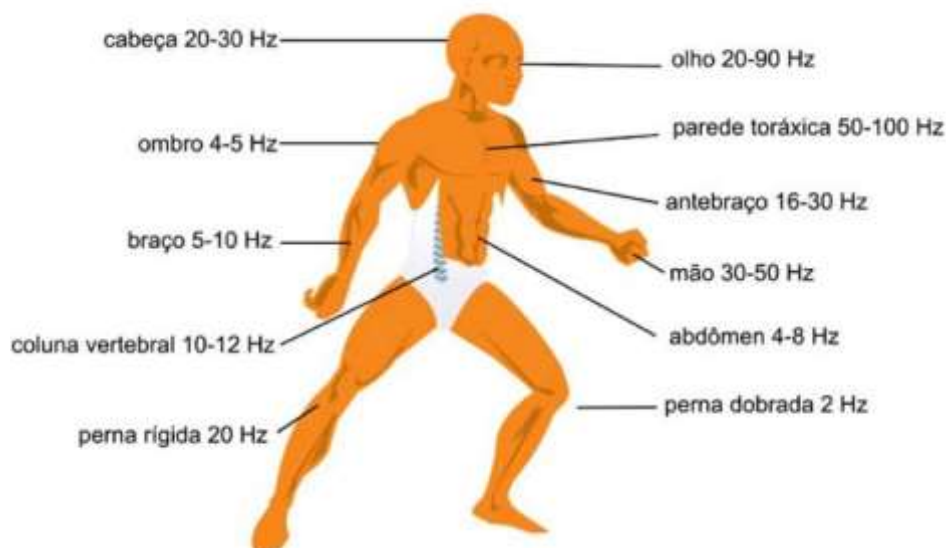


Figura 1. Frequências características para cada parte do corpo (Soeiro, 2011).

As vibrações ocupacionais são aquelas inerentes ao trabalho desempenhado por uma pessoa e podem ser divididas em dois grupos, as vibrações de braços e mãos e as vibrações de corpo inteiro. Conforme Coggins et al. (2010), as vibrações de braços e mãos são aquelas que se originam de equipamentos suportados pelas mãos dos trabalhadores, como motosserras, cortadores de grama, furadoras, dentre outras. As vibrações de corpo inteiro são aquelas originárias de uma superfície vibratória cuja qual, o corpo esteja apoiado, por exemplo, empilhadoras, tratores, caminhões, retroescavadoras, dentre outras.

A exposição excessiva a vibrações nos braços e nas mãos pode resultar num quadro clínico conhecido como “dedo branco”, que é um distúrbio que afeta as juntas, nervos, vasos sanguíneos e articulações das mãos, punhos e braços. Estudando a transmissibilidade das vibrações de motocultivadores para os braços e mãos do operador, Chaturvedi et al. (2012) concluíram que a introdução de tiras de borracha e de poliuretano mediando o contato das rabiças com o chassi do motocultivador, resultou na redução da vibração transmitida ao operador. Essa redução propiciou um aumento do tempo de exposição máxima diária das vibrações oriundas do equipamento e ao mesmo tempo reduz o potencial de aparecimento da síndrome do dedo branco.

Um estudo realizado por Bovenzi & Betta (1994) com um grupo de operadores de tratores de um distrito no norte da Itália, teve por uma de suas conclusões que o risco de surgimento de dores lombares está associado com a postura durante a operação, e também com a potência e a dose de vibração a qual o corpo inteiro do trabalhador era submetido.

No ano de 2002 o Parlamento Europeu estabeleceu a diretiva 2002/44/CE, que visa resguardar os trabalhadores contra os efeitos maléficos para a saúde em decorrência da exposição sem critérios às vibrações mecânicas no ambiente de trabalho. Essa diretiva faz uso de alguns preceitos já registrados na norma internacional ISO 2631-1 (1997), que trata da avaliação da exposição humana a choques e vibrações mecânicas no corpo como um todo.

Operações com máquinas agrícolas em geral se caracterizam por serem física e mentalmente desgastantes. No início do desenvolvimento dos tratores agrícolas pouca atenção era dada às vibrações mecânicas na interface homem-máquina. Com o estabelecimento da diretiva 2002/44/CE, os fabricantes de tratores agrícolas estão sendo conduzidos à introdução de elementos amortecedores no projeto de suas máquinas.

Um aprimoramento básico que visa reduzir a transmissibilidade de vibrações ao operador se constitui na melhoria do assento, através de uma configuração que seja mais eficiente em absorver tais impactos. Alguns tratores com cabine fechada apresentam coxins no ponto de ligação da cabine com o chassi do trator, o que também favorece a redução dos índices de vibração transmitidos ao operador. Tratores de maior porte e com um pacote tecnológico mais avançado apresentam suspensão, no eixo dianteiro ou em ambos os eixos, sem que essa implique em perda da capacidade de tração do equipamento.

A medida mais eficiente para a redução da transmissão de vibrações aos operadores de tratores agrícolas é certamente a suspensão, porém o custo de uma máquina com tal artifício é muito oneroso, não sendo condizente com a realidade de muito produtores rurais no território brasileiro.

Segundo Loutridis et al. (2011), as vibrações em tratores agrícolas não são apenas responsáveis pela redução do conforto e pelo possível dano a saúde do operador, mas também pelo desgaste e falha de determinados componentes da máquina.

As vibrações em tratores agrícolas desprovidos de suspensão são dependentes do tipo e da configuração do dispositivo de tração e suporte que o equipa. Para tratores de pneus, a pressão do ar dentro do pneu influencia na capacidade de amortecimento do pneu, que por sua vez altera a intensidade das vibrações atuando na máquina e no operador. Alguns trabalhos já foram conduzidos com a finalidade de estudar o fenômeno de vibração nos tratores agrícolas,

considerando principalmente a pressão interna e as características de conformação dos pneus (Nguyen & Inaba, 2011; Cutini et al., 2012; Villibor et al., 2012).

Objetivou-se com este trabalho verificar a influência da pressão interna dos pneus, da força de tração e do seu respectivo ângulo de aplicação na barra de tração, nas vibrações mecânicas na base do posto de operação de um trator agrícola 4 x 2 TDA.

2. Material e métodos

O experimento foi conduzido no campo experimental “Diogo Alves de Mello”, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa – UFV, localizada no município de Viçosa, Minas Gerais.

Foi utilizado um trator agrícola 4 x 2 TDA equipado com pneus diagonais, sendo analisada a influência da pressão interna dos pneus, da força de tração desenvolvida e da inclinação da linha de tração nos níveis de vibração na base do posto de operação. O experimento foi estabelecido em esquema fatorial 3 x 3 x 4 (três pressões, três classes de inclinações da linha de tração e quatro níveis de força de tração), no delineamento inteiramente casualizado, com oito repetições. Todos os tratamentos foram realizados em pista uniforme de solo compactado (“chão batido”), com trinta metros de comprimento e três metros de largura, totalizando uma área experimental de noventa metros quadrados.

2.1. Tratores

Para a realização do trabalho, foi utilizado um trator John Deere® (Figura 2), modelo 5705 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e potência de 62,56 kW (85 cv) no motor a 2400 rpm, o qual recebeu a instrumentação necessária para a condução do trabalho e cujas principais especificações estão sumarizadas na Tabela 1.

Para atuar como lastro e fonte variação do esforço de tração do trator ensaiado foi utilizado um trator da marca Valtra-Valmet®, modelo 800, 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e potência de 58,88 kW (80 cv) no motor a 2400 rpm.



Figura 2. Trator John Deere® modelo 5705 utilizado no experimento.

Tabela 1. Especificações do trator John Deere 5705

Especificações	
Potência do motor na rotação nominal	63 kW
Potência da TDP na rotação nominal do motor	53 kW
Rotação de potência máxima	2400 rpm
Faixa de Rotação com Potência Constante	2000 – 2400 rpm
Torque Máximo	330 Nm
Rotação de Torque Máximo	1600 rpm
Número de Cilindros do motor	4
Cilindrada	4500 cm ³
Aspiração	Turboalimentado

FONTE: John Deere®.

2.2. Pneus utilizados

No experimento foi utilizado o modelo Pirelli® TM 95 18.4-30 no eixo traseiro e Goodyear® Dyna Torque II 12.4-24 no eixo dianteiro. Um resumo das especificações fornecidas pelos fabricantes está disposto na Tabela 2.

Tabela 2. Especificações nominais básicas sobre os pneus utilizados no experimento

Pneu	Largura da seção	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro do aro (mm)	Carga máxima (Kg)	Nº de lonas
18.4 – 30	0,4674	1551,9	760,0	2815	10
12.4 – 24	0,3150	1163,3	609,6	1200	6

FONTE: Catálogo Goodyear® e Pirelli®.

2.2.1. Pressões internas utilizadas nos pneus

Foram utilizadas as pressões de 82,74 kPa (12 psi); 96,53 kPa (14 psi) e 110,32 kPa (16 psi); sendo que os pneus do eixo dianteiro e traseiro receberam a mesma pressão na condução do experimento.

2.3. Magnitude e ângulo de aplicação da força na barra de tração

2.3.1. Ângulo de aplicação da força na barra de tração

Os ângulos de aplicação da força na barra de tração (inclinação da linha de tração) foram obtidos através de uma estrutura (Figura 3) acoplada ao para-choque do trator lastro. Essa estrutura possui três alças de atrelamento espaçadas entre si em 420 mm. O trator ensaiado tracionou o trator lastro através de um cabo de aço, que conectava a barra de tração a uma das alças de atrelamento da estrutura.

Foram então determinadas classes de inclinação da linha de tração (Tabela 3). Cada classe engloba uma faixa de variação do ângulo de inclinação,

determinadas a partir imagens laterais do acoplamento analisadas em programa de CAD.



Figura 3. Estrutura utilizada para variação do ângulo de aplicação da força.

Tabela 3. Classes de inclinação de aplicação da força na barra de tração

Classe	Faixa
1	-2° até -4°
2	5° até 7°
3	15° até 17°

Observação: O sinal negativo indica que o ângulo está abaixo de um plano horizontal posicionado na altura da barra de tração do trator ensaiado.

2.3.2. Força de tração

A variação da força aplicada na barra de tração foi obtida a partir da seleção das marchas do trator lastro, que durante a tração permaneceu com o motor desligado e engrenado com a marcha que fornecia a força de tração utilizada em cada tratamento. Nessa condição, a resistência ao deslocamento do trator lastro é originária do sistema de transmissão e do torque de cada marcha selecionada para o tratamento.

No experimento, a força de tração foi monitorada por meio de uma célula de carga associada ao cabo de aço que fazia a ligação entre os dois tratores. Para uma mesma marcha do trator lastro, a força variava em função do ângulo com a qual era aplicada na barra de tração do trator ensaiado, sendo necessária uma padronização para facilitar a análise do experimento. As forças foram decompostas e a componente horizontal média foi estabelecida como padrão no experimento. As marchas do trator lastro e as respectivas forças de tração estão relacionadas na Tabela 4.

Tabela 4. Marchas utilizadas no trator lastro com suas respectivas forças de tração padronizadas

Força	Marcha	Tração dianteira	Força padrão (kN)	CV (%)
1	3ª Simples	Ligada	3,57	6,69
2	1ª Simples	Ligada	6,86	7,89
3	3ª Reduzida	Ligada	12,46	6,48
4	2ª Reduzida	Desligada*	16,23	7,99

(*) – A resistência gerada por essa marcha com a tração dianteira ligada estava acima da capacidade de tração do trator ensaiado. Nessa condição os pneus traseiros eram arrastados sobre o solo.

2.4. Velocidade operacional teórica

Em todos os tratamentos do experimento foi utilizada a marcha 1ª B a 2400 rpm no motor, o que proporciona uma velocidade operacional teórica próxima a 1,48 m s⁻¹ (5,33 Km h⁻¹).

2.5. Caracterização da pista utilizada no experimento

O desempenho em tração de qualquer veículo é dependente das características da superfície por ele trafegada, sendo assim, foi realizada uma caracterização física da área experimental. A metodologia e procedimento utilizado para tal caracterização segue o proposto pela Embrapa (1997).

2.5.1. Teor de água no solo

Foi utilizado o método gravimétrico padrão, com base na massa de terra seca em estufa à temperatura de 105 – 110° C até atingir massa constante, conforme Embrapa (1997). A amostragem foi realizada antes da execução do experimento, sendo coletadas dez amostras na pista experimental, para camada de 0 a 0,15 m de profundidade.

2.5.2. Densidade do solo

A amostragem foi realizada antes da aplicação dos tratamentos, sendo retiradas dez amostras na pista de teste, para a camada de 0 a 0,15 m de profundidade. Utilizou-se o método do anel volumétrico, conforme descrito pela Embrapa (1997).

2.5.3. Resistência do solo à penetração

Foi obtida com um penetrômetro, modelo PNT-2000 (Figura 4). A coleta dos dados foi realizada no dia da execução do experimento, em trinta pontos dentro da pista de testes. Os valores de resistência à penetração do solo foram obtidos para a camada de 0 a 0,15 m, sendo seus valores expressos em MPa.



Figura 4. Vista frontal do penetrômetro utilizado.

2.6. Instrumentação do trator

Com objetivo de tornar a coleta de dados mais simples, rápida e confiável o trator recebeu um conjunto de transdutores para a avaliação dos parâmetros de interesse. Todos os transdutores foram conectados a um sistema de aquisição de dados, que por sua vez foi conectado a um computador que armazenou os dados para posterior processamento.

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados da marca Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), modelo Spider 8[®], gerenciado pelo software HBM Catman[®] 2.2 instalado em um computador portátil embarcado no trator, em uma estrutura construída especificamente para esse propósito.

Os transdutores utilizados foram previamente calibrados, de modo a se conhecer sua resposta elétrica (tensão ou frequência) em função do parâmetro não elétrico medido, o que permite a configuração do software da melhor forma possível.

O sistema foi configurado para obter informações de todos os transdutores utilizados com uma taxa de amostragem de 50 Hz, ou seja, 50 dados para cada segundo de deslocamento do trator ao longo da parcela. No final de cada parcela o

sistema era interrompido e os dados gerados pelos transdutores eram salvos numa planilha eletrônica.

2.6.1. Velocidade operacional do trator (V_{op})

A velocidade desenvolvida pelo trator durante a operação, que corresponde à velocidade translacional dos pneus, foi obtida com o uso de uma unidade de radar de efeito Doppler, da marca Dickey John®, modelo Radar II (Figura 5). O radar utilizado é capaz de medir velocidades entre 0,53 e 96,6 Km h⁻¹, apresentando uma precisão de $\pm 3\%$ para a faixa de velocidade que engloba a utilizada na condução do experimento. Antes da realização do experimento o radar foi calibrado, resultando numa frequência de 59,95 mHz para cada 1 m s⁻¹ de velocidade operacional do trator.



Figura 5. Unidade de radar utilizado para medição da velocidade instantânea.

2.6.2. Rotação dos eixos motrizes (n)

A rotação das rodas motrizes do trator foi monitorada com o auxílio de transdutores indutivos tubulares associados a cada uma das rodas por meio de suportes. A alteração do campo magnético (indução) dos transdutores ocorre pela passagem de aletas equidistantes dispostas na periferia de uma coroa circular afixada concentricamente dentro da calota do rodado, servindo assim como sistema referencial.

O sistema de aquisição de dados foi configurado para fazer a leitura da frequência com a qual ocorria a alteração do campo magnético dos transdutores, de modo que cada alteração correspondesse a 1 Hz, sendo assim o sistema foi

calibrado para 45 Hz rps^{-1} . Os transdutores utilizados foram da marca Autonics, modelo PRCM 18 (Figura 6), com formato cilíndrico, com distância de detecção de 5 mm e 18 mm de diâmetro.



Figura 6. Sensor indutivo utilizado para a determinação da rotação dos rodados.

2.6.3. Força de tração (F_t)

A força necessária para tracionar o trator lastro foi monitorada por meio de uma célula de carga conectada ao sistema de aquisição de dados. Foi utilizada uma célula de carga da marca Kratos®, com capacidade máxima para 50 kN e com sinal de resposta de $306,63 \text{ N mV}^{-1}$.

A célula de carga foi ligada entre o cabo de aço e a barra de tração do trator, conforme a Figura 7.



Figura 7. Posicionamento da célula de carga entre o cabo de aço e a barra de tração.

2.6.4. Vibrações

As vibrações na base do assento do operador foram monitoradas por meio de dois acelerômetros uniaxiais da marca PCB®, com faixa de operação de 1 a 4000 Hz e sensibilidade de 100 mV g⁻¹. Os acelerômetros foram instalados perpendicularmente entre si, de modo que um monitorava as acelerações horizontais (paralelas ao plano de apoio do trator) e o outro as verticais (perpendiculares ao plano de apoio do trator), conforme a Figura 8.

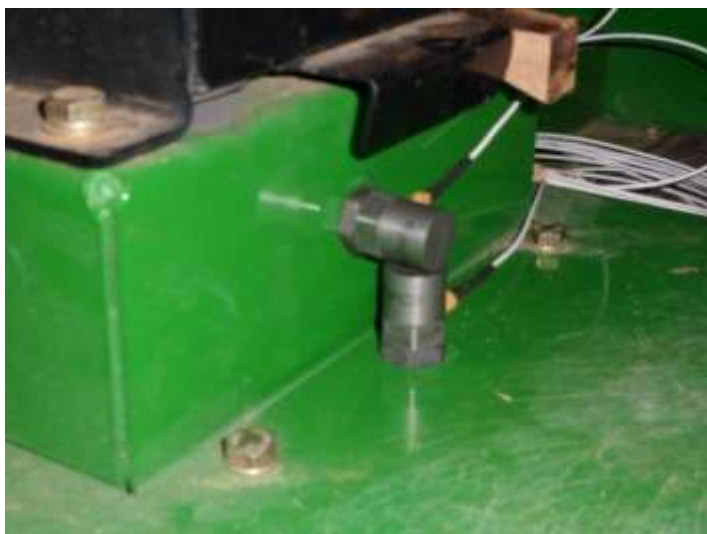


Figura 8. Posicionamento dos acelerômetros na base do assento do operador.

2.7. Estudo do deslizamento dos rodados e das vibrações na base do posto de operação

2.7.1. Deslizamento dos pneus do trator (s)

O deslizamento apresentado pelos rodados do trator ao longo do experimento foi computado para investigar a sua relação com as vibrações no posto de operação, sendo obtido através da relação entre velocidade translacional e rotacional para cada um dos rodados da máquina, de acordo com a Equação 1.

$$s = \frac{2 \pi n r_r - V_{op}}{V_{op}} 100 \quad (1)$$

em que,

s = Deslizamento do trator (%);

n = Rotação do eixo motriz (rps);

r_r = Raio de rolamento do pneu (m); e,

V_{op} = Velocidade operacional do trator ($m\ s^{-1}$).

2.7.2. Aceleração Média Quadrática (A_{RMS})

Os níveis de aceleração na base do posto de operação foram representados pelo valor da aceleração média quadrática (Root Mean Square – RMS) determinada na orientação paralela e na perpendicular ao plano de apoio do trator. O valor médio quadrático é um recurso utilizado para caracterizar de forma mais eficaz um pulso ou sinal que tem comportamento alternado ao longo do tempo. A aceleração média quadrática foi calculada para cada parcela conforme a Equação 2.

$$A_{RMS} = \left(\frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N a_i^2) \right)^{0,5} \quad (2)$$

em que,

A_{RMS} = Aceleração média quadrática ($m\ s^{-2}$);

N = Número de pontos amostrados (adm); e,

a_i = Aceleração instantânea pontual ($m\ s^{-2}$).

2.7.3. Espectro de frequências

Foi realizada uma análise de espectro de frequências para todos os tratamentos com intuito de verificar o comportamento das vibrações verticais e longitudinais na base do posto de operação, de acordo com cada faixa de frequência. Os espectros de frequências foram obtidos mediante a conversão dos dados de aceleração instantânea do domínio do tempo para o domínio da frequência, com a utilização da transformada rápida de Fourier (TRF). A amplitude de vibração foi calculada com base na raiz da soma quadrática dos coeficientes obtidos na série trigonométrica de Fourier, que tomou um número de 2^{10} dados consecutivos de vibração para cada tratamento experimental. Esses resultados foram expressos em forma de gráficos contendo as frequências no eixo das abscissas e a amplitude em termos de aceleração RMS no eixo das ordenadas.

2.8. Procedimento na execução do experimento

A pista utilizada no experimento possuía um comprimento de 30 metros e mais 15 metros adicionais para estabilizar o deslocamento do trator. O conjunto formado pelo trator ensaiado e trator lastro, denominado comboio, percorria todo o comprimento da parcela experimental com o sistema de aquisição operando. Quando o comboio chegava ao final da parcela o sistema era pausado e os dados referentes aos parâmetros operacionais de interesse eram salvos em planilha eletrônica para posterior análise.

A tração dianteira auxiliar (TDA) foi mantida ligada em todos os tratamentos, com a finalidade de se obter a máxima tração possível do trator ensaiado.

Para o procedimento foram utilizadas pressões decrescentes e dentro de cada pressão foram sorteadas as combinações entre magnitude e ângulo de aplicação da força na barra de tração. Antes de percorrer cada parcela, era selecionada a marcha do trator lastro e o ângulo de aplicação da força a partir das alças de atrelamento do suporte.

2.9. Análise estatística dos dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, independentemente da interação tripla ser ou não significativa optou-se pelo desdobramento completo dos fatores devido ao interesse no estudo. A interação entre os fatores pressão interna dos pneus e força de tração foi analisada por meio de regressão linear dentro de cada classe de inclinação, sendo os modelos selecionados com base no coeficiente de determinação, no comportamento do fenômeno e na significância dos coeficientes de regressão com a utilização do teste t. O efeito da classe de inclinação de aplicação da força na barra de tração (fator qualitativo) foi estudado dentro de cada combinação entre os fatores pressão interna dos pneus e força de tração, sendo efetuado o teste de Tukey.

Posteriormente, os fatores pressão interna dos pneus e força de tração foram estudados por meio de regressão linear englobando todas as classes de inclinação, com o intuito de extrapolar o estudo para uma condição real de trabalho do trator, onde se verifica a variação constante da inclinação da linha de tração.

Para a realização dos procedimentos estatísticos citados anteriormente foi utilizado o programa computacional R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012).

3. Resultados e discussão

Os resultados da caracterização física da pista utilizada no experimento estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Características físicas da área experimental.

Resistência à penetração	1105 kPa
Densidade	1,5083 g cm ⁻³
Teor de água	0,1501 Kg Kg ⁻¹

3.1. Deslizamento dos pneus do trator

Em detrimento do reduzido valor de avanço cinemático apresentado pelo trator nas pressões estudadas (-0,1387; -0,2461 e -0,0717% para as pressões 82,74; 96,53 e 110,32 kPa, respectivamente), a velocidade tangencial periférica dos rodados dianteiros e traseiros é praticamente a mesma, o que resultou numa diferença não significativa entre o deslizamento observado nos pneus de eixos distintos. A análise foi então baseada na taxa média de deslizamento entre os dois eixos.

Na Tabela 6 estão apresentadas as equações ajustadas para o deslizamento dos rodados do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração, para cada classe de inclinação da linha de tração.

Tabela 6. Equações de regressão ajustadas para o deslizamento dos rodados do trator (s, em %) em função da pressão interna dos pneus (P) e da força de tração (F) e o respectivo coeficiente de determinação (R²), para cada uma das inclinações

Inclinação	Equação ajustada	R ²
1 (-2 a -4°)	$\hat{s} = 0,0287^{**} P - 0,8127^{**} F + 0,0868^{**} F^2$	0,9589
2 (5 a 7°)	$\hat{s} = 0,0292^{**} P - 0,7424^{**} F + 0,0758^{**} F^2$	0,9595
3 (15 a 17°)	$\hat{s} = 0,0185^{**} P - 0,4253^{**} F + 0,0569^{**} F^2$	0,9485

** - Significativo ao nível de 1% pelo teste t.

A variável pressão interna dos pneus apresentou efeito linear no percentual de deslizamento dos rodados do trator. Para uma mesma força de tração, o incremento de uma unidade na pressão interna dos pneus resultou no acréscimo de 0,0287; 0,0292 e 0,0185% no deslizamento dos rodados do trator para as classes de inclinação 1, 2 e 3, respectivamente.

A variável força de tração apresentou efeito quadrático no percentual de deslizamento dos rodados do trator, com ponto de mínimo em 4,68; 4,89 e 3,73 kN para as classes de inclinação 1, 2 e 3, respectivamente.

Na Tabela 7 estão apresentados os valores médios de deslizamento dos rodados do trator para as combinações entre os fatores estudados.

Tabela 7. Valores médios de deslizamento dos rodados do trator, em %, para as combinações entre pressão interna dos pneus, força e inclinação da linha de tração

F (kN)	P1 - 82,74 kPa			P2 - 96,53 kPa			P3 - 110,32 kPa		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
3,57	0,59a	1,06a	1,13a	0,99a	0,72a	0,68a	0,97a	0,96a	0,74a
6,86	2,30a	1,87a	0,92a	1,45a	1,43a	1,44a	1,73a	1,82a	1,64a
12,46	4,67a	4,48a	4,88a	5,80a	5,99a	6,01a	6,00a	4,40b	6,44a
16,23	12,30a	8,71b	8,59b	13,17a	11,52b	8,75c	12,75a	12,41a	11,69a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na linha e para cada pressão, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. P – Pressão interna dos pneus; I – Inclinação da linha de tração; F – Força de tração.

Para as pressões internas dos pneus de 82,74 (P1) e 96,53 kPa (P2), observou-se diferença estatística entre as classes de inclinação apenas para a força de tração de 16,23 kN. Nas referidas pressões combinadas com a força de tração de 16,23 kN, a classe de inclinação 1 (I1) apresentou os maiores percentuais de deslizamento dos rodados do trator. Para a pressão de 82,74 kPa (P1) não houve diferença estatística entre as classes de inclinação 2 (I2) e 3 (I3), não sendo observado o mesmo comportamento para a pressão de 96,53 kPa (P2), onde a classe de inclinação 3 (I3) forneceu o menor percentual de deslizamento dos rodados do trator.

Na pressão de 110,32 kPa (P3) houve diferença estatística apenas na força de tração de 12,46 kN, não sendo observada a mesma tendência citada nas pressões anteriores. A pressão de 110,32 kPa apresentou, de modo geral, os maiores percentuais de deslizamento devido a reduzida área de contato do pneu com o solo, então a influência significativa apresentada pela classe de inclinação dentro desse desdobramento pode ter cunho estocástico.

Para a força de tração de 16,23 kN é possível observar que as taxas de deslizamento reduzem ao longo das classes de inclinação. Esse comportamento pode ser explicado pela transferência de peso do eixo dianteiro para o traseiro, resultando assim, em um menor peso dinâmico sobre o eixo dianteiro, o que contribui para o aumento do deslizamento dos rodados do trator devido à redução da capacidade de tração de cada pneu dianteiro.

Nota-se que a força de tração exerceu maior influência no deslizamento que a pressão interna dos pneus. A pressão interna dos pneus promoveu alterações mais bruscas na medida em que a força de tração atingiu níveis mais elevados (Figura 9).

$$\hat{s} = 0,0861^{**} P - 1,2864^{**} F - 0,0006^{**} P^2 + 0,0713^{**} F^2 + 0,0069^{**} P F \quad (R^2=0,9519)$$

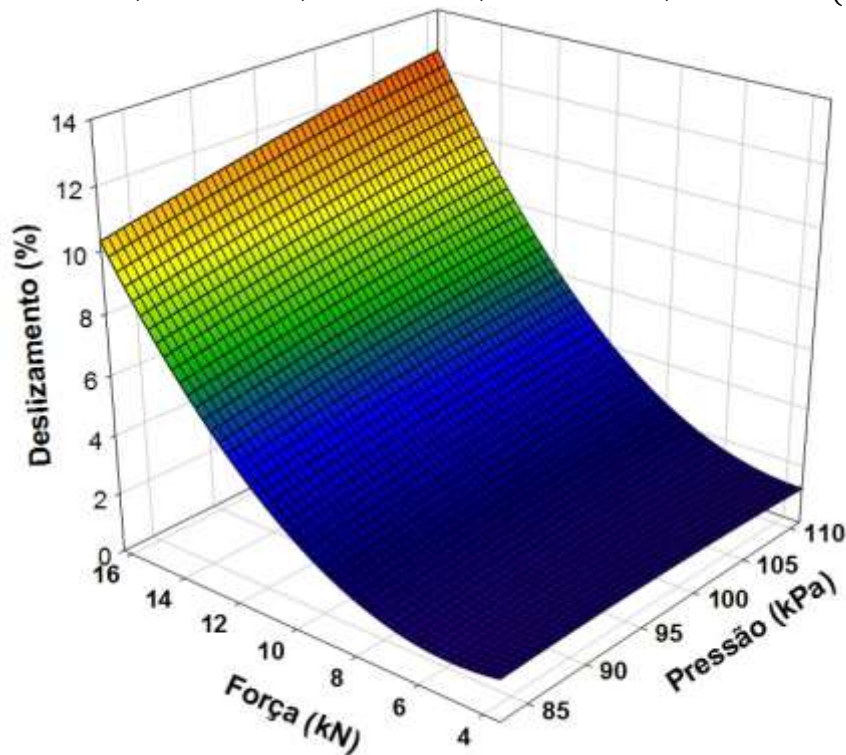


Figura 9. Equação ajustada e superfície de resposta para representar o deslizamento dos rodados do trator. ** - Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

Analisando a superfície de resposta é possível identificar que a redução da pressão interna dos pneus de 110,32 para 82,74 kPa culminou na elevação do percentual de deslizamento dos rodados do trator, principalmente quando a força de tração desenvolvida foi superior a 10 kN. A área de contato com o solo aumenta com a redução da pressão do pneu, e dessa forma há um incremento da capacidade de tração, com uma concomitante redução do potencial de compactação do pneu. Os resultados encontrados condizem com os obtidos por Šmerda & Čupera (2010), ao analisarem a influência da pressão de pneus de construção radial no desempenho em tração de um trator agrícola.

Numa simulação computacional, os autores Sahay & Tewary (2004) concluíram que quanto maior o componente vertical e para cima da força aplicada na barra de tração de um trator 4 x 2 simples, menor é a sua capacidade de tração. No presente experimento, observamos que o efeito dessa mesma componente foi contrário ao observado por tais autores por se tratar de um trator 4 x 2 com tração dianteira auxiliar, que se encontrava ligada durante a realização do experimento.

Num trator 4 x 2 sem tração dianteira auxiliar, é desejável que a transferência de peso do eixo dianteiro para o traseiro seja máxima, visto que apenas o eixo traseiro desempenha tração e que quanto maior o peso sobre o rodado maior será sua capacidade de desenvolver esforço tratorio. No caso de um trator 4 x 2 com

tração dianteira auxiliar, operando com ela acionada, é necessário equilibrar a transferência de peso para que a tração gerada pelos pneus do eixo dianteiro seja otimizada durante a operação.

3.2. Aceleração média quadrática na base do posto de operação

A seguir serão apresentados os resultados para os níveis de vibração, representados pela aceleração média quadrática (A_{RMS}), nos sentidos longitudinal e vertical na base do posto de operação.

3.2.1. Aceleração horizontal

As variáveis independentes, pressão interna dos pneus e força de tração, apresentaram efeito linear na aceleração horizontal na base do posto de operação do trator para as três classes de inclinação da linha de tração (Tabela 8).

Tabela 8. Equações de regressão ajustadas para a aceleração horizontal RMS (AH_{RMS} , em $m\ s^{-2}$) na base do posto de operação do trator em função da pressão interna dos pneus (P) e da força de tração (F) e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações

Inclinação	Equação ajustada	R^2
1 (-2 a -4°)	$\widehat{AH_{RMS}} = 0,0022^{**} P + 0,0139^{**} F$	0,7784
2 (5 a 7°)	$\widehat{AH_{RMS}} = 0,0026^{**} P + 0,0064^{*} F$	0,8583
3 (15 a 17°)	$\widehat{AH_{RMS}} = 0,0026^{**} P + 0,0091^{*} F$	0,7262

** e *. Significativo ao nível de 1% e 5%, respectivamente, pelo teste t. P – Pressão interna dos pneus; F – Força de tração.

Para uma mesma força de tração, o incremento de uma unidade na pressão interna dos pneus resultou num acréscimo dos níveis de aceleração horizontal de $0,0022\ m\ s^{-2}$ para a classe de inclinação 1 e de $0,0026\ m\ s^{-2}$ para as classes de inclinação 2 e 3. De modo análogo, para uma mesma pressão interna dos pneus, o incremento de uma unidade na força de tração resultou no acréscimo de 0,0139; 0,0064 e 0,0091 $m\ s^{-2}$ na aceleração horizontal na base do posto de operação para as classes de inclinação 1, 2 e 3, respectivamente.

Na Tabela 9 estão apresentados os valores médios de aceleração horizontal na base do posto de operação para as combinações entre os fatores estudados.

Tabela 9. Valores médios de aceleração horizontal RMS (AH_{RMS}) na base do posto de operação do trator para as combinações entre pressão interna dos pneus (P), força de tração (F) e inclinação (I)

F (kN)	P1 – 82,74 kPa			P2 – 96,53 kPa			P3 – 110,32 kPa		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
3,57	0,18a	0,21a	0,22a	0,24a	0,27a	0,28a	0,29a	0,27a	0,27a
6,86	0,17a	0,25a	0,21a	0,29a	0,28a	0,27a	0,40a	0,29a	0,40a
12,46	0,23a	0,25a	0,20a	0,24a	0,39a	0,30a	0,49a	0,32a	0,57a
16,23	0,30a	0,21a	0,25a	0,44a	0,32a	0,37a	0,72a	0,54a	0,63a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na linha e para cada pressão, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. P – Pressão interna dos pneus; F – Força de tração; I – Inclinação da linha de tração.

A variável classe de inclinação da linha de tração não apresentou efeito significativo na aceleração horizontal na base do posto de operação do trator em nenhuma das combinações entre pressão interna dos pneus e força de tração.

Na Figura 10 está apresentada a equação ajustada e sua respectiva superfície de resposta gerada para descrever a aceleração horizontal RMS em função da pressão interna dos pneus e da força de tração, englobando todas as classes de inclinação.

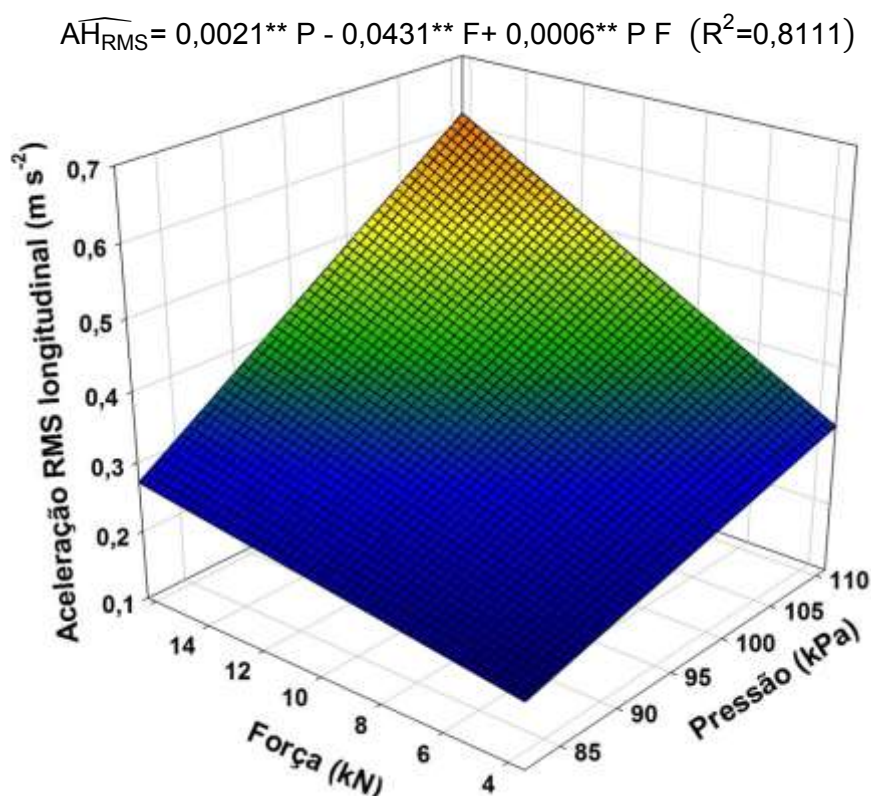


Figura 10. Equação ajustada e superfície de resposta para representar a aceleração RMS na direção horizontal na base do posto de operação. ** - Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

Para facilitar a análise e interpretação dos resultados obtidos, foram realizados quatro cortes na superfície de resposta, de modo a estudar o comportamento da aceleração horizontal dentro de cada força de tração ao longo das pressões internas dos pneus. A Figura 11 apresenta os cortes efetuados na superfície de resposta.

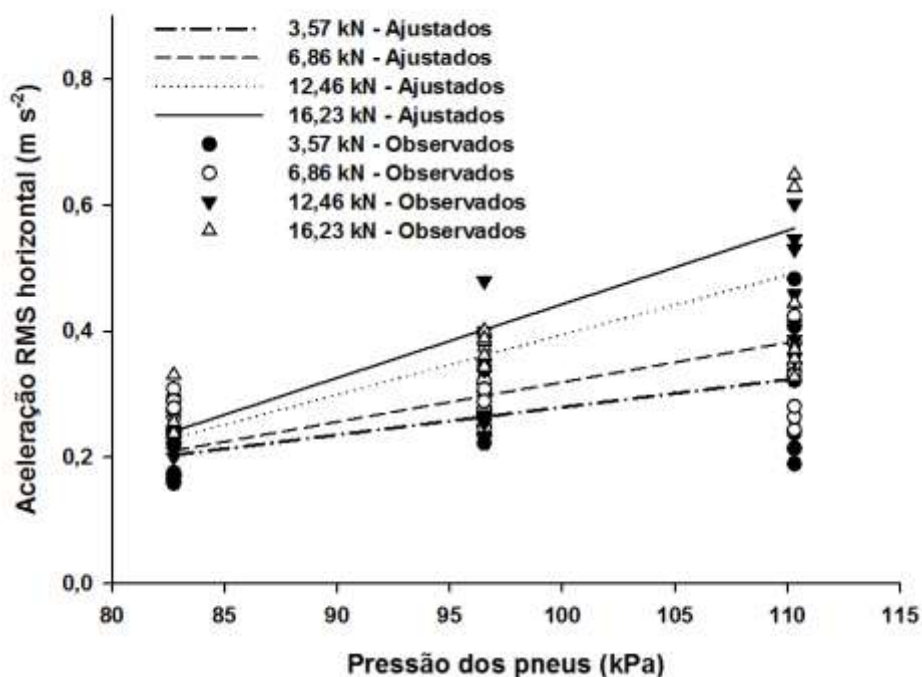


Figura 11. Corte na superfície de resposta gerada para a aceleração horizontal.

Analisando os cortes da superfície de resposta é possível identificar que, para todas as forças de tração, o aumento da pressão interna dos pneus de 82,74 (P1) para 110,32 kPa (P3) culminou na elevação dos níveis de vibração horizontal na base do posto de operação. A rigidez dos pneus é dependente da pressão do ar nele contido, logo, quando a pressão é reduzida ocorre o aumento da capacidade de amortecimento do pneu, conforme relatado em Goering et al. (2003).

Os resultados encontrados condizem com os encontrados por Sherwin et al. (2004), ao estudarem as vibrações de corpo inteiro em um trator florestal os autores concluíram que a redução da pressão interna dos pneus resultou na redução geral dos níveis de vibração. Adams et al. (2004) encontraram que o tempo de exposição á vibrações, de acordo com a norma ISO 2631, aumentou quando a pressão interna dos pneus de um trator foi reduzida, o que pressupõe menores intensidades de vibração nessas condições.

A partir dos cortes da superfície de resposta também fica evidente que o aumento da força de tração propiciou um aumento nos níveis de vibração horizontal

no posto de operação, principalmente para as forças 12,46 e 16,23 kN. O deslizamento dos pneus motrizes do trator causa certa instabilidade no deslocamento, podendo ser essa a razão de as maiores forças de tração terem produzido maiores níveis de vibração horizontal, uma vez que apresentaram os maiores índices de deslizamento.

A Figura 12 apresentam cortes na superfície de resposta obtida para o deslizamento do trator, tal como foi realizado para a vibração horizontal. Nota-se que o comportamento da curva ajustada para o deslizamento do trator segue a mesma tendência observada para a vibração longitudinal nas forças de tração 12,46 e 16,23 kN.

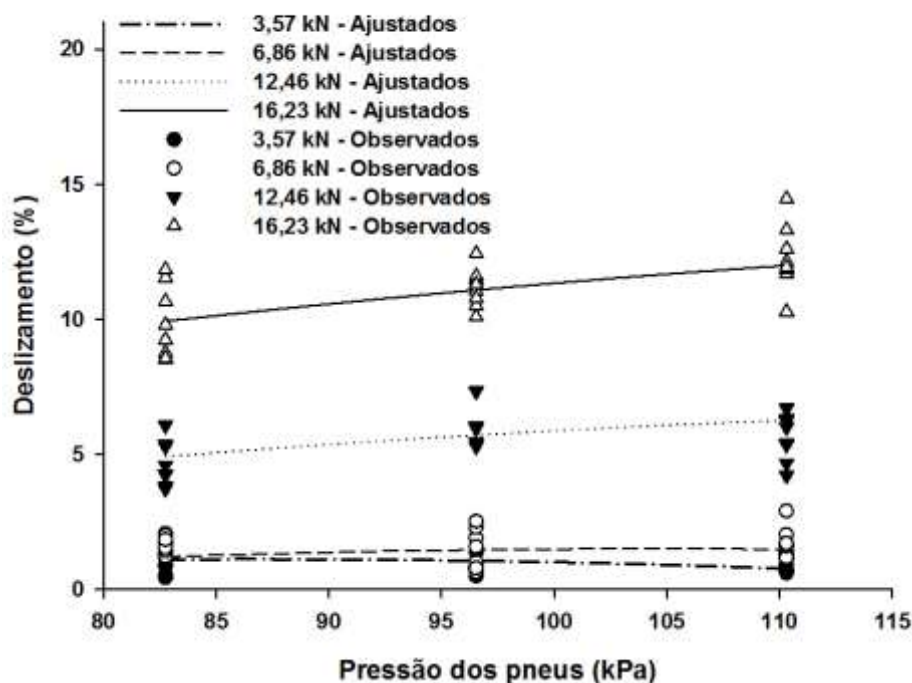


Figura 12. Corte na superfície de resposta gerada para o deslizamento do trator.

Os níveis de aceleração longitudinal apresentaram uma correlação de 0,4582 (Pearson, $p\text{-valor} < 0,0000$) com os índices de deslizamento apresentado pelos pneus do trator.

3.2.2. Aceleração vertical

Na Tabela 10 estão apresentadas as equações ajustadas para a aceleração vertical na base do posto de operação do trator em função da pressão interna dos pneus e da força de tração, para cada classe de inclinação da linha de tração.

Tabela 10. Equações de regressão ajustadas para a aceleração vertical RMS (AV_{RMS} , em $m s^{-2}$) na base do posto de operação do trator em função da pressão interna dos pneus (P) e da força de tração (F) e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para cada uma das inclinações

Inclinação	Equação ajustada	R^2
1	$\widehat{AV_{RMS}} = 7,5734 \cdot 10^{-5**} P^2 - 0,0896** F + 0,0056** F^2$	0,9198
2	$\widehat{AV_{RMS}} = 6,2358 \cdot 10^{-5**} P^2 - 0,0591** F + 0,0033** F^2$	0,9172
3	$\widehat{AV_{RMS}} = 5,0197 \cdot 10^{-5**} P^2 - 0,0138** F + 0,0007** F^2$	0,9312

** - Significativo ao nível de 1% pelo teste t. P – Pressão interna dos pneus; F – Força de tração.

As variáveis independentes, pressão interna dos pneus e força de tração, apresentaram efeito quadrático na aceleração vertical na base do posto de operação do trator dentro das três classes de inclinação consideradas no trabalho.

Para o intervalo estudado e para uma mesma força de tração, a pressão interna dos pneus de 82,74 kPa (P1) proporciona as menores acelerações verticais na base do posto de operação do trator. A variável força de tração apresentou ponto de mínimo em 8,00; 8,95 e 9,85 kN para as classes de inclinação 1, 2 e 3, respectivamente.

Na Tabela 11 estão apresentados os valores médios de aceleração vertical na base do posto de operação para as combinações entre os fatores estudados.

Tabela 11. Valores médios de aceleração vertical RMS (AV_{RMS}) na base do posto de operação do trator para as combinações entre pressão interna dos pneus (P), força de tração (F) e inclinação (I)

F (kN)	P1 – 82,74 kPa			P2 – 96,53 kPa			P3 – 110,32 kPa		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
3,57	0,30a	0,21a	0,26a	0,47a	0,30b	0,33ab	0,53b	0,73a	0,58ab
6,86	0,23a	0,24a	0,24a	0,37ab	0,33b	0,48a	0,56ab	0,41b	0,68a
12,46	0,24a	0,30a	0,25a	0,48a	0,35a	0,42a	0,71a	0,52b	0,51b
16,23	0,38a	0,26a	0,37a	0,73a	0,44b	0,43b	1,11a	0,75b	0,56c

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na linha e para cada pressão, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. P – Pressão interna dos pneus; I – Inclinação da linha de tração; F – Força de tração.

Para a pressão interna dos pneus de 82,74 kPa (P1) a classe de inclinação não apresentou efeito significativo nos níveis de vibração vertical em nenhuma das forças estudadas. Esse resultado pode estar relacionado à maior capacidade de amortecimento oferecida pela menor pressão interna, suprimindo assim um possível efeito da inclinação da linha de tração nos níveis de vibração vertical.

De modo geral, a classe de inclinação 1 (I1) proporcionou maiores níveis de vibração vertical médios para a pressão interna de 96,53 kPa (P2). Para essa mesma pressão a diferença entre as classes de inclinação extremas 1 (I1) e 3 (I3) foi

significativa apenas para a força de tração de 16,23 kN. A classe de inclinação 2 (I2) indicou uma tendência em apresentar os menores níveis de vibração.

Para a pressão de 110,32 kPa (P3) a diferença entre as classes de inclinação extremas 1 (I1) e 3 (I3) foi significativa apenas nas forças de tração 3 e 4, sendo que o valor mais alto para a vibração vertical foi observado na força de 16,23 kN combinada com a inclinação 1 (I1).

É possível identificar que apesar das divergências significativas entre os níveis de vibração proporcionados por cada classe de inclinação, é difícil traçar uma tendência característica do efeito da classe de inclinação da linha de tração sobre os níveis de vibração vertical na base do posto de operação, principalmente, nas menores forças de tração.

Uma consideração importante é a respeito da superioridade significativa apresentada pela classe de inclinação 1 (I1) nos níveis de vibração obtidos para a combinação entre a força de tração de 16,23 kN e as pressões internas de 96,53 (P2) e 110,32 kPa (P3). A supremacia da classe de inclinação 1 (I1) na condição supracitada pode estar relacionada com os maiores índices de deslizamento apresentados pelo trator, o que pode ter ocasionado um acréscimo nos valores de aceleração vertical. Outra explicação seria a maior transferência de peso do eixo dianteiro para o traseiro, proporcionada pela combinação do ângulo e da magnitude da força aplicada na barra de tração, que poderia ocasionar uma instabilidade vertical no eixo traseiro em detrimento do incremento de peso sobre o eixo traseiro.

Na Figura 13 está apresentada a equação ajustada e sua respectiva superfície de resposta para descrever a aceleração RMS vertical em função da pressão dos pneus e da força de tração, para todas as classes de inclinação.

$$\widehat{AV}_{RMS} = -0,0027^{**} P - 0,0369^{**} F + 8,2370 \cdot 10^{-5} P^2 + 0,0024^{**} F^2 \quad (R^2=0,9012)$$

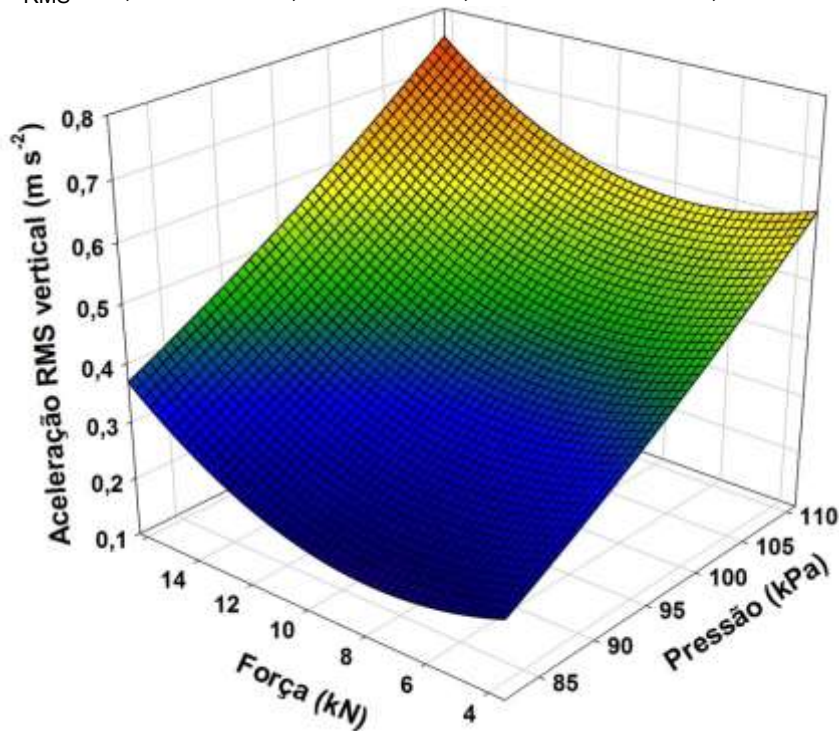


Figura 13. Equação ajustada e superfície de resposta para representar a aceleração RMS na direção vertical na base do posto de operação. ** - Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

De modo análogo ao utilizado para as vibrações longitudinais, foram realizados quatro cortes na superfície de resposta (Figura 14) para facilitar a análise e interpretação dos resultados.

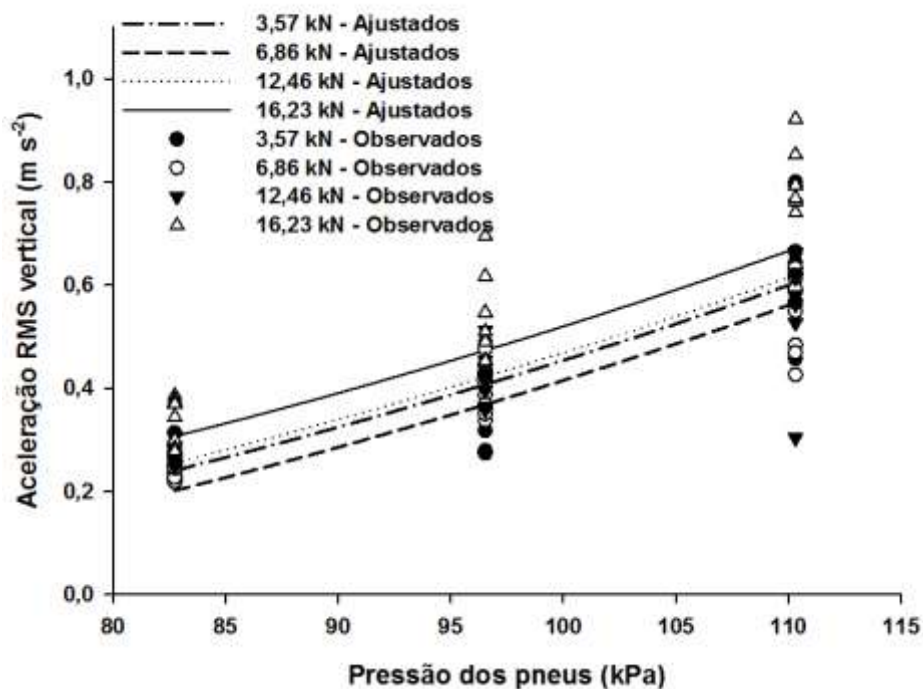


Figura 14. Corte na superfície de resposta gerada para a aceleração vertical.

Pela análise do corte na superfície de resposta é possível identificar que, para todas as forças de tração, a redução da pressão interna dos pneus de 110,32 (P3) para 82,74 kPa (P1) culminou na redução dos níveis de vibração vertical na base do posto de operação. Esse comportamento pode ser explicado novamente pela capacidade de amortecimento do pneu, pois quanto maior a pressão interna maior é a rigidez e menor é a sua capacidade de amortecimento.

A redução dos níveis de vibração vertical encontrados neste trabalho é compatível com a encontrada por Sherwin et al. (2004), mediante o estudo dos níveis de vibração na plataforma de um trator florestal, os autores ressaltam o acréscimo da capacidade de amortecimento com a redução da pressão interna dos pneus.

Ao analisar os níveis de vibração no posto de operação para o mesmo modelo de trator, em operação de subsolagem sobre solo arado e gradeado, Villibor et al. (2012) não encontraram alterações nos níveis de vibração vertical com a redução da pressão de 124,11 para 82,74 kPa. Os resultados obtidos nesse trabalho divergem dos encontrados por esses autores, provavelmente pela condição da camada superficial de solo, pois um solo arado e gradeado se deforma com a passagem do trator, tornando a vibração menos dependente da pressão interna dos pneus. Na condição de solo firme, em que foi conduzido o presente trabalho, a deformação do solo é desprezível e não exerce um eventual amortecimento no deslocamento do trator.

O corte na superfície de resposta (Figura 14) também evidencia que as vibrações verticais na base do posto de operação foram crescentes da força de tração 6,86 para 16,23 kN. A força de tração 3,57 kN apresentou níveis de vibração superiores ao da força 6,86 kN, o que pode estar relacionado aos menores índices de deslizamento apresentados por essa força e com a provável ampliação do efeito das garras do pneu nas acelerações verticais conforme já estudado por Rabbani et al. (2011).

O aumento dos níveis de vibração vertical na base do posto de operação, decorrentes do incremento da força de tração, está relacionada com os índices de deslizamento apresentado pelo trator no experimento. Os níveis de aceleração vertical apresentaram uma correlação de 0,4177 (Pearson, $p\text{-valor} < 0,0000$) com os índices de deslizamento apresentado pelos pneus do trator.

O deslizamento é fonte de instabilidade vertical, contribuindo assim com o acréscimo das acelerações verticais. Os resultados deste trabalho condizem com os

obtidos por Schlosser et al. (2001), onde os autores concluíram que maiores forças de tração, associadas com maiores pressões internas nos pneus dianteiros, induziram o aparecimento do fenômeno de *power hop* do trator, que se caracteriza pelas altas amplitudes de vibração vertical.

3.2.3. Conforto e saúde do operador de acordo com as vibrações obtidas

A partir dos modelos ajustados para estimar a aceleração média quadrática na base do posto de operação, nos sentidos longitudinal e vertical, é possível identificar que os maiores valores ocorreram na combinação da maior força de tração (F) com a maior pressão interna dos pneus (P). Esses valores estimados foram de $0,5638 \text{ m s}^{-2}$ para o sentido longitudinal e de $0,7407 \text{ m s}^{-2}$ para o sentido vertical.

De acordo com a norma ISO 2631-1 (1997) esses valores de intensidade de vibração estão na faixa com potencial de causarem riscos à saúde do operador numa exposição diária de 4 a 8 horas, sendo necessária a tomada de precauções. Cabe ressaltar que os valores aqui apresentados foram estimados com base nas observações realizadas na base do posto de operação e que o assento, com seu sistema de amortecimento, auxilia na redução da intensidade de vibração a qual o trabalhador está sujeito.

A eficiência de amortecimento de um assento pode ser medida através da porcentagem da vibração na base do posto de operação que é transmitida ao operador sentado, sendo o termo conhecido por transmissibilidade. Franchini (2007), trabalhando com um trator de mesma potência e configuração similar de assento, encontrou transmissibilidades variando de 88 a 102% durante operações de preparo de solo. Caso o assento do trator utilizado transmita 80% da vibração incidente na base do posto de operação, os maiores valores de vibração estimados ainda continuarão dentro da faixa de risco potencial à saúde para uma jornada diária de 4 a 8 horas.

Com relação ao conforto do operador, os maiores valores estimados estão na faixa razoavelmente desconfortável da norma ISO 2631-1, mesmo com uma eficiência de amortecimento de 20% para o assento do operador.

O máximo valor de aceleração vertical observado foi de $1,1075 \text{ m s}^{-2}$, no tratamento: classe de inclinação 1, força de tração de 16,23 kN (F4) e a pressão interna dos pneus de 110,32 kPa (P3). Esse valor está na faixa de risco provável a saúde e de desconfortável para o trabalhador.

3.3. Análise espectral das vibrações longitudinais e verticais

A amplitude das acelerações foi estudada em função do espectro de frequências, com a finalidade de identificar as faixas de frequência com maiores amplitudes de vibração em cada um dos tratamentos avaliados.

3.3.1. Vibração horizontal

A partir da análise das Figuras 15 a 17 é possível identificar que, de modo geral, as maiores amplitudes de vibração no sentido longitudinal estão situadas próximo a frequência de 2 Hz. Os espectros obtidos se assemelham aos encontrados por Villibor et al. (2012), para o mesmo modelo de trator, em operação de subsolagem.

De acordo com Brüel & Kjaer (2002), a perna dobrada apresenta uma frequência natural próxima a 2 Hz, para as condições estudadas essa seria então a parte do corpo mais susceptível a injúrias devido ao fenômeno de ressonância.

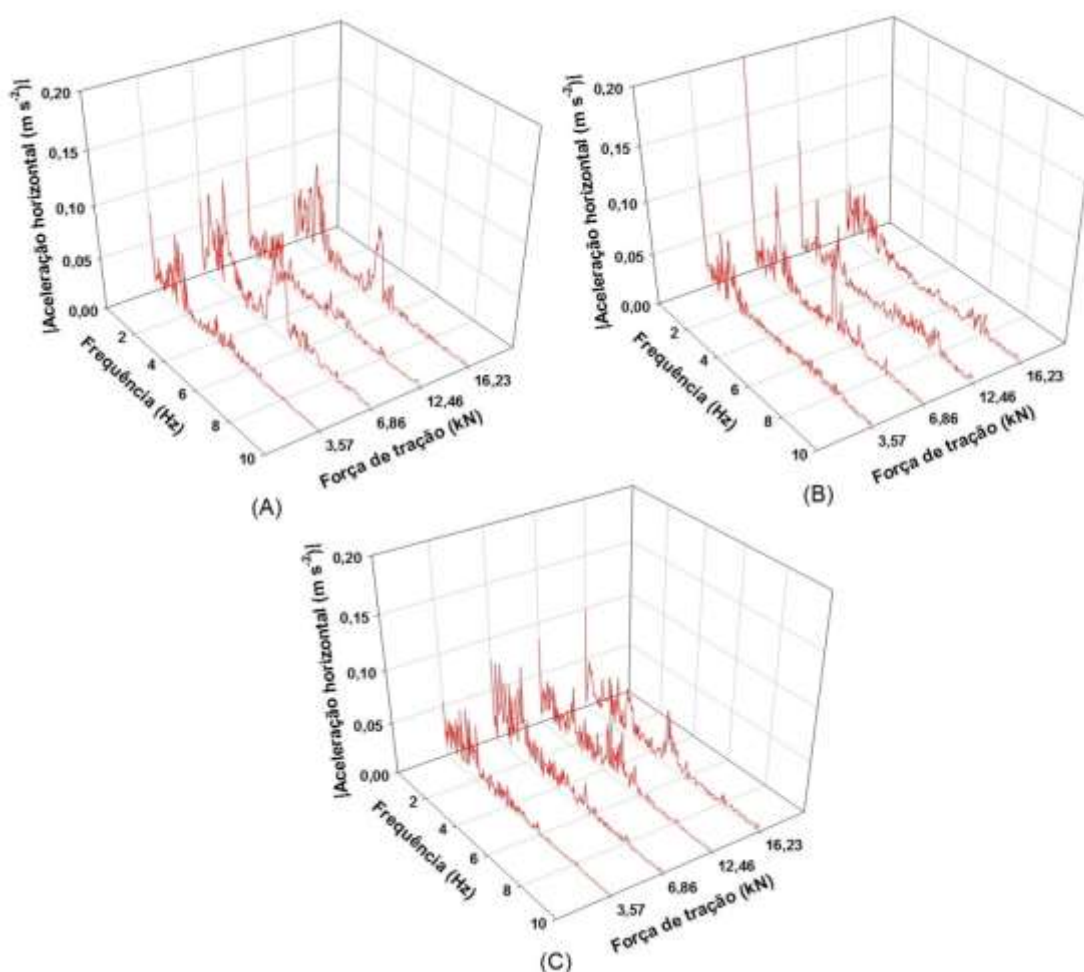


Figura 15. Espectro de frequências para a aceleração horizontal na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 82,74 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).

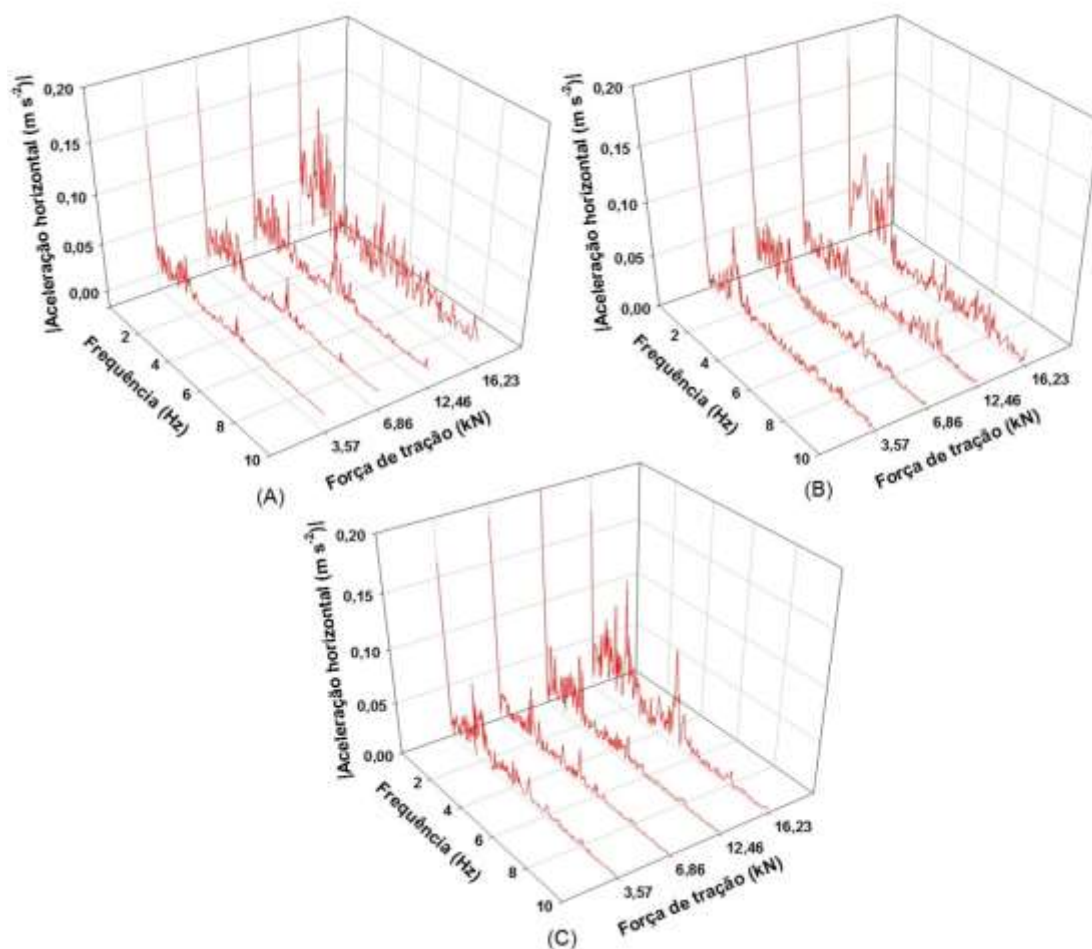


Figura 16. Espectro de frequências para a aceleração horizontal na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 96,53 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).

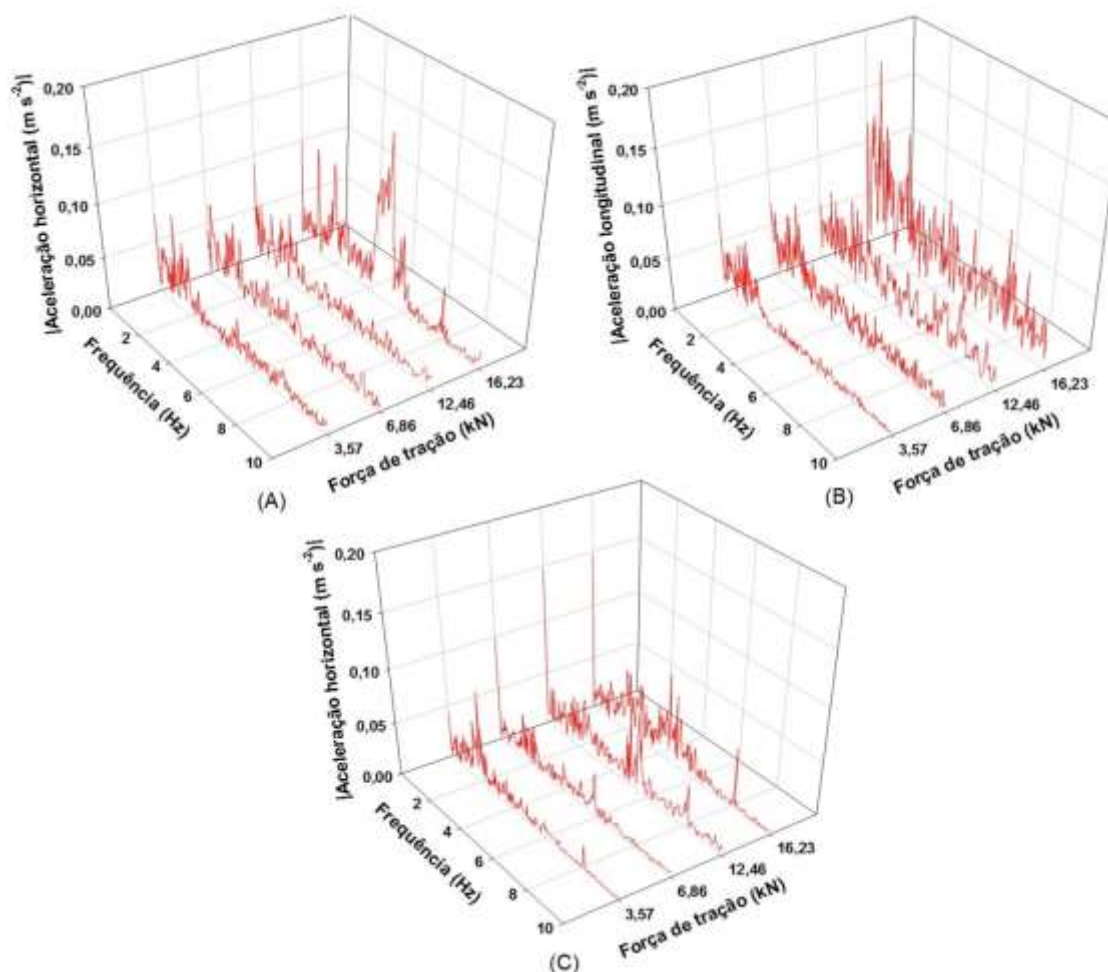


Figura 17. Espectro de frequências para a aceleração longitudinal na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 110,32 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).

As combinações entre o ângulo e a magnitude da força aplicada na barra de tração não promoveram alterações bruscas na amplitude de vibração longitudinal na base do posto de operação para a pressão interna dos pneus de 82,74 kPa (Figuras 15, 16 e 17).

Para a pressão interna dos pneus de 96,53 kPa é possível observar que a força de tração de 16,23 kN (apresentou uma maior amplitude de vibração longitudinal que as demais, mas os valores de pico continuaram ocorrendo próximos a frequência de 2 Hz. Esse comportamento pode ter relação com os índices de deslizamento dos rodados motrizes do trator, que pode alterar a constância da velocidade operacional e dessa forma refletir em maiores variações na aceleração longitudinal.

A pressão interna dos pneus de 110,32 kPa apresentou maiores amplitudes de vibração longitudinal ao longo da faixa de frequência de 0 a 10 Hz, para as

inclinações 1 e 2. Esse comportamento pode estar associado com a maior rigidez do pneu são e com os maiores índices de deslizamento apresentados por essa pressão.

3.3.2. Vibração vertical

As Figuras 18 a 20 indicam que as maiores amplitudes de vibração no sentido vertical na base do posto de operação ocorreram na faixa compreendida entre 2 e 4 Hz de frequência. A concentração dos maiores picos de vibração vertical próximos a frequência de 2 Hz pode causar injurias nas pernas do operador, que se encontram dobradas e em contato com a base do operador sem nenhum sistema de amortecimento.

Os tratamentos não induziram mudanças significativas no espectro de frequências, mantendo sempre a mesma tendência de comportamento.

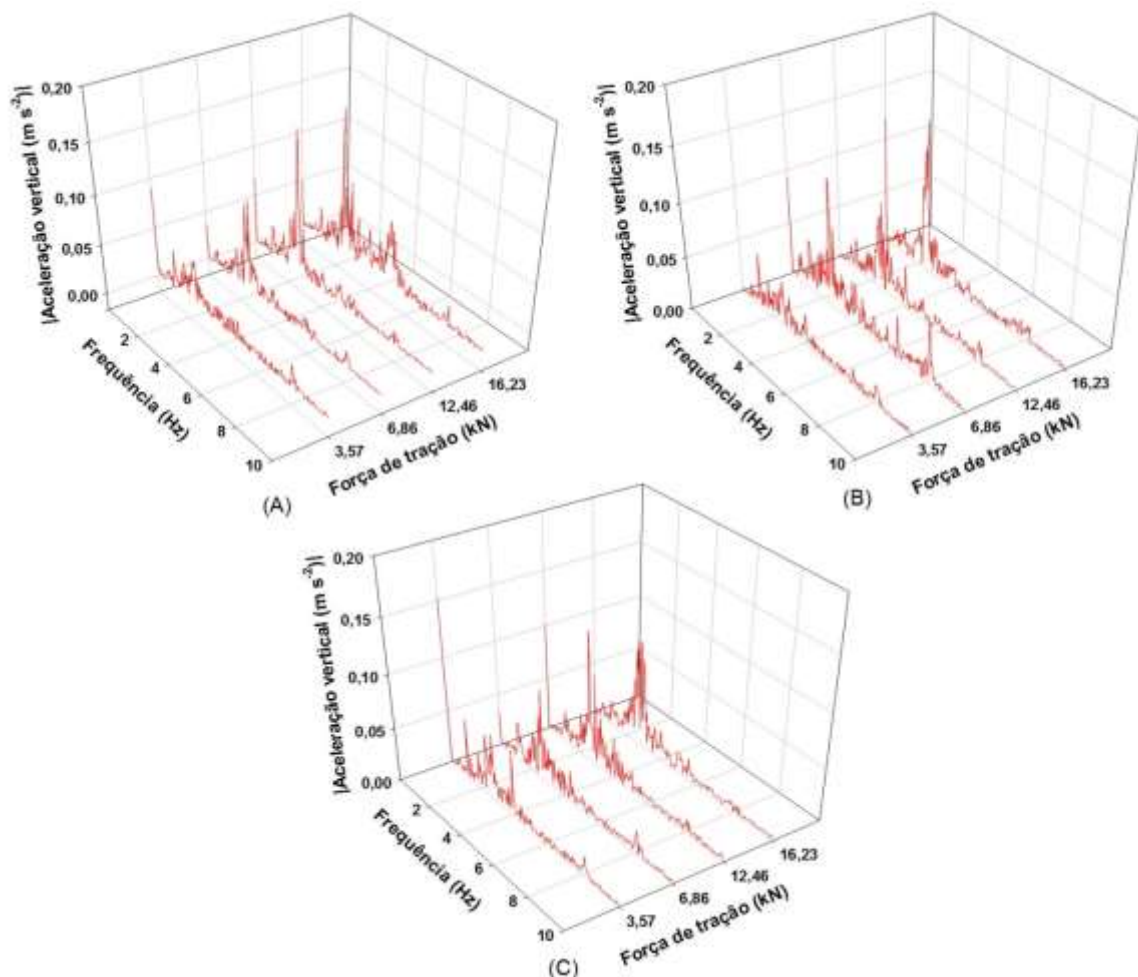


Figura 18. Espectro de frequências para a aceleração vertical na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 82,74 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).

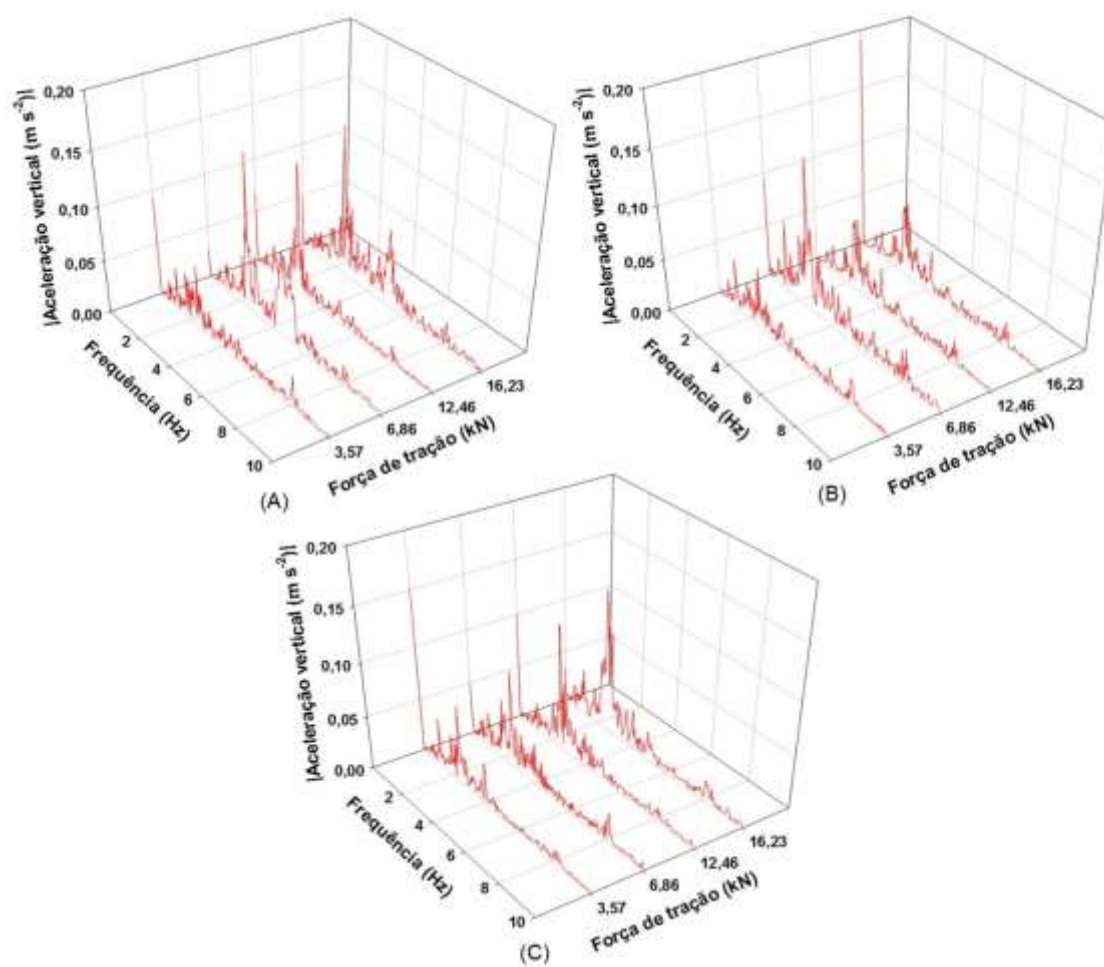


Figura 19. Espectro de frequências para a aceleração vertical na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 96,53 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).

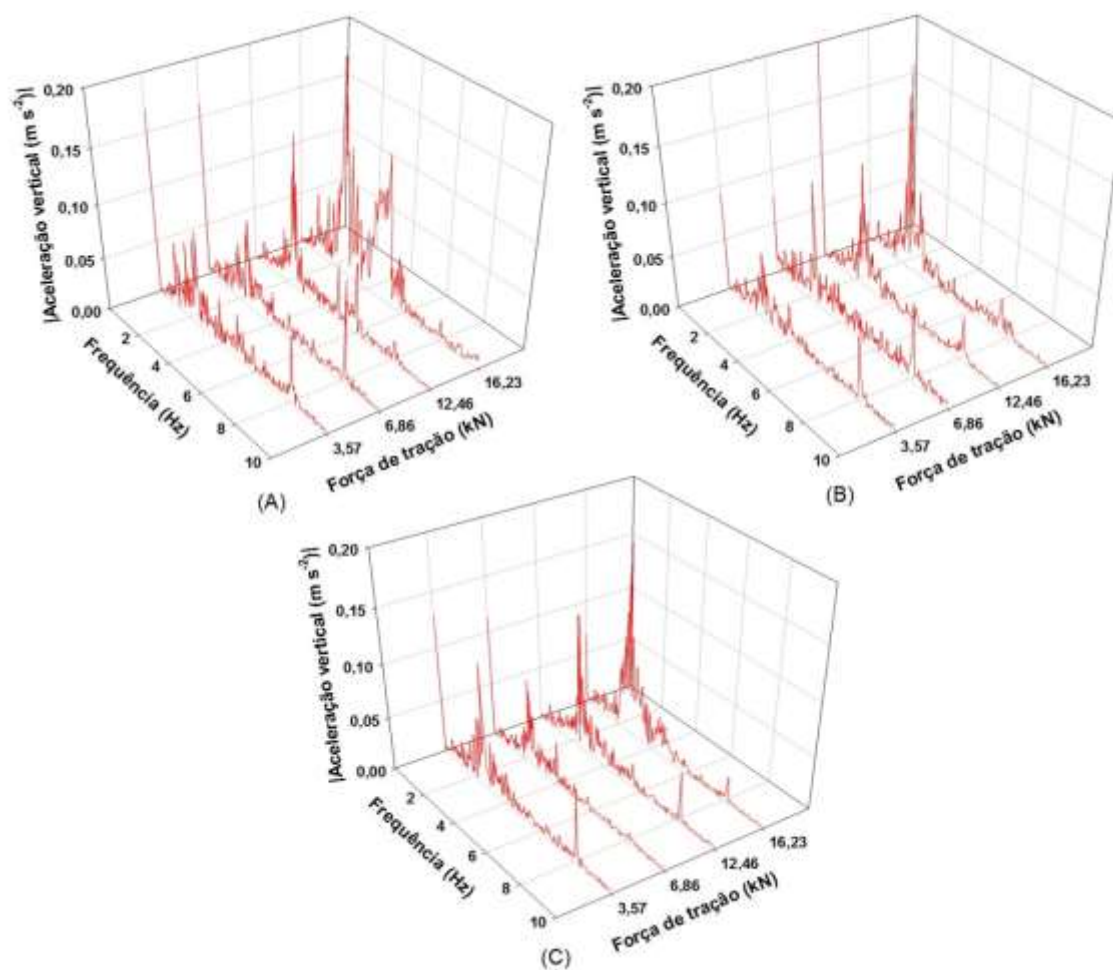


Figura 20. Espectro de frequências para a aceleração vertical na base do posto de operação de acordo com a força de tração testada, na pressão de 110,32 kPa e nas classes de inclinação 1 (A), 2 (B) e 3(C).

4. Conclusões

Nas condições em que o trabalho foi conduzido pode-se concluir que:

- Os índices de deslizamento dos rodados do trator são maiores na combinação entre a maior força de tração com a maior pressão interna dos pneus.
- A aceleração média quadrática no sentido vertical é maior que a no sentido longitudinal, para a combinação entre a maior força de tração e a maior pressão interna dos pneus.
- As classes de inclinação 1 e 3 fornecem as maiores acelerações medias quadrática no sentido longitudinal, para a pressão interna dos pneus de 110,32 kPa.
- As acelerações (RMS) longitudinal e vertical se correlaciona positivamente com os índices de deslizamento do trator ensaiado.
- A classe de inclinação 1 apresenta os maiores níveis de vibração no sentido vertical para as duas maiores forças, combinadas com a pressão de 110,32 kPa.
- O aumento da pressão interna dos pneus implica no aumento dos níveis de vibração nos dois sentidos estudados..
- As maiores amplitudes de vibração no sentido longitudinal são entre 0 e 2 Hz de frequência.
- As maiores amplitudes de vibração no sentido vertical são entre 2 e 4 Hz de frequência.

5. Referências bibliográficas

ADAMS, B. T.; REID, J. F.; HUMMEL, J. W.; ZHANG, Q.; HOEFT, R. G. Effects of central tire inflation systems on ride quality of agricultural vehicles. **Journal of Terramechanics**, v. 41, n. 4, p. 199-207, 2004. ISSN 0022-4898.

ANFAVEA, 2011. “Autoveículos - Produção em 2011” Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores”.

BOVENZI, M.; BETTA, A. Low-back disorders in agricultural tractor drivers exposed to whole-body vibration and postural stress. **Applied Ergonomics**, v. 25, n. 4, p. 231-241, 1994. ISSN 0003-6870.

BRÜEL & KJAER, 2002, “Human Vibration”, Technical Presentation, 54 p.

CHATURVEDI, V.; KUMAR, A.; SINGH, J. K. Power tiller: Vibration magnitudes and intervention development for vibration reduction. **Applied Ergonomics**, v. 43, n. 5, p. 891-901, 2012. ISSN 0003-6870.

COGGINS, M. A.; VAN LENTE, E.; MCCALLIG, M.; PADDAN, G.; MOORE, K. Evaluation of hand-arm and whole-body vibrations in construction and property management. **Annals of Occupational Hygiene**, v. 54, n. 8, p. 904-914, 2010. ISSN 00034878 (ISSN).

CUTINI, M.; ROMANO, E.; BISAGLIA, C. Assessment of the influence of the eccentricity of tires on the whole-body vibration of tractor drivers during transport on asphalt roads. **Journal of Terramechanics**, n. 0, 2012 ISSN 0022-4898.

EMBRAPA. **Manual e métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Atual, 1997. 212p

FRANCHINI, D. **Análise do nível de vibrações verticais no assento de um trator agrícola**. 2007. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Mecanização Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

GOERING, C.E., STONE, M.L.; SMITH, D.W.; TURNQUIST, P.K. **Off-Road Vehicle Engineering Principles**. ASAE, St. Joseph, Mich., 2003.

ISO 2631-1. "Mechanical vibration and shock – evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part I: general requirements". Switzerland: International Standard, 1997.

LOUTRIDIS, S.; GIALAMAS, T.; GRAVALOS, I.; MOSHOU, D.; KATERIS, D.; XYRADAKIS, P.; TSIROPOULOS, Z. A study on the effect of electronic engine speed regulator on agricultural tractor ride vibration behavior. **Journal of Terramechanics**, v. 48, n. 2, p. 139-147, 2011. ISSN 0022-4898.

MILOSAVLJEVIC, S.; MANI, R.; RIBEIRO, D. C.; VASILJEV, R.; REHN, B. Exploring how anthropometric, vehicle and workplace factors influence whole-body vibration exposures during on-farm use of a quad bike. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 42, n. 4, p. 392-396, 2012. ISSN 0169-8141.

NGUYEN, V. N.; INABA, S. Effects of tire inflation pressure and tractor velocity on dynamic wheel load and rear axle vibrations. **Journal of Terramechanics**, v. 48, n. 1, p. 3-16, 2011. ISSN 0022-4898.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. 2012. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

RABBANI, M. A.; TSUJIMOTO, T.; MITSUOKA, M.; INOUE, E.; OKAYASU, T. Prediction of the vibration characteristics of half-track tractor considering a three-dimensional dynamic model. **Biosystems Engineering**, v. 110, n. 2, p. 178-188, 2011. ISSN 1537-5110.

RAKHEJA, S.; DONG, R. G.; PATRA, S.; BOILEAU, P. É.; MARCOTTE, P.; WARREN, C. Biodynamics of the human body under whole-body vibration: Synthesis of the reported data. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 40, n. 6, p. 710-732, 2010. ISSN 0169-8141.

SAHAY, C. S.; TEWARI, V. K. Computer Simulation of Tractor Single-point Drawbar Performance. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 4, p. 419-428, 2004. ISSN 1537-5110.

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, p. 985-989, 2001. ISSN 0103-8478.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; BELFIORE, N. P. Analysis of driving seat vibrations in high forward speed tractors. **Biosystems Engineering**, v. 97, n. 2, p. 171-180, 2007. ISSN 1537-5110.

SHERWIN, L. M.; OWENDE, P. M. O.; KANALI, C. L.; LYONS, J.; WARD, S. M. Influence of tyre inflation pressure on whole-body vibrations transmitted to the operator in a cut-to-length timber harvester. **Applied Ergonomics**, v. 35, n. 3, p. 253-261, 2004. ISSN 0003-6870.

SOEIRO, N. S. Vibrações e o corpo humano: Uma avaliação ocupacional. In: I Workshop de Vibração e Acústica da Região Norte, 2011. Tucuruí, Pará, Brasil.

VILLIBOR, G. P.; SANTOS, F. L.; FURTADO JÚNIOR, M. R.; LOUREIRO, D. R.; QUEIROZ, D. M. D.; JUNIOR, J. K. K.; BÜCHNER, P. C. Vibração vertical e longitudinal no assento do tratorista em operação de subsolagem em diferentes pressões de insuflação dos pneus e velocidades de deslocamento do trator. In: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012. São Luiz, Maranhão, Brasil. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas.

Artigo III

Variação da pressão interna dos pneus de um trator agrícola 4x2 TDA
em função da força de tração

Variação da pressão interna dos pneus de um trator agrícola 4x2 TDA em função da força de tração

Resumo: Este estudo teve como objetivos avaliar a alteração da pressão interna dos pneus em função da transferência de peso apresentada pelo trator. Foram utilizados quatro níveis de transferência de peso, obtidos mediante a utilização de quatro forças de tração (4,44; 14,57; 18,60 e 23,92 kN), no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Foi utilizado um trator agrícola 4x2 TDA de 63 kW de potência, equipado com transdutores para avaliar a alteração da pressão interna dos pneus em condição dinâmica. A variação média quadrática da pressão interna dos pneus de um mesmo eixo foi analisada por meio de regressão linear. A força de tração teve efeito linear na variação média quadrática da pressão interna dos pneus dianteiros e traseiros, sendo o efeito negativo para os pneus dianteiros e positivo para os traseiros, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,7233 e 0,6933, respectivamente. Nas condições em que o experimento foi conduzido a transferência de peso promoveu alterações significativas na pressão interna dos pneus do eixo dianteiros e traseiros, sendo essas alterações relacionadas matematicamente de maneira satisfatória.

Palavras-chave: transferência de peso, mecanização agrícola, pressão dinâmica.

Variation of internal pressure of the tires of a MFWD farm tractor as function of traction force

Abstract: This study had the objective to evaluate the variation of the tire internal pressure in function of weight transfer presented by the tractor. Were utilized four levels of weight transfer, obtained by the utilization of four traction forces (4,44; 14,57; 18,60 e 23,92 kN), in the completely randomized design, with four replicates. Was used a MFWD farm tractor of 63 kW of power, equipped with transducers for evaluate the variation of the internal pressure of the tires in dynamic condition. The mean square variation of the internal pressure of the tires was analyzed by linear regression. The traction force had linear effect on the mean square variation of the internal pressure of the rear and front tires, being the effect negative for the front tires and positive for the rear tires, with determination coefficient (R^2) of 0,7233 and 0,6933, respectively. In the conditions where the experiment was conducted the weight transfer promoted significant alterations in internal pressure of the tires of rear and front axle, being the alterations mathematically related of satisfactory way.

Key words: weight transfer, agricultural mechanization, dynamic pressure.

1. Introdução

Dentre os avanços tecnológicos advindos do processo de modernização da agricultura brasileira, a mecanização agrícola tem papel de destaque uma vez que possibilitou a ampliação das áreas cultivadas, aumentando dessa forma os rendimentos agrícolas. Outro aspecto importante na mecanização é a otimização do emprego da mão de obra no campo, pois com o uso de processos mecanizados o homem consegue obter uma produtividade superior à conseguida com trabalhos manuais ou semi-mecanizados. A logística das atividades ao longo do ano agrícola também é facilitada devido ao alto rendimento operacional dos conjuntos mecanizados, permitindo assim um melhor planejamento das atividades pelo agricultor.

O trator agrícola aparece como principal fonte de potência no campo, caracterizando-se por ser uma máquina dinâmica e multifuncional, podendo ser utilizada em quase todas as operações do plantio a colheita. De acordo com Kathirvel et al. (2001), a eficiência de um trator agrícola pode ser medida pela versatilidade que este apresenta em fornecer potência a uma vasta gama de implementos agrícolas. Segundo Liljedahl et al. (1995), a barra de tração é o meio de aproveitamento de potência mais utilizado nos tratores agrícolas, apesar de apresentar menor eficiência tratória devido a grande perda de energia na interface solo-máquina, representada pelos rodados do trator.

O rendimento mecânico de um trator pode ser expresso pela eficiência tratória e/ou pelo rendimento de tração. A eficiência tratória é definida como sendo a razão entre a potência de saída e a potência de entrada de um dispositivo de tração (ASABE, 2003), ou seja, é a relação entre a potência disponível na barra de tração e potência final no sistema de transmissão. De acordo com Shell et al. (1997) e Turner et al. (1997), o rendimento de tração é a fração da potência disponível no motor que é disponibilizada para a realização de esforços na barra de tração.

O rendimento de tração engloba a eficiência tratória e a eficiência do sistema de transmissão do trator, dessa forma é um modo mais amplo e efetivo de mensurar o desempenho total da máquina em tração, tornando mais simples as comparações.

Segundo Mialhe (1980), rodado é o termo genérico que representa o elemento locomotor que atua na interface solo-máquina, e fornece as características veiculares ao trator agrícola. A maior redução de eficiência ocorre no contato do rodado com o solo através deslizamento relativo entre as superfícies do solo e do rodado, e que pode ser definido como uma razão entre as velocidades translacional

e rotacional do dispositivo de tração. Além do deslizamento relativo entre as duas superfícies, considera-se também o efeito da deformação dos pneus e do solo na redução da velocidade translacional, esses fatores atuando concomitantemente são definidos pela ASABE (2003), pelo termo razão de redução de percurso.

Segundo Barbosa et al. (2005), o pneu de um trator é um de seus componentes mais importantes, pois é responsável pela sustentação, equilíbrio, deslocamento, direcionamento e realização do esforço tratório. A capacidade de fornecer potência para tracionar implementos e realizar satisfatoriamente as operações agrícolas depende da configuração do rodado que equipa o trator. De acordo com Zoz e Grisso (2003), os principais fatores que afetam o rendimento de tratores agrícolas de pneus são a carga aplicada sobre o eixo motriz, a transferência de peso, tamanho e pressão interna dos pneus. Outro fator, extrínseco à máquina, que interfere na capacidade de tração é a condição da camada superficial do solo, pois a resposta do solo ao cisalhamento interfere negativa ou positivamente na capacidade do solo em resistir aos esforços de tração impostos pelos rodados do trator.

O cisalhamento do solo devido ao estresse mecânico gera uma força potencial no solo que permite o deslocamento da roda sobre o mesmo, sendo que esta força se correlaciona positivamente com a resistência do solo à penetração. Segundo Garciano et al. (2010), a resistência ao rolamento de veículos fora-de-estrada está diretamente relacionada com a compressibilidade, de modo que o índice de cone de um solo pode ser um indicador adequado para caracterizar o comportamento em tração de um veículo.

Também interfere na capacidade de tração dos tratores agrícolas a transferência de peso, ela corresponde à parcela do peso estático dianteiro que pode ser somado ao peso estático traseiro, em condição dinâmica, durante o desenvolvimento do esforço de tração. De acordo com Pranav & Pandey (2008), um fator considerável no desempenho em tração de um trator é a quantidade de carga dinâmica que atua sobre o eixo, ressaltando-se então a importância do uso adequado dos lastros e sua interação com a transferência de peso.

A transferência de peso é influenciada pela magnitude e inclinação da linha de tração realizada pelo trator. Sahay e Tewari (2004), realizaram uma simulação computacional para caracterizar a influência da inclinação, obtida pela alteração da altura de acoplamento do implemento, no desempenho em tração. Esses autores

concluíram que quanto mais baixo o ponto de acoplamento do implemento, maior a tração desenvolvida.

Atualmente, a instrumentação de tratores agrícolas permite a medição de parâmetros de desempenho sem que seja necessária a realização de alterações bruscas na conformação da máquina (SINGH e SINGH, 2011; YAHYA et al., 2009; PRANAV et al., 2010). A instrumentação oferece uma maior confiabilidade nos dados adquiridos, facilitando o processamento e análise. A aquisição de dados pode ser configurada de modo a fornecer o comportamento dos dados no domínio do tempo e, dessa maneira, diagnosticar e permitir um estudo mais acurado dos valores mensurados. De acordo com Russini (2009), o advento e a consolidação da computação e da eletrônica na agricultura ocorreram mediante a redução dos custos e da complexidade, garantindo que tais sistemas tenham resultado favorável na agricultura.

Sabe-se que o desempenho dos tratores em tração depende da estrutura do veículo, do tipo e características do rodado e da condição da camada superficial trafegada. Quando um trator desenvolve esforço de tração, parte do peso estático dianteiro é transferido e acrescido ao peso estático traseiro em condição dinâmica, sendo assim, infere-se que esse aumento de peso sobre os pneus traseiros do trator acarretam num acréscimo da pressão interna inicial, ajustada em condição estática. Do mesmo modo, infere-se que com a redução de peso no eixo dianteiro a pressão interna seja menor que a inicialmente estabelecida.

Objetivou-se com este trabalho avaliar a variação da pressão interna dos pneus de um trator agrícola 4 x 2 TDA em condição dinâmica de acordo com a força de tração aplicada na barra de tração.

2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido no Laboratório de Mecanização Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa – UFV, localizada no município de Viçosa, Minas Gerais.

No experimento foi utilizado um trator agrícola 4 x 2 TDA equipado com pneus diagonais, sendo analisada a variação da pressão interna dos pneus em função da força de tração desenvolvida pelo trator em operação. O experimento foi composto por quatro tratamentos, constituídos de quatro forças de tração, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Todos os tratamentos foram realizados em pista de concreto, com trinta metros de comprimento e três metros de largura, totalizando uma área experimental de noventa metros quadrados.

2.1. Tratores

Para a realização do trabalho, foi utilizado um trator John Deere® (Figura 1), modelo 5705 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e potência de 62,56 kW (85 cv) no motor a 2400 rpm, o qual recebeu a instrumentação necessária para a condução do trabalho e cujas principais especificações estão sumarizadas na Tabela 1.

Para atuar como lastro e fonte variação do esforço de tração do trator ensaiado foi utilizado um trator da marca Valtra-Valmet®, modelo 800, 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e potência de 58,88 kW (80 cv) no motor a 2400 rpm.



Figura 1. Trator John Deere® modelo 5705 utilizado no experimento.

Tabela 1. Especificações do trator John Deere 5705

Especificações	
Potência do motor na rotação nominal	63 kW
Potência da TDP na rotação nominal do motor	53 kW
Rotação de potência máxima	2400 rpm
Faixa de rotação com potência constante	2000 – 2400 rpm
Torque máximo	330 Nm
Rotação de torque máximo	1600 rpm
Número de cilindros do motor	4
Cilindrada	4500 cm ³
Aspiração	Turboalimentado
Relação peso/potência	498,29 kW N ⁻¹

FONTE: John Deere®.

Na realização do experimento o trator estava com lastros de ferro fundido e com 75% de água em todos os pneus, o que lhe conferiu a distribuição de peso apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Peso estático do trator

Eixo	Peso (kN)	Distribuição (%)	Peso/Potência (kN/kW)
Dianteiro	15,92	41,59	-
Traseiro	22,36	58,41	-
Total	38,28	100,00	0,61

2.2. Pneus utilizados

No experimento foi utilizado o modelo Pirelli® TM 95 18.4-30 no eixo traseiro e Goodyear® Dyna Torque II 12.4-24 no eixo dianteiro. Um resumo das especificações fornecidas pelos fabricantes está disposto na Tabela 3.

Tabela 3. Especificações nominais básicas sobre os pneus utilizados no experimento

Pneu	Banda de rodagem	Largura da seção	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro do aro (mm)	Carga máxima (Kg)	Nº de lonas
18.4 – 30	R1	0,4674	1551,9	760,0	2815	10
12.4 – 24	R1	0,3150	1163,3	609,6	1200	6

FONTE: Catálogo Goodyear® e Pirelli®.

Foi utilizada a pressão de 117,22 kPa (17 psi); sendo que os pneus do eixo dianteiro e traseiro receberam a mesma pressão na condução do experimento.

2.3. Força de tração

A variação da força aplicada na barra de tração foi obtida a partir da seleção das marchas do trator lastro, que durante a realização das parcelas permaneceu

com o motor desligado e engrenado com a marcha que fornecia força de tração utilizada em cada tratamento. Nessa condição, a resistência ao deslocamento do trator lastro é originária do sistema de transmissão e do torque de cada marcha selecionada para o tratamento.

Para uma mesma marcha do trator lastro, a força de tração observada apresentava uma variação ao longo das parcelas, sendo necessária a padronização da força para facilitar o tratamento dos dados. As forças de tração de padronizadas estão relacionadas na Tabela 4.

Tabela 4. Forças padronizadas utilizadas na condução do experimento

Tratamentos (Forças)	Força padrão (kN)	CV (%)
1	4,44	5,94
2	14,57	4,12
3	18,60	1,50
4	23,92	1,18

CV – Coeficiente de variação.

2.4. Velocidade operacional teórica

Em todos os tratamentos do experimento foi utilizada a marcha 1ª B do trator, que proporciona uma velocidade operacional teórica média de $1,48 \text{ m s}^{-1}$, com o motor na rotação de 2400 rpm.

2.5. Instrumentação do trator

Com objetivo de tornar a coleta de dados mais simples, rápida e confiável o trator recebeu um conjunto de transdutores para a avaliação dos parâmetros de interesse. Todos os transdutores foram conectados a um sistema de aquisição de dados, que por sua vez foi conectado a um computador que armazenou os dados para posterior processamento.

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados da marca Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), modelo Spider 8[®], gerenciado pelo software HBM Catman[®] 2.2 instalado em um computador portátil embarcado no trator, em uma estrutura construída especificamente para esse propósito. Os dados adquiridos pelo computador foram armazenados para posterior processamento.

Os transdutores utilizados foram previamente calibrados, de modo a se conhecer sua resposta elétrica em função do parâmetro não elétrico medido, o que permite a configuração do software da melhor forma possível.

O sistema foi configurado para obter informações de todos os transdutores utilizados com uma taxa de amostragem de 50 Hz, ou seja, 50 dados por segundo de deslocamento do trator ao longo da parcela. No final de cada parcela o sistema era interrompido e os dados gerados pelos transdutores eram salvos numa planilha eletrônica.

2.5.1. Força de tração (F)

A força necessária para tracionar o trator lastro foi monitorada por meio de uma célula de carga da marca Kratos[®], com capacidade máxima para 50 kN e com sinal de resposta de 306,63 N mV⁻¹.

A célula de carga foi acoplada ao trator por meio de uma estrutura conectada no local da barra de tração, conforme a Figura 2.



Figura 2. Célula de carga e estrutura suporte para a instalação no trator.

2.5.2. Pressão interna dos pneus (P)

A pressão interna dos pneus foi monitorada por meio de transdutores de pressão, adaptados em cada pneu do trator por meio de rotor cinemático. Foram utilizados transdutores de pressão da marca Sensata Technologies[®], modelo 100CP7-1 (Figura 3), para aplicações hidropneumáticas e com intervalo de leitura de 0 a 690 kPa, sensibilidade de 1,26 mV V⁻¹ kPa⁻¹ e precisão de 2%.



Figura 3. Sistema cinemático (A) que viabiliza mensurar a pressão interna do pneu em movimento. Detalhe do transdutor de pressão (B) utilizado nos testes.

2.6. Variação da pressão interna dos pneus em condição dinâmica

A variação da pressão interna dos pneus em condição dinâmica constituiu-se da diferença entre a pressão interna dos pneus em condição dinâmica e em condição estática. A pressão interna dos pneus em condição estática foi mensurada antes da realização de cada parcela e a dinâmica ao longo da mesma, situação em que o trator realizava a tração.

As pressões foram representadas pelo seu valor médio quadrático (Root Mean Square – RMS), sendo a variação da pressão interna dos pneus obtida pela Equação 1.

$$\Delta P_{RMS} = \left(\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N P_d^2 \right) \right)^{0,5} - \left(\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N P_e^2 \right) \right)^{0,5} \quad (1)$$

em que,

ΔP_{RMS} = Variação da pressão média quadrática (kPa);

N = Número de pontos amostrados (adm);

P_d = Pressão dinâmica instantânea pontual (kPa); e,

P_e = Pressão estática instantânea pontual (kPa).

No experimento foi monitorada a pressão interna de cada pneu do trator, sendo a análise realizada com base na variação média dos pneus do eixo dianteiro e do eixo traseiro, uma vez que a transferência de peso não se distribui equitativamente sobre cada pneu.

A variação da pressão média quadrática (ΔP_{RMS}) pode apresentar sinal negativo ou positivo, que indicam decréscimo e acréscimo de pressão interna dos pneus, respectivamente.

2.8. Execução do experimento

A pista utilizada no experimento possuía um comprimento de 30 metros e 10 metros adicionais para estabilizar o deslocamento do trator. A aquisição dos dados foi iniciada com o trator parado por 10 segundos, com a finalidade de obter a pressão interna dos pneus em condição estática, em seguida o conjunto formado pelo trator ensaiado e trator lastro, denominado comboio, percorria todo o comprimento da parcela experimental com o sistema de aquisição operando. Quando o comboio chegava ao final da parcela o sistema era pausado e os dados referentes aos parâmetros operacionais de interesse eram salvos em planilha eletrônica para posterior análise.

A tração dianteira auxiliar (TDA) foi mantida ligada em todos os tratamentos, com a finalidade de se obter a máxima tração possível do trator ensaiado.

2.9. Análise estatística dos dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise de regressão, sendo os modelos selecionados com base no coeficiente de determinação, no comportamento do fenômeno e na significância dos coeficientes de regressão com a utilização do teste t.

Para a realização dos procedimentos estatísticos citados anteriormente foi utilizado o programa computacional R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012).

3. Resultados e discussão

A Figura 4 foi plotada com base nos dados observados numa parcela experimental para exemplificar o comportamento da pressão interna de cada um dos pneus do trator em condição dinâmica no domínio do tempo. O intervalo de 0 a 10 segundos corresponde ao período em que o trator permaneceu parado para a mensuração da pressão interna dos pneus em condição estática, sendo o intervalo posterior correspondente ao período de deslocamento ao longo da parcela. Foi utilizada a força de tração de 23,92 kN pelo fato de ter sido a que apresentou as maiores variações.

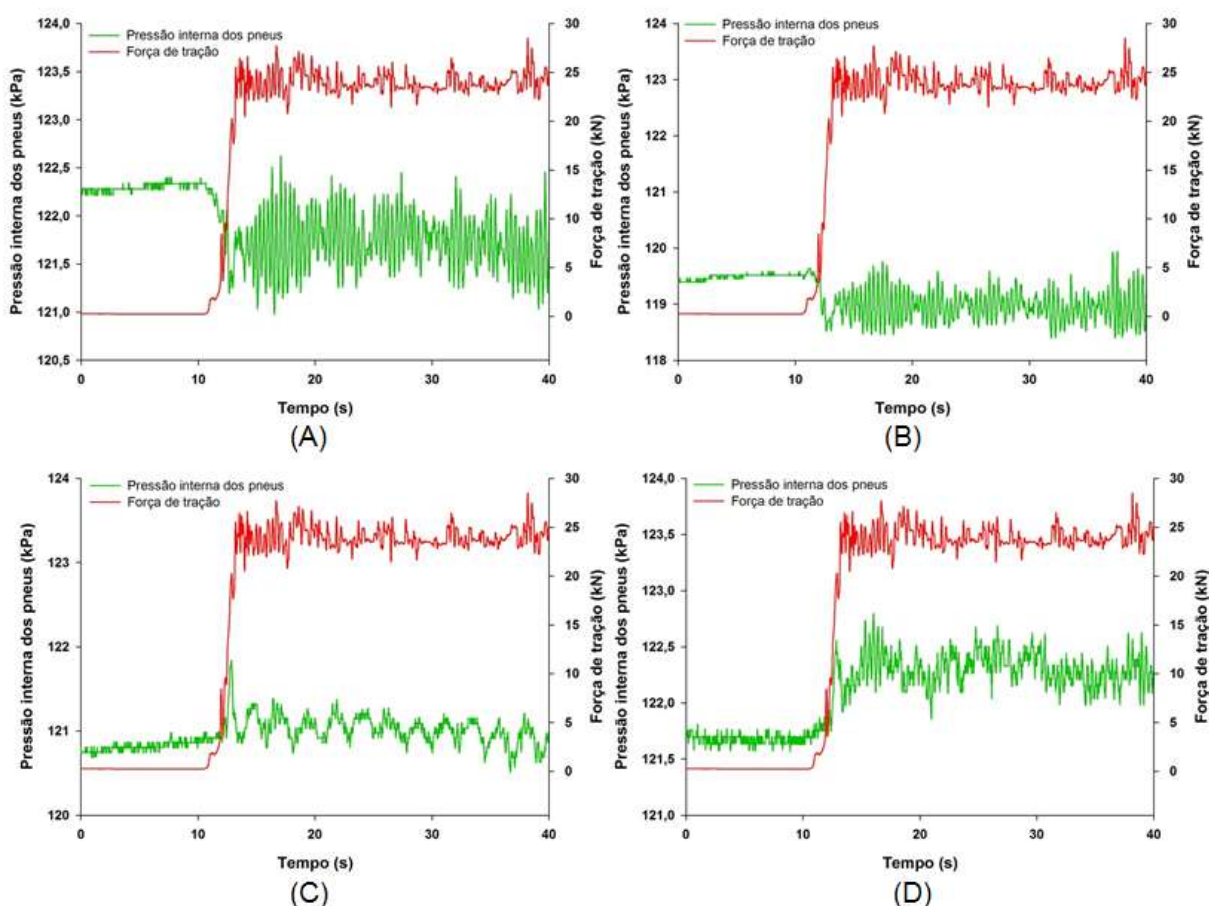


Figura 4. Variação da pressão interna do pneus dianteiro direito (A), dianteiro esquerdo (B), traseiro direito (C) e traseiro esquerdo (D), em condição dinâmica para a força de tração de 23,92 kN.

Nota-se que ocorreu uma variação da pressão interna dos pneus quando o trator iniciou o desenvolvimento da força de tração, sendo que para os pneus do eixo traseiro e dianteiro verificou-se um acréscimo e decréscimo, respectivamente, da pressão em relação à condição estática.

Quando o trator desenvolveu esforço de tração ocorreu a transferência de peso do eixo dianteiro para o traseiro, o que resulta no acréscimo e no decréscimo

de peso sobre os pneus traseiros e dianteiros, respectivamente. O acréscimo de peso sobre o eixo traseiro, decorrente da transferência de peso, culminou na elevação da pressão interna dos respectivos pneus e concomitantemente ocorreu a redução da pressão interna dos pneus dianteiros devido a redução do peso atuando sobre cada um.

De acordo com Goering et al. (2003), o produto da área de contato do pneu com o solo e da pressão média exercida nessa região deve ser igual a carga vertical aplicada sobre o eixo que suporta o pneu. Dessa forma, para uma pressão interna dos pneus constante o aumento do peso aplicado sobre o eixo resultaria numa deformação do pneu, que teria por finalidade manter a pressão constante.

Pelos resultados obtidos no experimento pode-se deduzir que as características construtivas dos pneus utilizados não propiciaram deformações suficientes para absorver as variações de peso sobre o eixo e manter dessa forma a pressão interna constante.

Os modelos ajustados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Equações de regressão ajustadas para a variação média quadrática da pressão interna dos pneus do trator (ΔP_{RMS} , em kPa) em função da força de tração desenvolvida e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), para os pneus dianteiros e traseiros

Pneus	Equação ajustada	R^2
Dianteiro	$\Delta P_{RMS} = -0,3603^{**} - 0,0205^{**} F$	0,7233
Traseiro	$\Delta P_{RMS} = 0,1894^{**} + 0,0183^{**} F$	0,6933

** - Significativo ao nível de 1% pelo teste t.

Na Figura 5 estão apresentadas as variações médias quadráticas da pressão interna observadas para pneus dianteiros e traseiros, com as respectivas retas ajustadas para cada um.

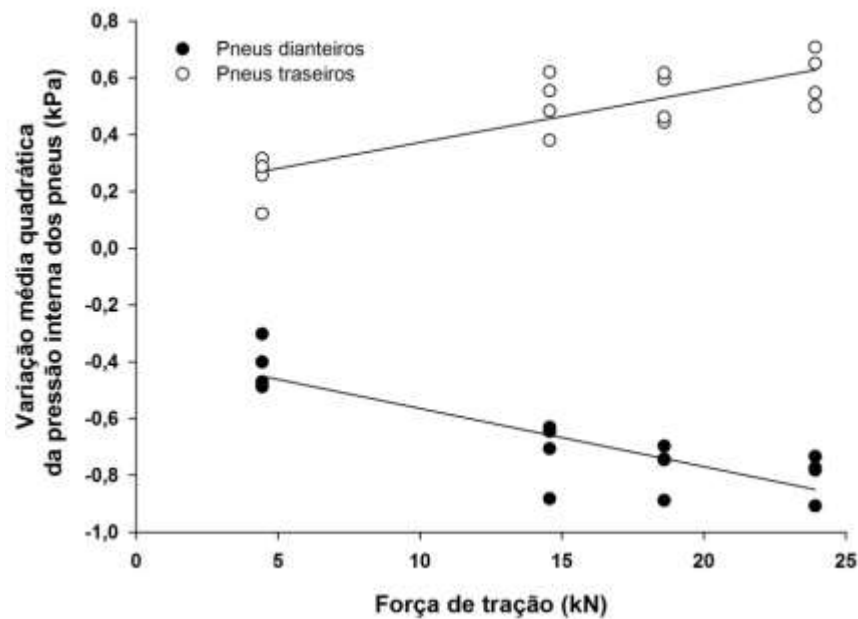


Figura 5. Variação média quadrática da pressão interna dos pneus dianteiros e traseiros em função da força de tração.

A variável força de tração apresentou efeito linear na variação média quadrática da pressão interna dos pneus dianteiros e traseiros, sendo o efeito positivo para os pneus traseiros e negativos para o dianteiro.

O aumento da força de tração de 4,44 para 23,92 kN proporcionou um acréscimo de 0,36 kPa na pressão média quadrática dos pneus traseiros e um decréscimo de 0,40 kPa nos pneus dianteiros.

4. Conclusões

Nas condições em que o trabalho foi conduzido pode-se concluir que:

- A pressão interna dos pneus alterou-se em condição dinâmica.
- A pressão interna média dos pneus dianteiros reduziu em função do aumento da força de tração.
- A pressão interna média dos pneus traseiros aumentou em função do aumento da força de tração.
- É possível estimar a força de tração com base na variação da pressão interna dos pneus.

5. Referências bibliográficas

ASAE. **ASAE Standards**. General terminology for traction of agricultural traction and transport devices and vehicles. St. Joseph, Michigan: ASABE. S296.5 2003.

BARBOSA, J. A.; VIEIRA, L. B.; DIAS, G. P.; DIAS JÚNIOR, M. D. S. Desempenho operacional de um trator agrícola equipado alternadamente com pneus radiais e diagonais. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 474-480, 2005. ISSN 0100-6916.

GARCIANO, L. O.; UPADHYAYA, S. K.; JONES, R. A. Measurement of soil parameters useful in predicting tractive ability of off-road vehicles using an instrumented portable device. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 5, p. 295-305, 2010. ISSN 0022-4898.

GOERING, C.E., STONE, M.L.; SMITH, D.W.; TURNQUIST, P.K. **Off-Road Vehicle Engineering Principles**. ASAE, St. Joseph, Mich., 2003.

KATHIRVEL, K.; MANIAN, R.; BALASUBRAMANIAN, M. Tractive Performance of Power Tiller Tyres. **Agric Mech Asia Afr Lat Am**, v. 32, n. 2, p. 32-36, 2001. ISSN 0084-5841.

LILJEDAHN, J.B.; CARLETON, W.M.; TURNQUIST, P.K.; SMITH, D.W. Traction. In: _____. *Traction and their power units*. Connecticut: Avi Publish Company, n.2, 1995. p.219-26.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: EPUEDUSP, 1980. 345 p.

PRANAV, P. K.; PANDEY, K. P. Computer simulation of ballast management for agricultural tractors. **Journal of Terramechanics**, v. 45, n. 6, p. 185-192, 2008. ISSN 0022-4898.

PRANAV, P. K.; PANDEY, K. P.; TEWARI, V. K. Digital wheel slipmeter for agricultural 2WD tractors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 73, n. 2, p. 188-193, 2010. ISSN 0168-1699.

RUSSINI, A. **Projeto, construção e teste de instrumentação eletrônica para avaliação do desempenho de tratores agrícolas**. 2009. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Centro de Ciência Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. 2012. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

SAHAY, C. S.; TEWARI, V. K. Computer Simulation of Tractor Single-point Drawbar Performance. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 4, p. 419-428, 2004. ISSN 1537-5110.

SHELL, L. R., F. ZOZ, and R. J. TURNER. 1997. Field performance of rubber belt and MFWD tractors in Texas soils. In *Belt and Tire Traction in Agricultural Vehicles*, 65–73. SAE SP–1291. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers.

SINGH, C. D.; SINGH, R. C. Computerized instrumentation system for monitoring the tractor performance in the field. **Journal of Terramechanics**, v. 48, n. 5, p. 333-338, 2011. ISSN 0022-4898.

TURNER, R., L.R. SHELL and F.M. ZOZ.1997. Field Performance of Rubber Belt and MFWD Tractors in Southern Alberta Soils, SAE Paper 972730. SAE.

YAHYA, A.; ZOHADIE, M.; KHEIRALLA, A. F.; GIEW, S. K.; BOON, N. E. Mapping system for tractor-implement performance. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 69, n. 1, p. 2-11, 2009. ISSN 0168-1699.

ZOZ, F.; GRISSO, R.D. *Traction and tractor performance*. St Joseph: ASAE. 2003. 46 p.