

PEDRO RENATO PEREIRA BARROS

**SIMULAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRAÇÃO DE UM TRATOR 4x2 COM
TRAÇÃO DIANTEIRA AUXILIAR EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE
SUPERFÍCIE**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

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

T

B277s
2012

Barros, Pedro Renato Pereira, 1969-
Simulação da capacidade de tração de um trator 4x2 com
tração dianteira auxiliar em diferentes condições de
superfície / Pedro Renato Pereira Barros. – Viçosa, MG,
2012.
x, 78f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 54-57

1. Máquinas agrícolas - Tração. 2. Tratores.
3. Desempenho. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 631.372

PEDRO RENATO PEREIRA BARROS

**SIMULAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRAÇÃO DE UM TRATOR 4x2 COM
TRAÇÃO DIANTEIRA AUXILIAR EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE
SUPERFÍCIE**

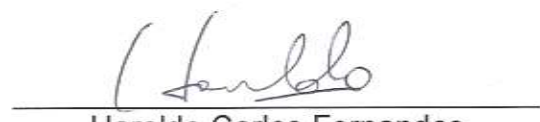
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

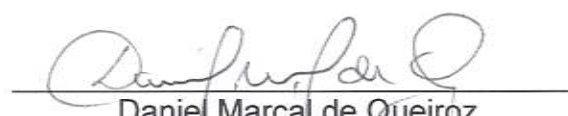
APROVADA: 05 de julho de 2012.


Rogério Amaro Gonçalves


Edney Leandro da Vitória


Fábio Lúcio Santos


Haroldo Carlos Fernandes
(Coorientador)


Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

À minha esposa Heloísa.
Aos meus filhos, Pedro Henrique e Luís Gustavo.
Aos meus pais, Osvaldo e Maria.
Aos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), pela dedicação, pelo respeito e pela colaboração.

Ao Diretor Geral do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus Bambuí*, Flávio Vasconcelos Godinho, pela oportunidade e pelo incentivo.

À CAPES, pelo auxílio financeiro, por meio da bolsa de pesquisa.

Ao professor Daniel Marçal de Queiroz, pela orientação, pelo incentivo e pelos ensinamentos e conselhos.

Aos professores Haroldo Carlos Fernandes, Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Paulo Roberto Cecon, Fábio Lúcio Santos, Mauri Martins Teixeira, pelos conselhos e pela colaboração durante o trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Mecanização Agrícola, Geraldo e Wantuil, e, em especial, Marcelo e Danilo.

Aos colegas da Pós-Graduação em Mecanização Agrícola (UFV), Hener Coelho, Flávio, Élcio (Lalá), Wagner, Cleiton, Robson, Amanda, Graça, Gustavo, Frederico e, em especial, a Daniel Mariano, Marconi, Welton e Geice Villibor.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1. Pneus agrícolas para tratores e suas características	3
2.2. Razão de redução de percurso	7
2.3. Capacidade de tração do trator	8
2.4. Metodologia para validação de modelos matemáticos	15
2.5. Modelagem matemática da capacidade de tração de tratores agrícolas	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1. Experimentos realizados em superfícies planas e rígidas	26
3.2. Experimentos realizados em superfícies inclinadas	28
3.3. Modelagem da capacidade de tração do trator	28
3.3.1. Algoritmo de implementação do modelo para cálculo da capacidade de tração de um trator 4x2 TDA	36
3.3.2. Verificação e validação do modelo matemático implementado	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICES	58
APÊNDICE A - PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, SUPERFÍCIE ASFALTADA COM TDA LIGADA	59
APÊNDICE B - SIMBOLOGIA UTILIZADA NO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR	60
APÊNDICE C - VALORES CALCULADOS PELO PROGRAMA DE DESEMPENHO DE TRATOR, SUPERFÍCIE ASFALTADA COM TDA LIGADA	61
APÊNDICE D - PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, SUPERFÍCIE ASFALTADA COM TDA DESLIGADA	62
APÊNDICE E - VALORES CALCULADOS PELO PROGRAMA DE DESEMPENHO DE TRATOR, SUPERFÍCIE ASFALTADA COM TDA DESLIGADA	63

APÊNDICE F - PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, ESTRADA DE TERRA COM TDA LIGADA.....	64
APÊNDICE G - VALORES CALCULADOS PELO PROGRAMA DE DESEMPENHO DE TRATOR, ESTRADA DE TERRA COM TDA LIGADA	65
APÊNDICE H - PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, ESTRADA DE TERRA COM TDA DESLIGADA	66
APÊNDICE I - VALORES CALCULADOS PELO PROGRAMA DE DESEMPENHO DE TRATOR, ESTRADA DE TERRA COM TDA DESLIGADA.....	67
APÊNDICE J - PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, ESTRADA DE TERRA COM GRAMA TDA LIGADA.....	68
APÊNDICE K - VALORES CALCULADOS PELO PROGRAMA DE DESEMPENHO DE TRATOR, ESTRADA DE TERRA COM GRAMA TDA LIGADA.....	69
APÊNDICE L - PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, ESTRADA DE TERRA COM GRAMA TDA DESLIGADA	70
APÊNDICE M - VALORES CALCULADOS PELO PROGRAMA DE DESEMPENHO DE TRATOR, ESTRADA DE TERRA COM GRAMA TDA DESLIGADA.....	71
APÊNDICE N - PARTE DOS DADOS COLETADOS PELO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (<i>SPIDER8</i>) E PROCESSADO PELO PROGRAMA CATMAN, TESTE REALIZADO EM SUPERFÍCIE DE ALFALTO, SEM CARGA NA BARRA DE TRAÇÃO E TRATOR COM TDA DESLIGADA.....	72
APÊNDICE O - PARTE DOS DADOS COLETADOS PELO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (<i>SPIDER8</i>) E PROCESSADO PELO PROGRAMA CATMAN, TESTE REALIZADO EM ESTRADA DE TERRA, COM CARGA NA BARRA DE TRAÇÃO E TDA LIGADA	73
APÊNDICE P - GRÁFICOS GERADOS PELO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE TRATOR.....	74
APÊNDICE Q - DETERMINAÇÃO DO CENTRO DE GRAVIDADE (CG) DO TRATOR	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características do trator utilizado nos testes	21
Quadro 2 - Distribuição de peso nos testes realizados em relação à condição de lastragem	21
Quadro 3 - Características dos pneus diagonais utilizados nos testes	21
Quadro 4 - Valores da razão de redução de percurso das rodas dianteiras (s_f), traseiras (s_r) e velocidade de deslocamento do trator (v_a) em função da força aplicada na barra de tração. Os experimentos foram realizados em diferentes superfícies e com a tração dianteira auxiliar ligada.....	42
Quadro 5 - Valores da razão de redução de percurso das rodas traseiras (s_r) e velocidade de deslocamento (v_a) em função da força aplicada na barra de tração. Os experimentos foram realizados em diferentes superfícies e com a tração dianteira auxiliar desligada.....	45
Quadro 6 - Valores de razão de redução de percurso das rodas dianteiras (s_f), traseiras (s_r), velocidade de deslocamento do trator (v_a) e rotação do motor, em superfícies inclinadas - trator com tração dianteira auxiliar ligada e sem aplicação de força na barra de tração.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da deflexão de pneu produzida a partir da aplicação de carga.....	5
Figura 2 - Esquema das características de pneu sob carga que define a relação de aspecto.....	6
Figura 3 - Forças e torques atuantes em uma roda e solo deformáveis.	10
Figura 4 - Trator John Deere modelo 5705, equipado com pneus diagonais nos eixos dianteiros e traseiros.	20
Figura 9 - Transdutor de proximidade para medição da rotação da TDP e do motor.....	26
Figura 11 - Diagrama de forças atuantes num trator 4x2 com tração dianteira auxiliar.....	29
Figura 12 - Caracterização das dimensões do trator utilizadas no modelo matemático.....	29
Figura 13 - Comparação entre os valores calculados e os experimentais de razão de redução de percurso nos testes de tração realizados com a tração dianteira ligada.....	42
Figura 14 - Comparação entre os valores calculados e os experimentais de velocidade de deslocamento nos testes de tração realizados com a tração dianteira ligada.....	44
Figura 15 - Comparação entre os valores calculados e os experimentais de razão de redução de percurso nos testes de tração realizados com a tração dianteira desligada.....	46
Figura 16 - Comparação entre os valores simulados e os experimentais de velocidade de deslocamento nos testes de tração realizados com a tração dianteira desligada.....	47
Figura 17 - Comparação entre os valores calculados e os experimentais de velocidade de deslocamento nos testes de tração realizados com a tração dianteira ligada, sem força aplicada na barra de tração e deslocamento em subida de rampa.	49
Figura 18 - Comparação entre os valores calculados e os experimentais de rotação do motor nos testes de tração realizados com a tração dianteira ligada, sem força aplicada na barra de tração e deslocamento em subida de rampa.	49
Figura 1P - Gráfico da força de tração x razão de redução de percurso das rodas dianteiras para solo rígido e trator com TDA ligada.....	74

Figura 2P - Gráfico da força de tração x razão de redução de percurso das rodas traseiras para solo rígido e trator com TDA ligada.....	74
Figura 3P - Gráfico da eficiência de produção de tração x razão de redução de percurso das rodas dianteiras para solo rígido e TDA ligada.....	75
Figura 4P - Gráfico da eficiência de produção de tração x razão de redução de percurso das rodas traseiras para solo rígido e TDA ligada.....	75
Figura 5P - Gráfico da velocidade de deslocamento x força de tração solo rígido e TDA ligada.....	76
Figura 1Q - Dimensões básicas do trator para determinação do centro de gravidade	77
Figura 2Q - Inclinação do trator para determinação do centro de gravidade.....	78

RESUMO

BARROS, Pedro Renato Pereira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2012. **Simulação da capacidade de tração de um trator 4x2 com tração dianteira auxiliar em diferentes condições de superfície.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Haroldo Carlos Fernandes, Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Paulo Roberto Cecon.

A modelagem matemática tem sido utilizada com grande frequência para prever o desempenho de máquinas agrícolas. É possível, através destes modelos, desenvolver programas computacionais capazes de simular o desempenho de tratores e assim determinar as melhores condições de uso, com menor custo e maior produtividade. O objetivo deste trabalho foi verificar e validar um modelo matemático e computacional desenvolvido para determinar a capacidade de tração de um trator agrícola, em diferentes condições de solo e de carga na barra de tração. Para efetivação dos experimentos de campo, utilizou-se um trator com tração dianteira auxiliar (TDA), equipado com pneus diagonais em diferentes tipos de superfícies. O trator foi instrumentado para obtenção de dados experimentais, tais como: razão de redução de percurso das rodas dianteiras e traseiras, velocidade de deslocamento do trator e rotação do motor. Estes dados foram comparados com os simulados pelo programa objetivando avaliar a coerência e compatibilidade entre eles. Os resultados mostraram que o programa se aplica de maneira satisfatória na determinação da capacidade de tração do trator. Para todos os testes realizados, o índice de correlação entre os valores simulados e observados ficou acima de 94%, e o desvio relativo para 49% dos testes ficou abaixo de 10%. Estes resultados indicam que o programa de simulação pode ser usado como ferramenta para prever o desempenho de trator agrícola, orientando agricultores e fabricantes quanto às condições para melhor desempenho.

ABSTRACT

BARROS, Pedro Renato Pereira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2012. **Simulation of the traction capacity of a two-wheel drive with front wheel assist tractor in different conditions of surface.** Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Co-adviser: Haroldo Carlos Fernandes, Francisco de Assis de Carvalho Pinto and Paulo Roberto Cecon.

Mathematical modeling has been used often to predict the performance of agricultural machinery. It is possible through models to simulate the performance of tractors and determine the best conditions of use, reducing cost and increasing productivity. The objective of this study was to verify and validate a mathematical model to determine the traction capacity of a tractor in different soil conditions and load on the drawbar. Field tests were performed using a tractor with front wheel assist (TDA), equipped with bias tires on different surfaces. The tractor was instrumented to obtain experimental data, such as: travel reduction rate of the front and rear wheels, travel speed of the tractor and engine speed. These data were compared with those simulated by the implemented model to evaluate the consistency and compatibility between them. The results showed that the model simulates satisfactorily traction capacity of the tractor. For all tests the correlation between simulated and observed values was above 94%, the relative deviation of the 49% of the tests was below 10%. These results indicate that the simulation model can be used as a tool to predict the performance of agricultural tractor, helping farmers and manufacturers to find the best working conditions of a tractor.

1. INTRODUÇÃO

A mecanização agrícola teve e continua tendo um papel importante na evolução da humanidade. Os principais benefícios da utilização da mecanização agrícola são: o aumento da produtividade por trabalhador agrícola; a mudança da característica do trabalho rural, tornando o trabalho menos árduo e mais atrativo; a melhoria da qualidade das operações de campo, modificando as condições de solo para facilitar a germinação das sementes e o crescimento das plantas. Além disso, a mecanização agrícola vem permitindo a redução dos custos de produção, tornando a produção de alimentos mais barata.

O trator agrícola pode ser considerado a principal máquina utilizada nos sistemas mecanizados de produção agrícola, pois este é utilizado como fonte de potência para a tração e de acionamento de diversos implementos e máquinas utilizadas na agricultura. Dessa forma, trabalhos que visem à otimização do desempenho e da eficiência do trator contribuem de forma significativa para o aprimoramento dos meios de produção no campo.

Diversos fatores afetam o desempenho de um trator agrícola, entre eles o tipo de superfície, os lastros adicionados ao trator, o tipo de pneu utilizado e a velocidade de deslocamento (GABRIEL FILHO et al., 2004; MONTEIRO et al., 2008). Estes fatores sozinhos ou combinados determinam características operacionais importantes, tais como a razão de redução de percurso (patinagem) das rodas, a eficiência de tração, o consumo de combustível, entre outros. Conhecer estas características permite aos usuários e pesquisadores analisar e avaliar situações de desempenho do trator para melhor adequá-lo ao trabalho.

O desempenho de um trator é fator determinante na capacidade produtiva no campo e pode ser medido principalmente pela sua capacidade operacional. Nesse sentido, conhecer e entender como ocorre o aproveitamento de potência pela barra de tração, pela tomada de potência (TDP) e pelo sistema hidráulico pode possibilitar o estabelecimento de critérios e a tomada de decisão visando à realização do trabalho em campo com maior eficiência e gastos menores.

Na busca pelo conhecimento do melhor desempenho possível dos tratores nas diversas situações de trabalho, pesquisadores têm utilizado modelos matemáticos para descrever o comportamento operacional de máquinas agrícolas em campo, com o objetivo de caracterizar de maneira mais precisa a interação entre rodados e solo e, conseqüentemente, a eficiência de tração do trator e seu desempenho. Com os avanços observados na engenharia, principalmente com relação aos recursos computacionais, modelos matemáticos podem ser desenvolvidos, tornando possível realizar simulações do desempenho do trator de maneira rápida e segura, com resultados próximos do real e com custo reduzido, na maioria dos casos.

Determinar o desempenho de um trator ou conjunto mecanizado por meio de modelos matemáticos é um avanço importante na agricultura, pois pode possibilitar ao usuário de máquinas agrícolas escolher a melhor opção de trabalho e indicar aos fabricantes modificações no sentido de melhorar o desempenho do trator (SANTOS, 2010).

Objetivou-se, com este trabalho, desenvolver um modelo matemático para determinar o desempenho operacional de um trator agrícola, em diferentes condições de solo. Para isso, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo matemático para simular a capacidade de tração em tratores;
- Realizar testes experimentais de tração utilizando um trator 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e equipado com pneus diagonais;
- Validar o modelo matemático implementado, comparando os resultados simulados com os resultados experimentais obtidos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Pneus agrícolas para tratores e suas características

Os pneus constituem um dos principais componentes dos maquinários agrícolas, pois influenciam de maneira direta o equilíbrio, o movimento e o desempenho de tração e operacional do trator. Ao longo dos anos, os pneus sofreram modificações no sentido de melhorar cada vez mais o desempenho geral de tratores e implementos agrícolas, sendo constantemente, nos dias atuais, objeto de pesquisa por parte da comunidade acadêmica e dos fabricantes.

Comparando-se com os rodados metálicos, Márques (2008) afirma que os rodados pneumáticos, ao se deformarem, adaptam-se melhor às irregularidades do terreno, aumentando a capacidade trativa e a comodidade para o operador. A diminuição da lastragem, substituída por cargas dinâmicas induzidas por transferência de peso, melhora ainda mais o desempenho das rodas no solo, convertendo-as em verdadeiros pontos de apoio. O tamanho, as características técnicas, a pressão de insuflação, dentre outras características, determinam o comportamento e a durabilidade dos rodados.

Pesquisas mostram que cerca de 20 a 55% da energia disponível de um trator é desperdiçada na interface pneu-solo, provocando desgaste dos pneus e compactação do solo (AL-HAMED et al., 1994). Segundo estes autores, o pneu permite que o torque de um trator seja transmitido ao solo e capacita-o para tracionar uma determinada carga, além de mover-se. Afirmam, ainda, que as características de tração de um pneu dependem de sua geometria (largura, diâmetro, altura da seção), do tipo de pneu (diagonal, radial), do tipo das garras, da pressão de insuflação, da carga dinâmica no eixo e do tipo e condições do solo.

Furlani e Silva (2006) descrevem os rodados pneumáticos como sendo constituídos de cubo de roda, aro e pneus. Os pneus, por sua vez, se caracterizam por lonas, talões, parede lateral, liner e banda de rodagem. Segundo estes autores, as lonas têm a função de suportar a carga e a pressão internas do pneu; os talões fazem a amarração do pneu no aro, devendo apresentar alta resistência à ruptura; e a banda de rodagem é a parte do pneu

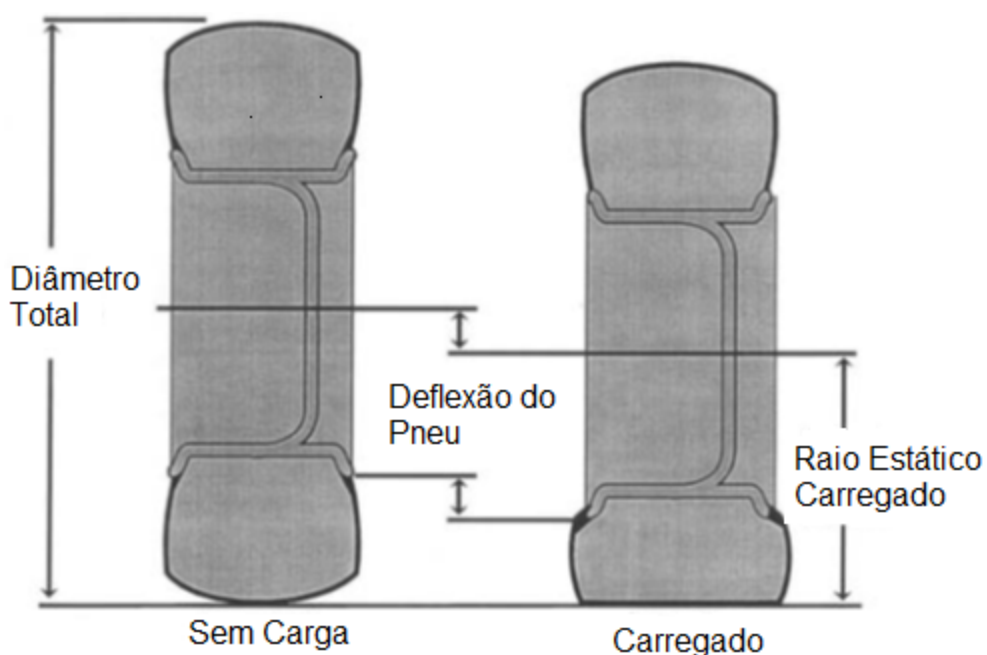
que faz sua aderência com o solo. Suas formas devem proporcionar frenagem e tração, e seu composto de borracha deve resistir à abrasão e ruptura.

Os pneus podem ser classificados como sendo de tração, direcionais e de transporte, conforme explicam Furlani e Silva (2006). De acordo com a carcaça, podem ser diferenciados entre diagonais e radiais. Os pneus diagonais apresentam lonas dispostas diagonalmente ao plano médio da banda de rodagem; as camadas se cruzam em ângulos menores que 90°, favorecendo a rigidez dos flancos e da banda de rodagem. Os pneus radiais apresentam lonas dispostas de talão a talão, em ângulos de 90° com o plano médio da banda de rodagem, permitindo que os flancos e a banda de rodagem sejam mais flexíveis.

Devido à importância que exercem nas grandezas que caracterizam o desempenho de um trator, os pneus são levados em consideração nas equações que procuram prever o desempenho de máquinas agrícolas. Conhecer suas dimensões em determinadas situações, juntamente com as características do solo e da máquina, permite estabelecer relações que são a base das teorias de predição de desempenho de máquinas agrícolas. As principais características dos pneus agrícolas, definidas pela Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas e Biológicos – ASABE (2009), são apresentadas abaixo e também pelas Figuras 1 e 2.

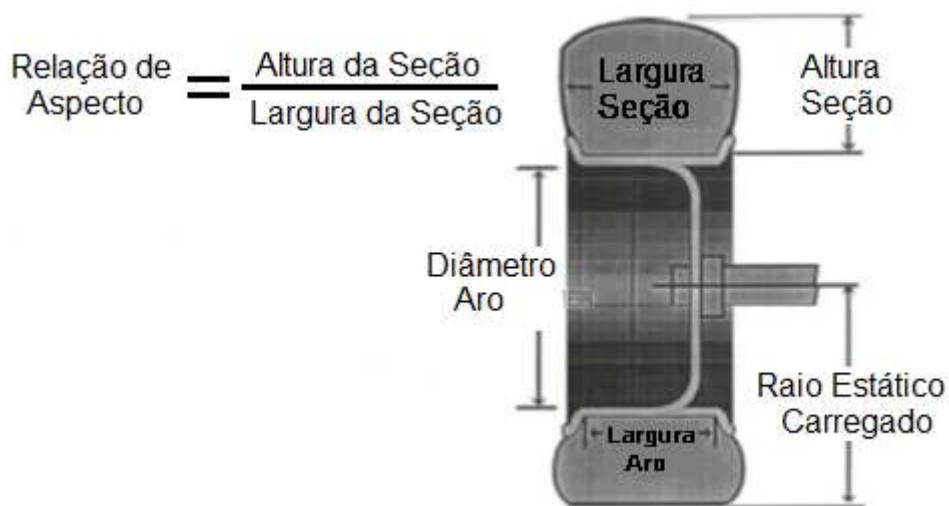
- Relação de aspecto: relação entre a altura e a largura da seção do pneu;
- Deflexão do pneu: diferença entre as alturas da seção do pneu, estando descarregado e carregado, para uma determinada carga e pressão de insuflação;
- Pressão de insuflação: para pneus cheios de ar, é a pressão manométrica medida com a válvula em qualquer posição. Para os pneus contendo líquido, é a pressão manométrica medida com um medidor de ar-água e com a válvula na parte inferior do pneu;
- Diâmetro total: circunferência do pneu dividido por π . A circunferência é medida 24 horas após o pneu ter sido insuflado e montado em aro recomendado, insuflado à pressão de insuflação nominal máxima, em uma condição descarregada;

- Diâmetro do aro: diâmetro nominal na intersecção do assento dos talões à parte vertical do flange do aro;
- Circunferência de rolamento: distância percorrida por volta da roda, sob a condição zero especificada;
- Raio de rolamento: distância percorrida por volta da roda dividida por 2π , sob a condição zero especificada;
- Altura da seção: distância a partir do diâmetro do aro até o ponto de raio máximo, na face das garras. Considerando-se um pneu novo e inflado há pelo menos 24 horas;
- Largura da seção: largura não defletida de um pneu novo, incluindo o crescimento normal causado pela insuflação após um período de espera de 24 horas, incluindo paredes laterais normais;
- Raio estático carregado: distância do centro do eixo do rodado à superfície de contato, pneu montado em aro aprovado e com carga e pressão recomendadas, medida realizada 24 horas após ter sido o pneu insuflado.



Fonte: Adaptado de Brodbeck (2004).

Figura 1 - Esquema da deflexão de pneu produzida a partir da aplicação de carga.



Fonte: Adaptado de Brodbeck (2004).

Figura 2 - Esquema das características de pneu sob carga que define a relação de aspecto.

Quatro métodos, segundo a ASABE (2009), podem ser utilizados para determinação da condição específica zero.

- Uma roda autopropelida produzindo uma força de tração igual a zero deslocando sobre uma superfície sem deformação (rígida);
- Uma roda autopropelida produzindo uma força de tração igual a zero deslocando sobre uma superfície de teste;
- Uma roda puxada (tração bruta igual a zero, isto é, torque aplicado a seu eixo igual a zero) deslocando sobre uma superfície rígida;
- Uma roda puxada (tração bruta igual a zero, isto é, torque aplicado a seu eixo igual a zero) deslocando sobre uma superfície de teste.

Com objetivo de comparar o desempenho operacional de um trator agrícola, equipado alternadamente com pneus radiais e diagonais, Barbosa et al. (2005) avaliaram, a partir das análises de parâmetros indicadores do desempenho dos referidos pneus sob condições específicas de trabalho, que o uso de pneus radiais proporcionou incrementos nos valores de capacidade de tração e potência na barra, diminuição nos valores de consumo específico de combustível e não causou variações no consumo horário de combustível.

Jesuíno (2007), em trabalho que comparou o desempenho de um trator equipado com pneus diagonais novos e pneus diagonais desgastados, em três

condições de superfície (pista com solo mobilizado, pista com cobertura vegetal e pista com solo firme), verificou que tanto as condições dos pneus quanto as condições do solo interferiram na capacidade do trator em desenvolver força de tração. O pior desempenho foi obtido na pista com solo mobilizado, e o melhor, em pista com solo firme.

O efeito da pressão de insuflação dos pneus nos parâmetros de desempenho do conjunto trator-grade de discos foi avaliado por Serrano (2008). Para diferentes pressões e condições de campo, concluiu-se que a utilização de elevadas pressões de insuflação dos pneus conduz a uma redução da ordem de 3 a 5% na capacidade de trabalho e um aumento significativo entre 10 e 25% do consumo de combustível por hectare, mesmo em condições de boa aderência dos pneus, refletidas no intervalo de 7 a 15% de razão de redução de percurso registrados.

2.2. Razão de redução de percurso

O termo “razão de redução de percurso” equivale ao que normalmente se denomina patinagem ou deslizamento. A primeira nomenclatura parece ser mais conveniente, pois este fenômeno não diz respeito somente ao deslizamento dos rodados, como sugere o termo patinagem. Como observado em Zoz e Grisso (2003), o deslizamento das rodas em relação à superfície de contato depende também da deformação das rodas e do cisalhamento do solo.

Assim como as características dos pneus e sua relação com o solo são fundamentais para se determinar o desempenho de um trator, conhecer, avaliar e dimensionar a razão de redução de percurso é essencial para se conseguir um melhor rendimento de tração.

Neujahr e Schlosser (2001) observaram, em trabalho que avaliou o comportamento de pneus radiais e diagonais em relação à tração, que a razão de redução de percurso das rodas foi sempre maior com o uso de pneus diagonais do que com o uso de pneus radiais, para mesmos níveis de carga e condição de solo.

Gabriel Filho et al. (2004) afirmam que a eficiência de um trator para desenvolver esforço tratório depende da interação entre o rodado e o solo. Em pesquisa que avaliou o desempenho de um trator em diferentes tipos de

cobertura, concluiu-se que o tipo de cobertura pode causar mudanças na razão de redução de percurso e, conseqüentemente, na capacidade do trator de desenvolver tração.

2.3. Capacidade de tração do trator

O motor de combustão interna dos tratores é capaz de transformar energia química de combustíveis em energia mecânica, produzindo forças e torques que são transmitidos aos rodados motrizes. Estes, por sua vez, interagem com o solo, possibilitando o movimento do trator e a produção de força de tração.

A interação entre rodado e solo determina as condições de tração do trator, portanto, as características do pneu e da superfície de contato são fatores essenciais quando se deseja estudar a força de tração desenvolvida por máquinas agrícolas. Esta interação, segundo Gabriel Filho et al. (2010), é influenciada pela potência nominal do motor, pelos mecanismos de transmissão, pela distribuição de peso sobre os rodados, pela altura e posição dos engates da barra de tração.

A força de tração pode ser definida como a força paralela ao deslocamento produzida pelo trator em sua barra de tração (força de tração líquida) e na interação entre o dispositivo de tração e a superfície de contato (força de tração bruta), conforme especificado pela ASABE (2009).

Gabriel Filho et al. (2010) avaliaram a capacidade de um trator para desenvolver força de tração ao tracionar uma carga de 25 kN em diferentes velocidades de deslocamentos e superfícies de solo, e confirmaram a dependência da capacidade de tração em relação à superfície. Verificaram que, em solo firme e sem cobertura vegetal, o desempenho do trator foi melhor, seguido pelo resultado do solo com superfície coberta com palha de milho e braquiária e, por último, o solo com a superfície mobilizada, em relação às marchas utilizadas. Constataram que o melhor desempenho do trator sempre aconteceu na velocidade de deslocamento próxima de 6 kmh^{-1} , nas condições em que o experimento foi realizado.

Avaliando o desempenho operacional de um trator agrícola, em área com diferentes tipos de cobertura vegetal, Gabriel Filho et al. (2004) concluíram

que a maior quantidade de matéria seca na superfície do solo tende a aumentar a razão de redução de percurso, diminuindo, conseqüentemente, a eficiência de tração.

Em estudo que avaliou o desempenho de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho, Lopes et al. (2005) afirmam que a pressão de insuflação influencia de maneira significativa o desempenho dos tratores agrícolas, modificando a velocidade de deslocamento do trator, a razão de redução de percurso e a potência na barra de tração. Concluíram, ainda, que a combinação correta entre pressão de insuflação e carga sobre os rodados pode favorecer o desenvolvimento de maiores velocidades de deslocamentos e menores índices de razão de redução de percurso.

Para o estudo das forças e torques que agem em uma roda de tração em solos deformáveis, tomou-se como referência o esquema de Zoz e Grisso (2003), conforme Figura 3. Para estes autores, cinco grupos adimensionais são usados para descrever o desempenho de um trator, conforme apresentado a seguir.

1. **Razão de redução de percurso (s)** que Zoz e Grisso (2003) descrevem em termos da velocidade como sendo a razão entre a diferença da velocidade teórica (v_t) e a velocidade real (v_a) do dispositivo de tração e a velocidade teórica (v_t), conforme Equação (1).

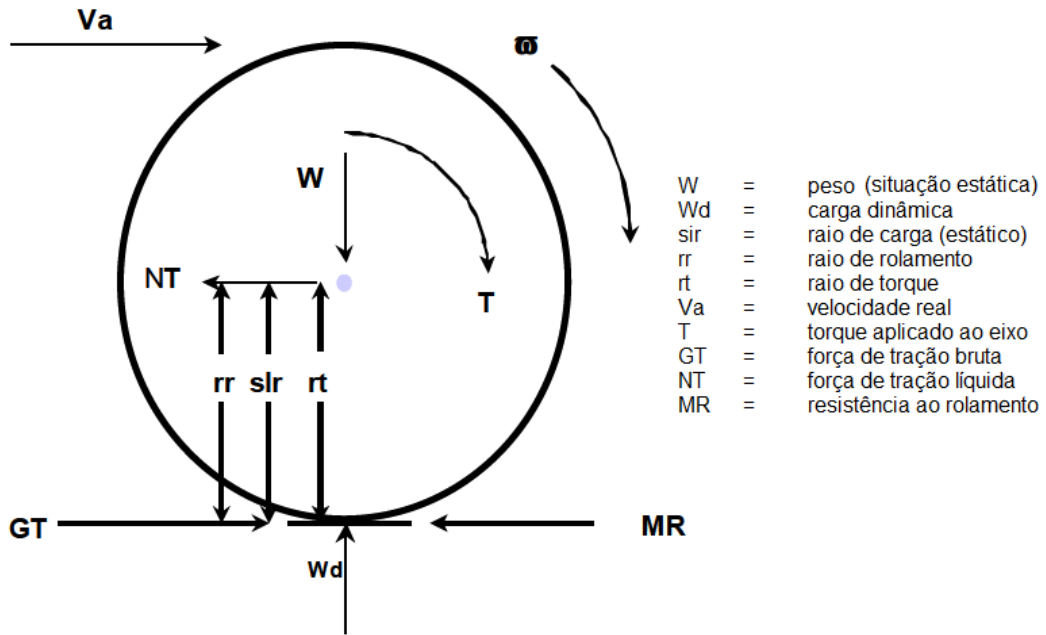
$$s = 1 - \frac{v_a}{v_t} \quad (1)$$

em que:

s = razão de redução de percurso (adimensional);

v_a = velocidade real de deslocamento (ms^{-1});

v_t = velocidade teórica (ms^{-1}).



Fonte: Zoz e Grisso (2003).

Figura 3 - Forças e torques atuantes em uma roda e solo deformáveis.

2. **O Coeficiente de Tração Líquida (μ)**, que é a razão entre a força de tração líquida e a carga dinâmica.

$$\mu = \frac{H}{W} \quad (2)$$

em que:

μ = coeficiente de tração líquida (adimensional);

H = força de tração líquida (N);

W = carga dinâmica (N).

A carga dinâmica é definida pela ASABE (2009) como a força total normal à superfície de apoio na qual o dispositivo de tração ou de transporte está operando.

3. **A Eficiência Tratória (TE)** é caracterizada como a razão entre a potência de tração útil produzida pela roda e a potência aplicada ao eixo.

$$TE = \frac{H \cdot v_a}{T \cdot \omega} \quad (3)$$

em que:

TE = eficiência tratória (adimensional);

T = torque aplicado ao eixo da roda (Nm);

ω = velocidade angular do eixo da roda (rads^{-1}).

4. O Coeficiente de Tração Bruta (μ_g) é descrito como a razão entre a força de tração bruta e a carga dinâmica.

$$\mu_g = \frac{F}{W} \quad (4)$$

em que:

μ_g = coeficiente de tração bruta (adimensional);

F = força de tração bruta (N);

W = carga dinâmica (N).

5. O Coeficiente de Resistência ao Rolamento (ρ) é definido como a razão entre a força necessária para arrastar a roda e a carga dinâmica aplicada ao eixo.

$$\rho = \frac{TF}{W} \quad (5)$$

em que:

ρ = coeficiente de resistência ao rolamento (adimensional);

TF = força para arrastar a roda (N);

W = carga dinâmica (N).

Com o objetivo de melhor conhecer o desempenho de tração de máquinas agrícolas, pesquisadores têm utilizado com frequência as teorias de previsão de tração com base no número característico da roda (C_n), de Wismer

e Luth (1973), no índice de mobilidade (B_n) de Brixius e Wisler (1975) e no número de mobilidade (M_n) de Gee-Clough (1980).

As equações propostas com base no número característico da roda (C_n) envolvem características do solo e dos pneus, estabelecendo uma relação entre ambos. O valor de C_n é obtido pela Equação (6).

$$C_n = \frac{(CI \ b \ d)}{W} \quad (6)$$

em que:

C_n = número característico da roda (adimensional);

CI = índice de cone (Pa);

b = largura do pneu (m);

d = diâmetro indeformado do pneu (m);

W = carga dinâmica (N).

O coeficiente de resistência ao rolamento (ρ) é dado pela Equação (7).

$$\rho = \frac{1,2}{C_n} + 0,04 \quad (7)$$

em que:

ρ = coeficiente de resistência ao rolamento (adimensional).

O coeficiente de tração bruta (μ_g) é dado por:

$$\mu_g = 0,75 \cdot (1 - e^{-0,3 \cdot C_n \cdot s}) \quad (8)$$

em que:

μ_g = coeficiente de tração bruta (adimensional);

s = razão de redução de percurso (adimensional).

A razão de redução de percurso (s), por sua vez, é definida conforme Equação (9).

$$s = \frac{1}{0,3 \cdot C_n} \cdot \ln\left(\frac{0,75}{0,75 - \mu_g}\right) \quad (9)$$

Mais recentemente, o estudo da tração tem sido realizado com base no índice de mobilidade (B_n), para Zoz e Grisso (2003). Este índice é uma combinação de parâmetros adimensionais do solo e do pneu usada para prever o efeito combinado de ambos. A Equação (10) mostra como é calculado o número de mobilidade.

$$B_n = C_n \cdot \frac{1 + 5 \cdot \frac{\delta}{h}}{1 + 3 \cdot \frac{b}{d}} \quad (10)$$

Sendo:

$$\delta = \left(\frac{d}{2} - r_e\right) \quad (11)$$

$$h = \frac{d - d_A}{2} \quad (12)$$

em que:

B_n = índice de mobilidade (adimensional);

δ = deflexão do pneu em superfície rígida (m);

r_e = raio estático sob carga máxima do pneu em superfície firme (m);

h = altura da seção teórica da roda (m);

d = diâmetro indeformado do pneu (m);

d_A = diâmetro do aro (m).

O coeficiente de resistência ao rolamento (ρ), em função do índice de mobilidade B_n para pneus diagonais, é dado pela Equação (13).

$$\rho = \frac{1}{B_n} + 0,04 + \frac{0,5 \cdot \delta}{\sqrt{B_n}} \quad (13)$$

O coeficiente de tração bruta (μ_g) é definido pela Equação (14).

$$\mu_g = 0,88. (1 - e^{-0,1.B_n}). (1 - e^{-7,5.\delta}) + 0,04 \quad (14)$$

A Equação (15) expressa a razão de redução de percurso (s).

$$s = \frac{1}{7,5} \cdot \ln \left\{ \frac{0,88. (1 - e^{-0,11.B_n})}{[0,88. (1 - e^{-0,11.B_n})] + 0,04 - \mu_g} \right\} \cdot 100 \quad (15)$$

Outra forma de se calcular a capacidade de tração é com base no número de mobilidade (M_n), que é definido pela Equação (16).

$$M_n = C_n \sqrt{\frac{\delta}{h} \cdot \frac{1}{1 + \frac{b}{2.d}}} \quad (16)$$

em que:

M_n = número de mobilidade (adimensional);

δ = deformação do pneu (m);

h = altura da seção do pneu (m).

O coeficiente de resistência ao rolamento (ρ) é dado pela Equação (17).

$$\rho = 0,049 + \frac{0,289}{M_n} \quad (17)$$

O coeficiente de tração líquida (μ), por sua vez, é caracterizado pela Equação (18).

$$\mu = \mu_{max} \cdot (1 - e^{-k.s}) \quad (18)$$

sendo:

$$\mu_{max} = 0,796 - \frac{0,92}{M_n} \quad (19)$$

$$k \cdot \mu_{max} = 4,838 + 0,061 \cdot M_n \quad (20)$$

em que:

μ = coeficiente de tração líquida (adimensional);

μ_{max} = coeficiente de tração líquida máximo (adimensional);

k = constante (adimensional).

Para determinar as melhores condições de utilização de teorias de predição do comportamento de trator agrícola de pneus, Schlosser et al. (2004) compararam as teorias C_n , B_n e M_n . Dessa forma, chegaram à conclusão de que as teorias B_n e M_n se mostraram mais apropriadas para a simulação de desempenho de trator nas condições utilizadas e ressaltaram a importância da utilização destas teorias para simulação de desempenho de tratores.

Santos et al. (2011) realizaram estudos de comparação entre valores simulados de desempenho de tração de um conjunto trator-implemento, utilizando as teorias C_n , B_n e M_n , com valores de desempenho de tração obtidos em experimentos conduzidos no campo. Estes autores concluíram que as teorias preditivas C_n , B_n e M_n apresentam boa correlação com os valores experimentais. Porém, existe uma tendência, por parte das teorias, em superestimar os valores de força de tração e razão de redução de percurso, quando comparados aos medidos experimentalmente.

2.4. Metodologia para validação de modelos matemáticos

A modelagem matemática tem sido empregada como uma poderosa ferramenta para prever o desempenho de sistemas e entender seu comportamento, sendo possível, a partir dela, otimizar o desempenho de sistemas operacionais. Segundo Santos (2010), o modelo matemático é, sem dúvida, o modelo mais versátil e barato que um engenheiro pode usar, uma vez que diferentes variações nas características de entradas de um sistema podem ser analisadas sem nada ser construído.

Depois da formulação matemática das relações que participarão do modelo, a implementação de um modelo computacional de simulação requer a transferência de conhecimento (presente na forma de conceitos e regras) e de informações ao computador na forma de fórmulas, algoritmos e dados estruturais (HOFFMANN, 2007).

Conforme Hoffmann (2007), de posse dos dados e formuladas as equações, o modelo pode ser implementado em linguagem computacional, que representará de forma definitiva o modelo capaz de simular o comportamento do sistema.

Segundo Hoffmann (2007), modelos matemáticos podem ser escritos usando-se diversos tipos de pacotes computacionais ou ferramentas de programação. Esta autora ressalta, ainda, que a opção mais comum é a utilização das linguagens de programação Pascal, Fortran, C, C++, Delphi ou Visual Basic. Afirma, também, que essas linguagens são versáteis e podem ser usadas por qualquer projeto de desenvolvimento de software, permitindo uma interface personalizada com o usuário e uma boa capacidade de armazenamento de banco de dados.

Sargent (2005) salienta a importância das etapas de verificação e de validação no desenvolvimento de um modelo. A verificação é definida como um processo que visa assegurar que o programa de computador desenvolvido com base no modelo matemático foi implementado de forma correta. A validação é definida como o processo que tem como objetivo determinar se o modelo utilizado simula com exatidão satisfatória o desempenho do sistema dentro do domínio para o qual foi desenvolvido.

Segundo Sargent (2005), a comprovação de que um modelo é válido, ou seja, realizar a verificação e validação dos modelos, geralmente é considerado como parte do desenvolvimento do modelo. Este autor sugere quatro abordagens básicas para decidir se um modelo é válido:

1. A equipe de desenvolvimento do modelo toma a decisão se ele é válido;
2. Um usuário do modelo, fortemente envolvido com a equipe de desenvolvimento deste, determina a sua validade;
3. Uma pessoa independente é chamada para decidir se o modelo é válido;
4. Atribuição de pontuação para alguns aspectos do modelo e uma pontuação geral. O modelo será considerado válido se a sua pontuação geral e por

categoria forem maiores do que alguma pontuação de partida. Esta abordagem é raramente usada na prática.

Sargent (2005) descreve várias técnicas para se verificar e validar modelos. A seguir, apresentam-se resumidamente algumas delas:

- O comportamento operacional do modelo e seu desenvolvimento, através do tempo, podem ser apresentados e analisados graficamente;
- O modelo desenvolvido pode ser comparado com outros modelos que já foram validados;
- Os dados do modelo podem ser comparados com os do sistema real para verificar se são semelhantes;
- Pode-se perguntar a pessoas que conhecem o sistema desenvolvido se o modelo e/ou seus comportamentos são satisfatórios;
- O funcionamento do modelo pode ser testado a partir da seleção adequada de valores internos e externos;
- Pode-se, também, fazer uso de dados históricos coletados em um sistema específico para criar e testar um modelo;
- Os valores de entrada de um modelo podem ser modificados a fim de se verificar os efeitos sobre o seu comportamento ou sobre os dados de saída;
- Testes em campo podem ser coletados e comparados com dados simulados pelo modelo e assim verificar se o comportamento de ambos são semelhantes.

O objetivo da validação é desenvolver um nível de confiança aceitável inferido a partir do desempenho do modelo em que este se mostra correto e aplicável a sistemas reais (HOFFMANN, 2007).

Dados experimentais gerados especialmente para a validação do modelo são os melhores, tanto em termos de adequação das medidas quanto em termos de se ajustar aos testes do modelo. O fator limitante para a validação é geralmente a falta de dados completos para comparação entre dados de entradas simulados e resultados gerados (HOFFMANN, 2007).

Harrison (1990 apud HOFFMANN, 2007) afirma que os diversos testes estatísticos usados para validar modelos são limitados e, por isso, devem ser utilizados no objetivo descritivo e não na inferência a respeito da validade dos

modelos. Este instrumental estatístico deve ser combinado com procedimento gráfico de comparação e avaliação de especialistas.

Segundo Barioni (1997 apud HOFFMANN, 2007), a análise de regressão simples é talvez o melhor teste estatístico para validação e um dos mais largamente utilizados nos dias de hoje. Ela é realizada com médias das saídas do modelo e com medidas do sistema real, como sendo observações pareadas.

2.5. Modelagem matemática da capacidade de tração de tratores agrícolas

Programas de computador têm sido desenvolvidos para analisar a capacidade de tração de tratores agrícolas a partir de modelos matemáticos. Pranav e Pandey (2008) desenvolveram um programa de computador utilizando a linguagem Visual Basic para calcular a lastragem ideal dos rodados dianteiros e traseiros de tratores. Em comparação com resultados experimentais, o programa simulou forças de tração sempre inferiores aos valores determinados experimentalmente, apresentando um erro relativo médio de 6,78% e um erro relativo máximo de 11,74%. Foram realizados, ao todo, nove testes experimentais.

Al-Hamed e Al-Janobi (2001) desenvolveram um programa de computador para prever a capacidade de tração de tratores 4x2 e 4x4. O programa de computador foi desenvolvido utilizando-se a linguagem Visual C++. Segundo os autores, este programa ofereceu uma interface de usuário intuitiva ligando bases de dados, tais como as especificações do trator, os dados de pneus e os coeficientes de equação de tração, para prever o desempenho de um trator. Concluíram, dessa forma, que o programa mostrou-se eficiente e amigável.

Figueira (2008) desenvolveu uma ferramenta computacional para simulação de sistemas mecânicos multicorpos, onde foi possível fazer análise estática, cinemática e dinâmica destes sistemas. Este autor verificou que essa ferramenta apresenta-se como uma boa opção para simulação de sistemas mecânicos em geral e também para simulação de equipamentos e tratores agrícolas de pneus, devido aos bons resultados obtidos em todos os testes realizados.

Um sistema computacional denominado “Aplicativo para Ensaio de Tração – AET” foi desenvolvido por Campos (2009), com a finalidade de realizar aquisição, processamento e armazenamento de dados provenientes do ensaio de tração de tratores. Campos afirma, neste trabalho, que o programa possibilitou a visualização dos dados processados em tempo real de maneira simples e rápida, além de representar significativa economia de tempo para o usuário ao gerar automaticamente os relatórios de ensaio na barra de tração.

Russini (2009) desenvolveu um projeto para construção e teste de instrumentação eletrônica para avaliação do desempenho de tratores agrícolas. Foi realizado o projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado da instrumentação construída, visando à instalação de transdutores para medida da velocidade das rodas motrizes e velocidade do trator, fluxômetro para determinação do consumo de combustível e uma célula de carga para medida da força de tração. O autor concluiu ao final deste trabalho, que é possível determinar o desempenho dos tratores agrícolas através de uma instrumentação eletrônica, obtendo dados que representam as condições do teste em que o trator foi submetido.

Sahu e Raheman (2007) desenvolveram um sistema de apoio à tomada de decisão - denominado DSS - com a finalidade de prever o desempenho em campo de conjuntos trator-implementos. A linguagem utilizada no programa de simulação foi a Visual Basic 6.0. O programa foi validado após encontrarem uma baixa variação entre os valores observados e os previstos de força de tração, razão de redução de percurso e capacidade de campo real, através da comparação dos dados coletados de experimentos em campo com os gerados pelo programa.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A etapa experimental do projeto foi desenvolvida na Universidade Federal de Viçosa e os testes foram realizados com um trator marca John Deere, modelo 5705 com tração dianteira auxiliar (TDA) e equipado com pneus dianteiros diagonais, da marca GoodYear, e traseiros também diagonais, da marca Pirelli, conforme Figura 4. Neste trator, foram instalados todos os transdutores para a medição da rotação das rodas, a rotação da TDP, a velocidade de deslocamento do trator, a força na barra de tração e os equipamentos para aquisição e processamento dos dados coletados em campo. Os testes foram realizados com o bloqueio do diferencial ligado.



Figura 4 - Trator John Deere modelo 5705, equipado com pneus diagonais nos eixos dianteiros e traseiros.

Os parâmetros relativos aos pneus, utilizados no modelo matemático, foram obtidos consultando-se os manuais disponibilizados pelo fabricante. Em todos os testes, foram utilizados pneus novos. Nos Quadros 1, 2 e 3 são

apresentadas algumas características do trator ensaiado e dos pneus utilizados.

Quadro 1 - Características do trator utilizado nos testes

Potência nominal do motor	62 kW
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	4,5 litros
Aspiração	Turboalimentado

Quadro 2 - Distribuição de peso nos testes realizados em relação à condição de lastragem

Rodado	Carga sobre os rodados (N)	Distribuição (%)	Relação Peso/Potência (N/W)
0% de água nos pneus			
Dianteiro	14582,40	46,5	0,51
Traseiro	16777,60	53,5	
Total	31360,00		
75% de água nos pneus			
Dianteiro	15.915,20	41,6	0,62
Traseiro	22.363,60	58,4	
Total	38.278,80		

Quadro 3 - Características dos pneus diagonais utilizados nos testes

Rodado	Modelo	Tipo	Largura (m)	Diâmetro externo (m)	Altura seção (m)	Raio de rolamento (m)
Dianteiro	Dina Torque II	12.4-24	0,3150	1,1633	0,2519	0,5207
Traseiro	TM 95	18.4-30	0,4674	1,5519	0,3700	0,7196

A aquisição automática de dados durante os testes em campo com superfícies planas e rígidas, e também em superfícies inclinadas, foi realizada por meio de dois *dataloggers*, modelo *Spider8*, marca HBM (Figura 5), a uma taxa de 800 Hz. A esses *dataloggers* foram acoplados os transdutores descritos abaixo e o programa Catman, versão 2.1, realizou o processamento dos dados.

- Transdutor de velocidade de deslocamento do trator, tipo radar, marca Dickey-John, modelo RVS II;
- Transdutor de rotação do motor do tipo proximidade, marca Schmersal, modelo IFL 2-8M-10St2P;
- Transdutor de rotação das rodas motrizes do trator do tipo proximidade, marca Schmersal, modelo IFL-5-1811ZNG;
- Transdutor de força do tipo *strain-gage* para determinação da força na barra de tração, marca Alfa, capacidade 50 kN.

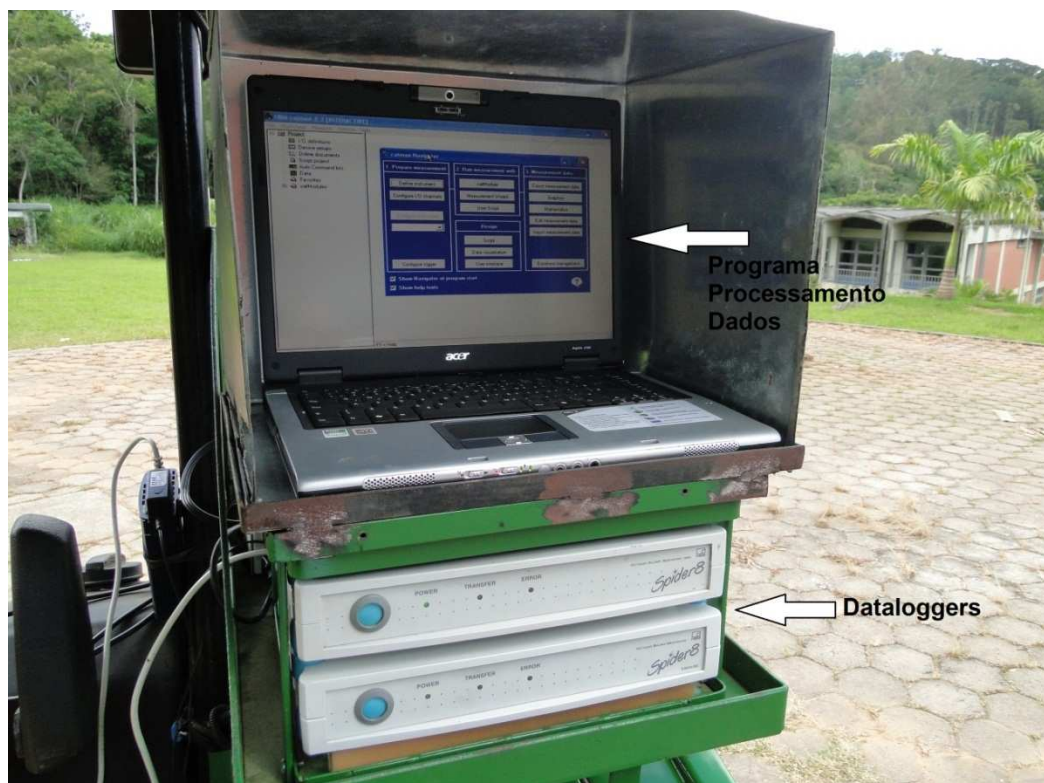


Figura 5 - *Dataloggers* (*Spiders*) e programa de processamento de dados (Catman 2.1) instalados no suporte do trator.

A razão de redução de percurso foi obtida com base na velocidade de deslocamento do trator, na rotação das rodas motrizes e no raio de rolamento. A velocidade de deslocamento do trator foi obtida através do radar (Figura 6) e a velocidade das rodas foi determinada utilizando-se dois discos metálicos com 45 dentes cada, sendo que um foi fixado em uma das rodas dianteiras, e o outro, em uma das rodas traseiras (Figuras 7 e 8). A razão de redução de percurso foi determinada experimentalmente utilizando-se a equação 21.

$$s = \left(1 - \frac{v_{trator}}{v_{roda}}\right) \cdot 100 \quad (21)$$

em que:

s = razão de redução de percurso (adimensional);

v_{trator} = velocidade do trator (m/s);

v_{roda} = velocidade da roda (m/s).

Para cada dado gerado de velocidade da roda e do trator, calculou-se a razão de redução de percurso. Foram excluídos os valores iniciais e finais de cada teste e realizada a média dos demais, encontrando, assim, o valor médio da razão de redução de percurso para cada roda. Este procedimento foi realizado também para a obtenção da força de tração e da rotação da TDP.



Figura 6 - Radar para medição da velocidade de deslocamento do trator.

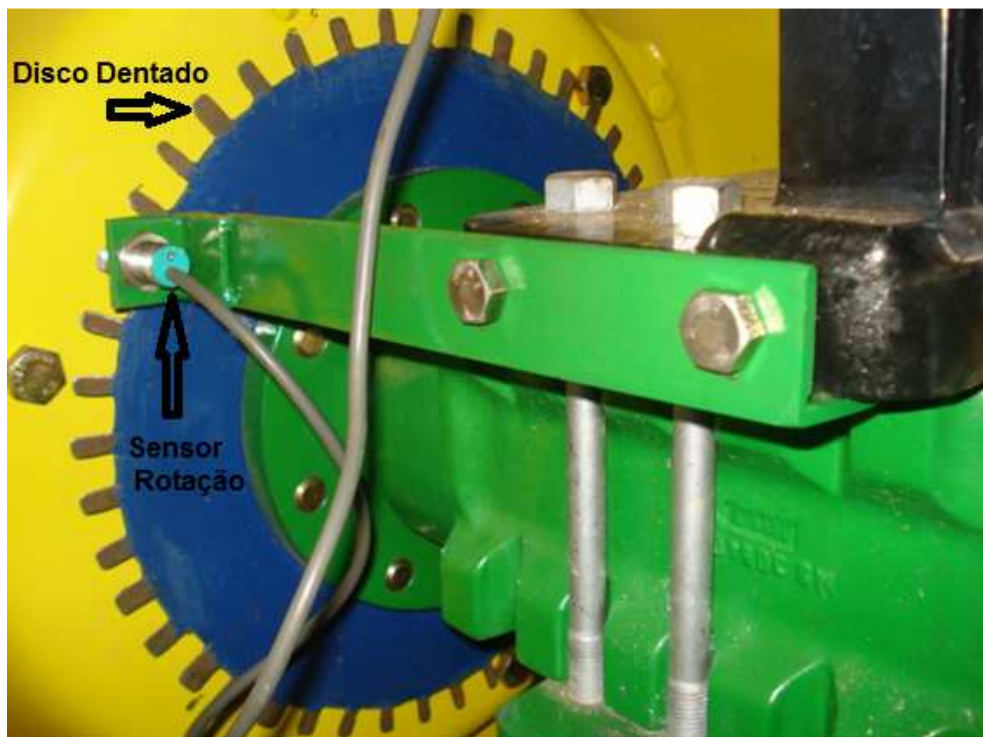


Figura 7 - Transdutor de proximidade para medição da rotação das rodas traseiras.

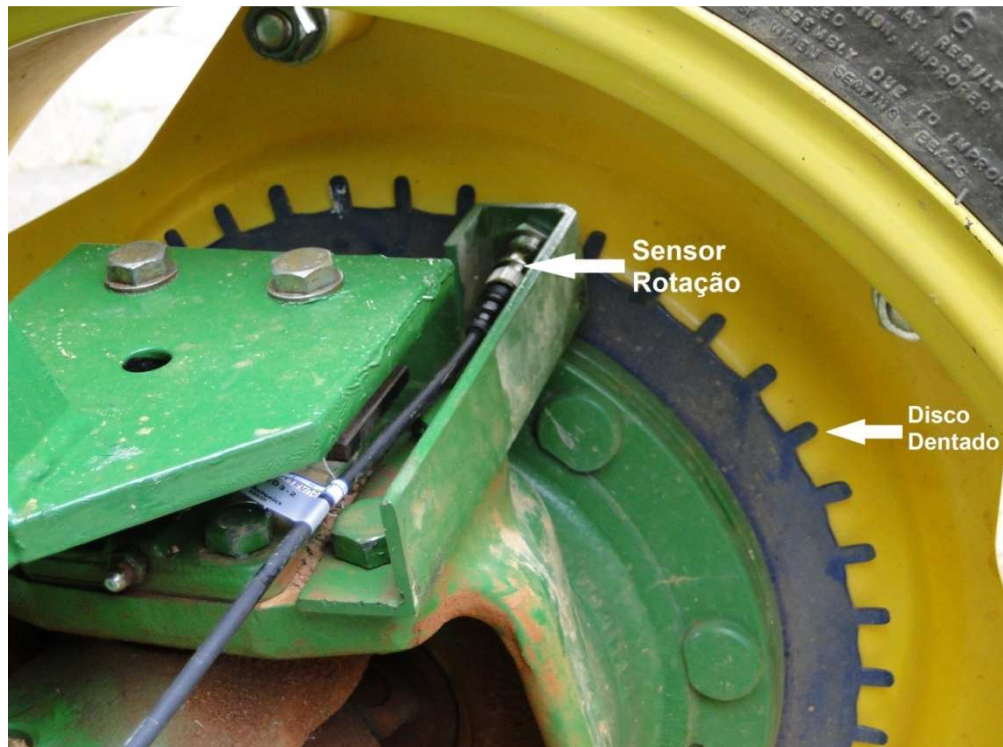


Figura 8 - Transdutor de proximidade para medição da rotação das rodas dianteiras.

A rotação da TDP foi registrada por meio do transdutor de proximidade instalado próximo ao seu eixo, conforme Figura 9. A rotação do motor foi determinada multiplicando-se a rotação registrada na TDP pela razão $2150/540$, sendo que o número 2150 representa a rotação do motor, na qual a rotação da TDP é 540 rpm. Experimentalmente, calculou-se a rotação máxima do motor, cujo valor obtido foi de 2722 rpm.

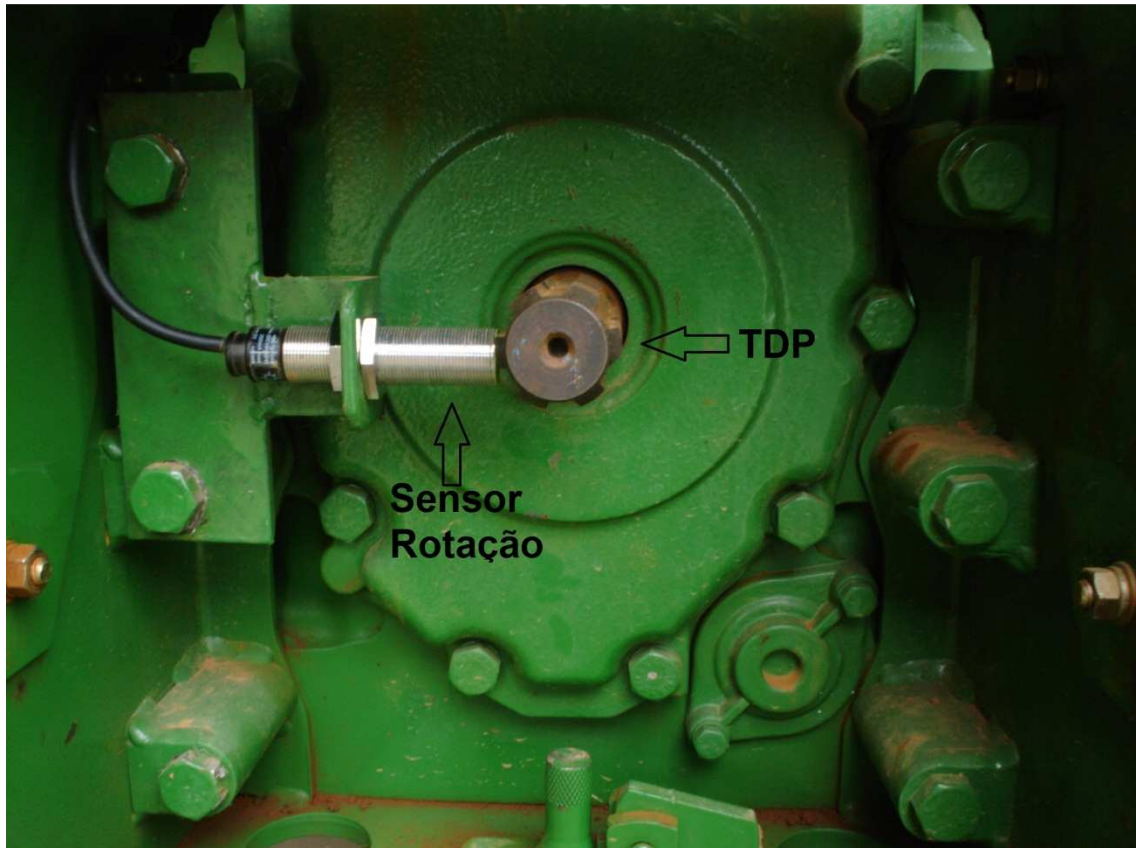


Figura 9 - Transdutor de proximidade para medição da rotação da TDP e do motor.

3.1. Experimentos realizados em superfícies planas e rígidas

Com o objetivo de avaliar a capacidade de tração do trator em superfície rígida, realizaram-se os testes em três situações distintas: uma pista coberta por asfalto, uma estrada de terra onde há circulação de pessoas e veículos, e uma estrada de terra coberta com grama, sendo que cada pista possuía 30,0 metros de comprimento e 5,0 metros de largura. Estas variações na superfície permitiram fazer comparações entre a razão de redução de percurso e a velocidade de deslocamento simulado pelo modelo matemático e os obtidos experimentalmente.

A velocidade de deslocamento do trator de aproximadamente $5,4 \text{ kmh}^{-1}$, utilizada nos testes, foi obtida usando-se a marcha B1 em aceleração máxima. As rodas traseiras e dianteiras estavam sem lastro líquido e com pressão de insuflação de 96,5 kPa. Com o objetivo de comparar a capacidade de tração de

um trator quando se usa ou não a tração dianteira auxiliar, em cada superfície e carga aplicadas, foi realizado um teste com a TDA desligada e outro com ela ligada .

As diferentes forças na barra de tração foram obtidas utilizando-se como lastro um trator da marca Massey Ferguson, modelo 283, cuja potência nominal era de 63,3 kW, equipado com tração dianteira auxiliar. O nível de carga (C1) é o que considerava o trator não realizando tracionamento, ou seja, sem carga na barra de tração. Para cada experimento, os níveis (C2) e (C3) foram registrados pela célula de carga (Figura 10), ao se tracionar o trator lastro. Para cada nível de carga, foi realizado um teste com TDA ligada e um com ela desligada, com o intuito de se comparar a capacidade de tração quando se usa a tração dianteira auxiliar.

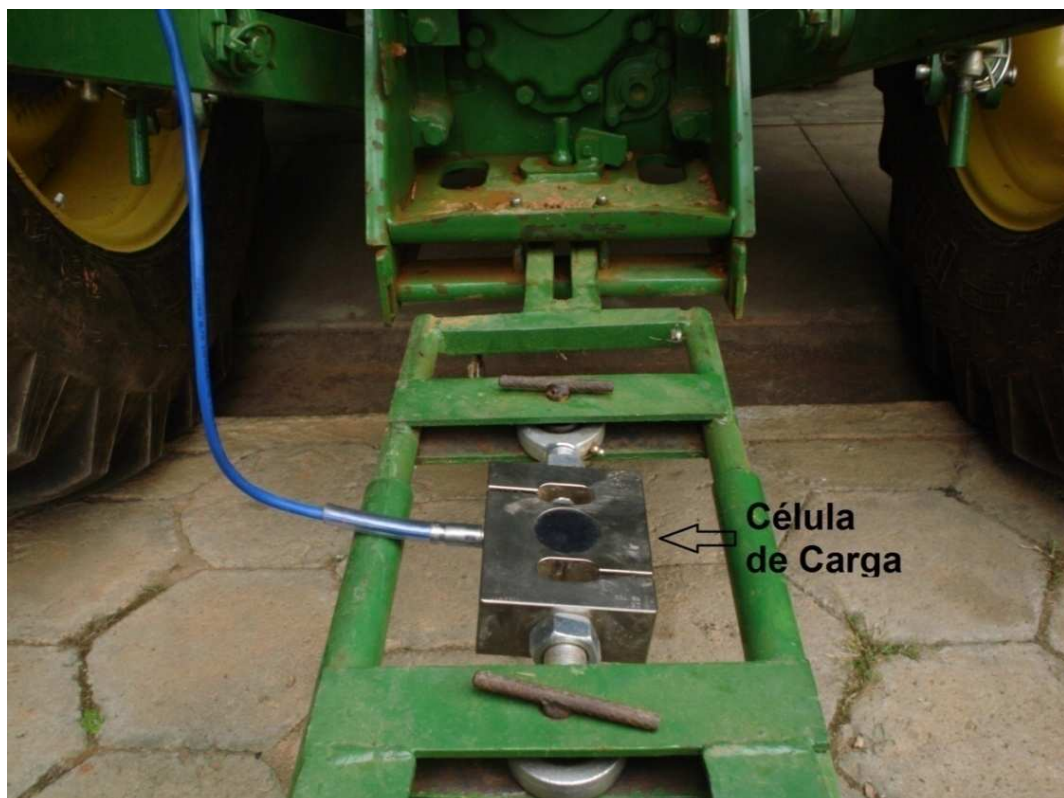


Figura 10 - Célula de carga para medição da força de tração.

3.2. Experimentos realizados em superfícies inclinadas

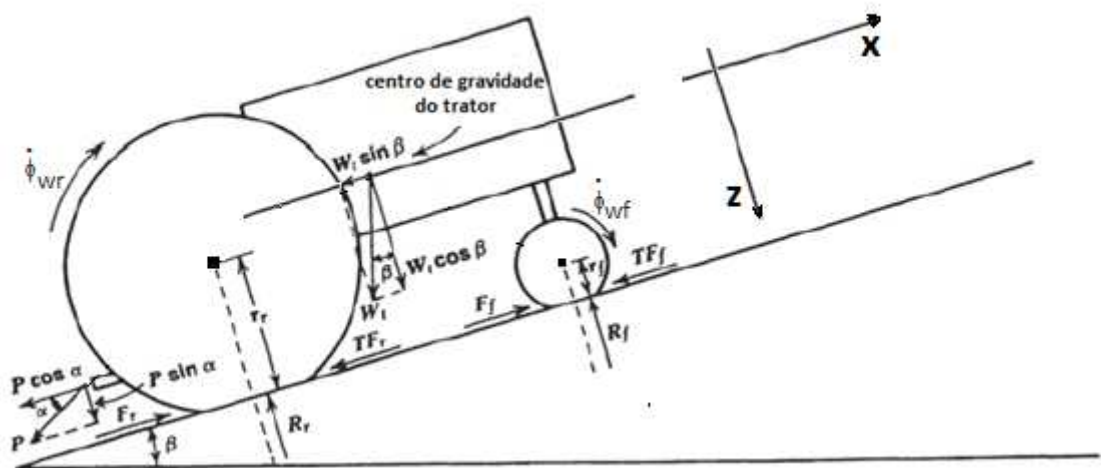
Os experimentos foram realizados em terreno com três níveis de declividade (11,9; 14,7 e 15,5°), tendo respectivamente as seguintes dimensões de largura e comprimento: 15 x 20 m, 17 x 40 m e 25 x 30 m. Em cada uma dessas inclinações, realizou-se um teste para as seis marchas utilizadas: A1, A2, A3, B1, B2 e B3. O trator em teste não tracionou carga na barra de tração, pois, ao mover-se em terreno inclinado, a componente do peso do trator, agindo paralelamente à superfície e contrária ao sentido de deslocamento, atuou como força contrária ao seu movimento, ao invés de se aplicar a força de tração.

Para realização do experimento, os pneus estavam lastrados com 75% de água e insuflados com pressões de 82,7 kPa no eixo dianteiro e 96,5 kPa no eixo traseiro. A tração dianteira auxiliar permaneceu acionada em todos os testes.

A superfície onde foram realizados os ensaios apresentava cobertura com restos de palhada de milho e a resistência do solo à penetração foi determinada por um penetrômetro eletrônico, modelo PNT 2000, da DLG Automação, realizando-se cinco determinações em cada faixa trabalhada. As determinações foram efetuadas no momento que antecedeu a realização do teste. Foi determinado o índice de cone médio na camada de 0 a 0,15 m e o teor de água do solo, por sua vez, determinado pelo método padrão de estufa, com amostras retiradas na faixa de 0 a 0,15 m de profundidade, com cinco repetições.

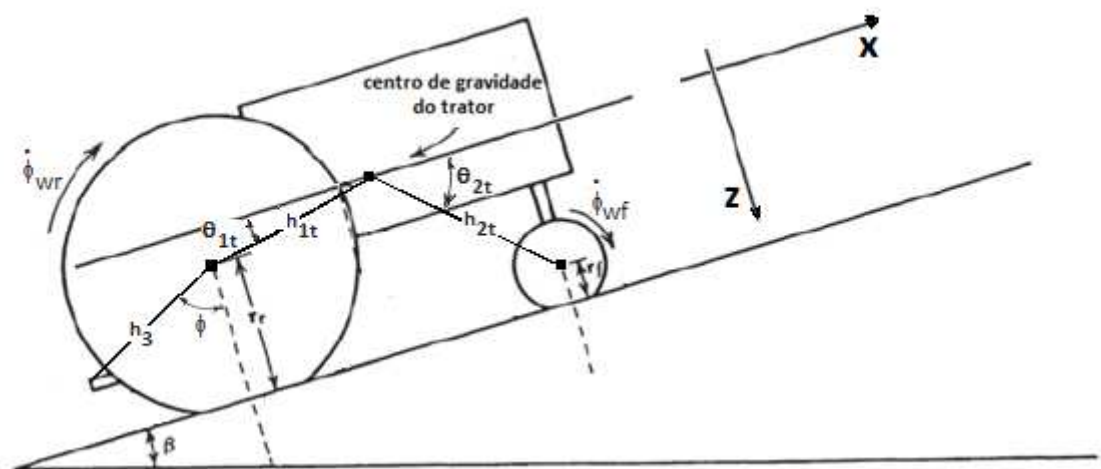
3.3. Modelagem da capacidade de tração do trator

Para a modelagem da capacidade de tração de um trator 4x2 com tração dianteira auxiliar, tomou-se como referência as equações propostas por Goering et al. (2003) e os diagramas de forças e dimensões mostrados nas Figuras 11 e 12, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Goering et al. (2003).

Figura 11 - Diagrama de forças atuantes num trator 4x2 com tração dianteira auxiliar.



Fonte: Adaptado de Goering et al. (2003).

Figura 12 - Caracterização das dimensões do trator utilizadas no modelo matemático.

Para a realização da modelagem, considerou-se o trator como um corpo rígido em que as forças atuantes sobre o mesmo estão em equilíbrio, isto é, o trator desloca-se com velocidade constante. As velocidades angulares das rodas motrizes também foram consideradas constantes e o movimento do trator foi analisado em duas dimensões e em superfícies planas e sem

deformação. Além disso, forças aerodinâmicas foram consideradas desprezíveis.

As coordenadas do centro de gravidade foram determinadas através do método de dupla pesagem, que considera a distribuição dos pesos nos eixos, conforme Goering et al. (2003), cujo detalhamento encontra-se no anexo Q.

Para a realização do balanço de forças e momentos, conforme as Figuras 11 e 12, em relação ao ponto de contato entre o pneu traseiro e o solo, as reações nas rodas dianteiras e traseiras foram calculadas por meio das Equações (22) e (23), sendo consideradas perpendiculares à superfície de apoio, passando pelos centros dessas rodas.

$$R_f = \frac{W_t \cos(\beta)x_1 - W_t \sin(\beta)z_1 - P \sin(\alpha)x_3 - P \cos(\alpha)z_3 - TF_f r_f - TF_r r_r}{x_1 + x_2} \quad (22)$$

$$R_r = W_t \cos(\beta) + P \sin(\alpha) - R_f \quad (23)$$

em que:

R_f = reação do solo no rodado dianteiro (N);

R_r = reação do solo no rodado traseiro (N);

W_t = peso total do trator (N);

P = força aplicada na barra de tração do trator (N);

TF_f = resistência ao rolamento do rodado dianteiro (N);

TF_r = resistência ao rolamento do rodado traseiro (N);

x_1 = distância entre o eixo traseiro e o centro de gravidade do trator projetada no eixo x (m);

z_1 = distância entre o piso e o centro de gravidade do trator projetada no eixo z (m);

x_2 = distância entre o eixo dianteiro e o centro de gravidade do trator projetada no eixo x (m);

x_3 = distância entre o eixo traseiro e o ponto de aplicação da força na barra de tração projetada no eixo x (m);

z_3 = distância entre o piso e o ponto de aplicação da força na barra de tração projetada no eixo z (m);

r_f = raio de rolamento dos pneus do rodado dianteiro (m);

r_r = raio de rolamento dos pneus do rodado traseiro (m);

β = declividade do piso (radianos);

α = ângulo de aplicação da força P em relação ao eixo x (m).

As dimensões x_1, z_1, x_2, x_3, z_3 foram calculadas pelas Equações (24) a (28):

$$x_1 = h_{1t} \cos(\theta_{1t}) \quad (24)$$

$$z_1 = r_r + h_{1t} \sin(\theta_{1t}) \quad (25)$$

$$x_2 = h_{2t} \cos(\theta_{2t}) \quad (26)$$

$$x_3 = h_3 \sin(\phi) \quad (27)$$

$$z_3 = r_r - h_3 \cos(\phi) \quad (28)$$

em que:

h_{1t} = distância entre o centro de gravidade do trator e o centro do rodado traseiro (m);

θ_{1t} = ângulo entre o eixo x e a linha que une o centro do rodado traseiro e o centro de gravidade do trator (radianos);

h_{2t} = distância entre o centro de gravidade do trator e o centro do rodado dianteiro (m);

θ_{2t} = ângulo entre o eixo x e o segmento de reta que une o centro do rodado dianteiro e o centro de gravidade do trator (radianos);

h_3 = distância entre o centro do rodado traseiro e o ponto de aplicação da força P (m);

ϕ = ângulo entre o eixo z e o segmento de reta que une o centro da roda traseira e o ponto de aplicação da força P (radianos).

As forças de resistência ao rolamento TF_r e TF_f foram calculadas por meio das Equações (29) e (30):

$$TF_r = R_r \left(\frac{1,0}{B_{nr}} + 0,04 + \frac{0,5s_r}{\sqrt{B_{nr}}} \right) \quad (29)$$

$$TF_f = R_f \left(\frac{1,0}{B_{nf}} + 0,04 + \frac{0,5s_f}{\sqrt{B_{nf}}} \right) \quad (30)$$

em que:

B_{nf} = índice de mobilidade para o rodado dianteiro, adimensional;

B_{nr} = índice de mobilidade para o rodado traseiro, adimensional;

s_r = razão de redução de percurso das rodas traseiras, comumente denominada de patinagem ou deslizamento, adimensional;

s_f = razão de redução de percurso das rodas dianteiras, adimensional.

As razões de redução de percurso foram calculadas levando-se em consideração o equilíbrio de forças na direção x, representado pela Equação (31), e que a velocidade de deslocamento das rodas motrizes dianteiras e traseiras é igual, conforme Equação (32).

$$F_f - TF_f + F_r - TF_r - W_t \sin(\beta) - P \cos(\alpha) = 0 \quad (31)$$

$$s_f = 1 - \left[\frac{r_r G_f}{r_f G_r} (1 - s_r) \right] \quad (32)$$

em que:

F_f = força de tração bruta para o rodado dianteiro (N);

F_r = força de tração bruta para o rodado traseiro (N);

G_f = relação de transmissão entre o motor e o rodado dianteiro (adimensional);

G_r = relação de transmissão entre o motor e o rodado traseiro (adimensional);

r_r = raio de rolamento do rodado traseiro (m);

r_f = raio de rolamento do rodado dianteiro (m).

Os valores de raio de rolamento dos pneus utilizados nos tratores foram obtidos consultando-se os manuais dos fabricantes. Estes manuais apresentam os valores de circunferência de rolamento para cada pneu fabricado. O raio de rolamento foi obtido dividindo-se os valores de circunferência de rolamento divulgados pelos fabricantes de pneus por 2π .

As forças de tração brutas para os rodados dianteiros e traseiros foram calculadas por meio das equações (33) e (34).

$$F_r = R_r[0,88(1 - e^{-0,1B_{nr}})(1 - e^{-7,5.S_r}) + 0,04] \quad (33)$$

$$F_f = R_f[0,88(1 - e^{-0,1B_{nf}})(1 - e^{-7,5.S_f}) + 0,04] \quad (34)$$

Os índices de mobilidade para os pneus dianteiros e traseiros foram calculados pelas Equações (35) e (36).

$$B_{nf} = \frac{CI b_f d_f}{W_f} \left(\frac{1 + 5 \frac{\delta_f}{h_f}}{1 + 3 \frac{b_f}{d_f}} \right) \quad (35)$$

$$B_{nr} = \frac{CI b_r d_r}{W_r} \left(\frac{1 + 5 \frac{\delta_r}{h_r}}{1 + 3 \frac{b_r}{d_r}} \right) \quad (36)$$

em que:

CI = índice de cone médio do solo na camada 0 a 0,15 m (Pa);

b_f = largura nominal dos pneus do rodado dianteiro (m);

b_r = largura nominal dos pneus do rodado traseiro (m);

d_f = diâmetro global dos pneus dianteiros (m);

d_r = diâmetro global dos pneus traseiros (m);

h_f = altura da banda de rodagem nominal dos pneus dianteiros (m);

h_r = altura da banda de rodagem nominal dos pneus traseiros (m);

$\bar{\delta}_f$ = deflexão na direção z dos pneus dianteiros (m);

$\bar{\delta}_r$ = deflexão na direção z dos pneus traseiros (m);

W_f = carga dinâmica agindo sobre cada pneu dianteiro (N);

W_r = carga dinâmica agindo sobre cada pneu traseiro (N).

As deflexões nos pneus foram determinadas a partir das fórmulas (37) e (38).

$$\delta_f = \left(\frac{d_f}{2} - r_{ef} \right) \quad (37)$$

$$\delta_r = \left(\frac{d_r}{2} - r_{er} \right) \quad (38)$$

em que:

δ_f = deflexão do pneu dianteiro em superfície rígida (m);

δ_r = deflexão do pneu traseiro em superfície rígida (m);

r_{ef} = raio estático do pneu dianteiro em superfície firme (m);

r_{er} = raio estático do pneu traseiro em superfície firme (m);

d_f = diâmetro indeformado do pneu dianteiro (m);

d_r = diâmetro indeformado do pneu traseiro (m);

A carga dinâmica, agindo sobre cada pneu, foi calculada assumindo-se que todos os pneus do rodado dianteiro recebem a mesma carga, assim como os pneus do rodado traseiro. As Equações (39) e (40) representam essas condições:

$$W_f = \frac{R_f}{n_f} \quad (39)$$

$$W_r = \frac{R_r}{n_r} \quad (40)$$

em que:

n_f = número de pneus no eixo dianteiro;

n_r = número de pneus no eixo traseiro.

O torque, agindo nos eixos das rodas dianteiras e traseiras, foi calculado com base nas Equações (41) e (42):

$$T_{wf} = F_f r_f \quad (41)$$

$$T_{wr} = F_r r_r \quad (42)$$

em que:

T_{wf} = somatório dos torques agindo no eixo das rodas dianteiras, Nm;

T_{wr} = somatório dos torques agindo no eixo das rodas traseiras, Nm.

O torque aplicado ao motor de combustão interna do trator foi calculado por meio da Equação (43):

$$T_e = \frac{T_{wf}}{G_f \eta_f} + \frac{T_{wr}}{G_r \eta_r} \quad (43)$$

em que:

η_f = eficiência de transmissão da potência entre o motor e o rodado dianteiro, decimal;

η_r = eficiência de transmissão da potência entre o motor e o rodado traseiro, decimal.

Com base no torque estimado a partir da Equação (43), foi calculada a rotação do motor. Para isso, assumiu-se que o torque varia linearmente entre o regime de torque máximo e a rotação nominal, e entre o regime de rotação nominal e a rotação máxima do motor. Com base na rotação do motor, foi possível determinar a velocidade de deslocamento do trator, utilizando-se a Equação (44):

$$v_a = (1 - s_r) \frac{\omega_e}{G_r} r_r = (1 - s_f) \frac{\omega_e}{G_f} r_f \quad (44)$$

em que:

v_a = velocidade de deslocamento do trator ($m \cdot s^{-1}$);

ω_e = velocidade angular do motor ($rad \cdot s^{-1}$).

A velocidade angular do motor foi calculada em função da rotação deste pela Equação (45):

$$\omega_e = \frac{2\pi N_e}{60} \quad (45)$$

em que:

N_e = rotação do motor (rpm).

A eficiência de produção de tração do trator foi calculada por meio da Equação (46):

$$\eta_{pp} = \frac{Pv_a}{\frac{2\pi T_e N_e}{60}} \quad (46)$$

em que:

η_{pp} = eficiência de produção de tração do trator (decimal).

3.3.1. Algoritmo de implementação do modelo para cálculo da capacidade de tração de um trator 4x2 TDA

O programa de computador desenvolvido calcula, para cada força aplicada na barra de tração, a razão de redução de percurso das rodas motrizes, o torque agindo nas rodas motrizes e no motor, a rotação do motor, a velocidade de deslocamento do trator e a eficiência de produção de tração.

O programa inicia com uma força de tração igual a zero, e esta é aumentada com um incremento constante definido pelo usuário, até que seja atingido o limite de capacidade de tração do veículo. Esse limite é atingido quando uma das três condições seguintes é atingida:

- A reação no rodado dianteiro atinge valor igual a zero, ou seja, o trator está na eminência de empinar;
- A razão de redução de percurso das rodas motrizes atinge valor igual a um, ou seja, o fator limitante é a interação pneu-solo;
- O torque, agindo no motor, supera o torque máximo do motor, ou seja, a capacidade de tração máxima do trator é limitada pelo torque disponibilizado pelo motor.

O programa de computador desenvolvido fornece três gráficos que definem a capacidade de tração do trator:

- a) gráfico da velocidade de deslocamento do trator *versus* força aplicada na barra de tração;

- b) gráfico da razão de redução de percurso *versus* a força aplicada na barra de tração;
- c) gráfico da eficiência de produção de tração *versus* a razão de redução de percurso.

A seguir, é apresentada a sequência do algoritmo para cálculo da capacidade de tração do trator:

- a) defina um incremento de força de tração;
- b) faça a força de tração igual a zero ($P=0$);
- c) faça as resistências ao rolamento igual a zero ($TF_f=0$ e $TF_r=0$);
- d) com base nas Equações (22) a (28), calcule as reações nos rodados dianteiros e traseiros;
- e) com base nas Equações (39) e (40), calcule as cargas dinâmicas agindo nos rodados dianteiros e traseiros;
- f) com base nas Equações (35) e (36), calcule os índices de mobilidade para os rodados dianteiros e traseiros;
- g) com base nas Equações (29) e (30), (33) e (34), (31) e (32), calcule as razões de redução de percurso dos rodados dianteiros e traseiros;
- h) com base nas Equações (33) e (34), calcule as forças de tração bruta agindo nos rodados dianteiros e traseiros;
- i) com base nas Equações (29) e (30), recalcule as resistências ao rolamento agindo nos rodados dianteiros e traseiros;
- j) volte ao passo (d) se a diferença entre as resistências ao rolamento entre o *loop* atual e o *loop* anterior for maior que 1,0 N; caso contrário, siga para o passo l;
- k) calcule os torques agindo nos rodados dianteiros e traseiros, utilizando-se as Equações (41) e (42);
- l) calcule o torque agindo no motor, utilizando-se a equação (43);
- m) calcule a rotação do motor considerando-se que, entre o regime de torque máximo e o regime de rotação nominal, o torque do motor varia linearmente com a rotação; e que entre o regime de rotação nominal e de rotação máxima do motor, o torque também varia linearmente com a rotação;
- n) calcule a velocidade de deslocamento do trator, com base na Equação (44);
- o) calcule a eficiência de produção de tração do trator, utilizando-se as Equações (45) e (46);

- p) armazene os resultados de força de tração, razão de redução de percurso dos rodados dianteiros e traseiros, velocidade de deslocamento do trator, torque agindo no motor e eficiência de produção de tração;
- q) verifique se a capacidade máxima de tração do trator foi atingida, ou seja, se a reação do solo no rodado dianteiro atingiu valor zero, ou se a razão de redução de percurso das rodas motrizes atingiu valor igual a 1,00, ou se o torque agindo no motor superou o torque máximo que o motor pode produzir. Se a capacidade máxima de produção de tração não foi atingida, faça a força de tração igual à força de tração atual mais o incremento de força de tração e retorne ao item (c); caso contrário, pare.

Com base nesse algoritmo, o programa de computador foi desenvolvido utilizando-se a linguagem VBA (*Visual Basic Application*) da planilha eletrônica Excel, da Microsoft, versão 2007.

3.3.2. Verificação e validação do modelo matemático implementado

O processo de verificação e validação do modelo implementado foi realizado com base na metodologia apresentada por Sargent (2005). A verificação envolveu a checagem de cada módulo que compõe o programa de computador desenvolvido, e cada grupo de equações no modelo matemático implementado teve os valores de entrada e os resultados verificados. A validação envolveu a comparação entre os valores da razão de redução de percurso e da velocidade de deslocamento determinados experimentalmente e os valores obtidos por meio do modelo matemático implementado.

Foram construídos diagramas de dispersão entre os valores da razão de redução de percurso dos rodados dianteiros e traseiros e da velocidade de deslocamento do trator, calculados pelo modelo matemático e pelos valores obtidos experimentalmente.

Ajustou-se um modelo linear entre os valores experimentais, sendo calculados e determinados a soma do quadrado dos desvios e o coeficiente de determinação para o modelo ajustado. O modelo foi considerado válido se o coeficiente de determinação foi superior a 0,70 e se o coeficiente de inclinação da equação da reta gerada foi próximo a 1,00. Este coeficiente de inclinação foi submetido ao teste “t”, ao nível de 5% de significância, a fim de verificar se os

valores medidos em campo e simulados têm diferenças estatisticamente significativas. A hipótese nula sendo testada é de que o coeficiente de inclinação da reta é igual a 1, e a hipótese alternativa de que é diferente de 1.

A análise do erro relativo médio na determinação da razão de redução de percurso e da velocidade de deslocamento do trator foi também utilizada como recurso para inferir sobre a validade do modelo. O erro foi determinado pela equação (44):

$$E_f = \frac{|P_s - P_e|}{P_e} \cdot 100 \quad (47)$$

em que:

E_f = erro relativo na determinação da razão de redução de percurso ou da velocidade de deslocamento (%);

P_s = razão de redução de percurso ou velocidade de deslocamento determinada, utilizando-se o modelo matemático;

P_e = razão de redução de percurso ou velocidade de deslocamento obtida experimentalmente.

Com o objetivo de identificar os fatores que mais influenciam nos resultados, realizou-se a análise de sensibilidade do modelo, na qual foram verificados os impactos das alterações dos valores de entrada sobre as variáveis de saída. Os parâmetros de entrada foram diminuídos em 10% cada um e foram verificados os efeitos sobre os parâmetros de saída, efetuando-se o mesmo procedimento para um aumento de 10% em cada parâmetro de entrada.

A sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada foi calculada com base no índice de sensibilidade (IS), determinado conforme McCuen & Snyder (1986 apud Evangelista e Ferreira 2006), pela Equação:

$$IS = \frac{\frac{R_1 - R_2}{R_{12}}}{\frac{I_1 - I_2}{I_{12}}} \quad (48)$$

em que:

IS = índice de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada;
 R_1 = resultado obtido com o modelo para o menor valor de entrada;
 R_2 = resultado obtido com o modelo para o maior valor de entrada;
 R_{12} = média dos resultados obtidos com o menor e com o maior valor de entrada;
 I_1 = menor valor de entrada;
 I_2 = maior valor de entrada;
 I_{12} = média dos valores de entrada.

Conforme Chaves (2009), valores em módulo entre 0,5 e 1,5 de índice de sensibilidade são considerados intermediários; acima de 1,5 são considerados altos; e abaixo de 0,5 têm baixa sensibilidade. Valores negativos indicam que o modelo é negativamente correlacionado com o parâmetro, enquanto valores próximos a zero indicam que o modelo é relativamente insensível ao parâmetro McCuen e Snyder (1986 apud Chaves, 2009).

Foram avaliados como parâmetros de entrada o índice de cone (IC), o raio de rolamento dos pneus dianteiros e traseiros (rrf e rrr, respectivamente), o peso do trator (Wt), a pressão de insuflação dos pneus dianteiros e traseiros (pinff e pinfr respectivamente). Como parâmetros de saída, foram avaliadas a razão de redução de percurso das rodas traseiras e dianteiras (sr e sf, respectivamente), a velocidade de deslocamento do trator (va) e a eficiência de produção de tração (EPT).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, efetivou-se a análise dos experimentos realizados em superfícies planas e rígidas, onde testes foram desenvolvidos com a tração dianteira auxiliar (TDA) ligada e desligada. Num segundo momento, a análise foi realizada sobre experimentos em superfícies inclinadas, onde a TDA foi utilizada em todos os testes e não houve aplicação de força na barra de tração.

Os valores medidos e armazenados no sistema de aquisição de dados para ensaios em superfícies planas e com utilização da TDA, comparados com os calculados pelo programa desenvolvido, são apresentados no Quadro 4 e nas Figuras 13 e 14. Os Apêndices A a M apresentam algumas planilhas sobre os dados gerais de entrada e os valores calculados pelo programa de computador, para algumas situações de simulação. Nos Apêndices N e O, é apresentada parte dos dados coletados pelo sistema de aquisição de dados (*Spider8*) e processados pelo programa Catman.

Pôde-se verificar, pelos dados apresentados, que os valores observados e calculados para razão de redução de percurso têm boa concordância, como indicado pelo coeficiente de inclinação da equação da reta com valor abaixo de 1,31 e pelos coeficientes de determinação superiores a 0,94.

Sahu e Raheman (2008) desenvolveram um sistema de apoio à tomada de decisão para previsão de desempenho de conjunto trator-implemento, em que compararam valores calculados e observados da força de tração, da razão de redução de percurso e da capacidade de campo real para diferentes tipos de implementos. O modelo desenvolvido foi considerado válido, já que, segundo os autores, os valores da inclinação da reta foram superiores a 0,81 e os coeficientes de determinação foram maiores que 0,90.

Quadro 4 - Valores da razão de redução de percurso das rodas dianteiras (s_f), traseiras (s_r) e velocidade de deslocamento do trator (v_a) em função da força aplicada na barra de tração. Os experimentos foram realizados em diferentes superfícies e com a tração dianteira auxiliar ligada

Força aplicada na barra de tração (N)	Valores observados			Valores calculados		
	s_f (%)	s_r (%)	v_a (km·h ⁻¹)	s_f (%)	s_r (%)	v_a (km·h ⁻¹)
Superfície asfaltada						
0	2,2	0,1	5,54	1,4	-0,5	5,57
8498	5,4	3,4	5,28	6,2	4,4	5,17
17566	9,7	7,8	4,99	15,0	13,3	4,55
Superfície de terra						
0	2,5	0,5	5,52	1,5	-0,5	5,57
12179	7,7	5,8	5,13	9,2	7,4	4,94
15378	10,9	9,0	4,93	12,5	10,8	4,72
Superfície de terra gramada						
0	2,4	0,5	5,52	1,5	-0,5	5,57
10391	7,3	5,3	5,16	10,4	8,7	4,86
21352	19,2	17,6	4,44	22,2	20,7	4,11

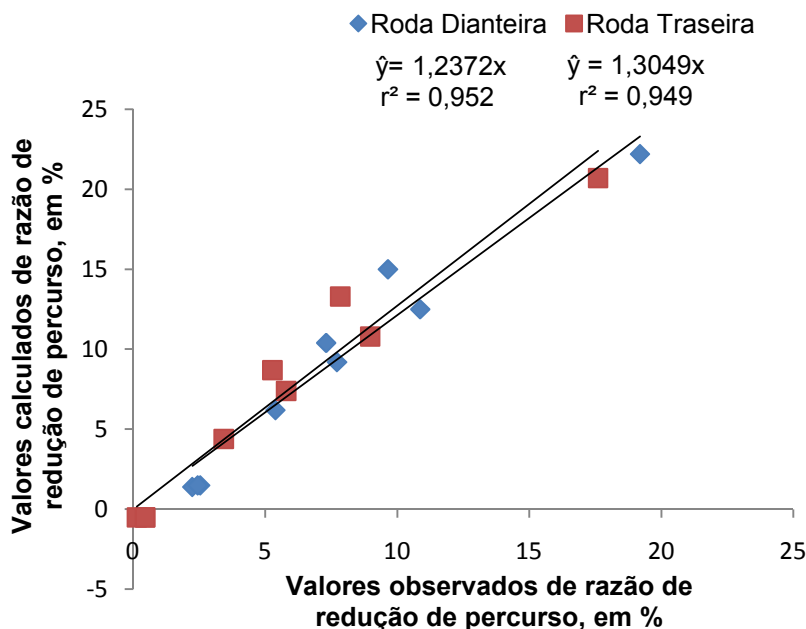


Figura 13 - Comparação entre os valores calculados e os experimentais de razão de redução de percurso nos testes de tração realizados com a tração dianteira ligada.

Observou-se que, exceto na situação de carga nula na barra de tração, os valores de razão de redução de percurso calculados foram sempre maiores que os observados, havendo, portanto, uma tendência de superestimação destes valores pelo programa de simulação em relação aos observados. Este fato pode ser verificado também pela equação linear. Ambos os valores, calculados e medidos, apresentam a razão de redução de percurso das rodas dianteiras maior que a das rodas traseiras, mostrando, assim, o mesmo comportamento. Resultados semelhantes foram encontrados na pesquisa realizada por Santos (2010), em que modelos matemáticos, utilizando-se as teorias de predição C_n , B_n e M_n , estipularam valores de razões de redução de percurso mais elevados em relação aos obtidos experimentalmente.

Os elevados índices de coeficiente de determinação demonstram uma boa relação entre os resultados simulados e os dados obtidos experimentalmente, apesar de valores de razão de redução de percurso não estarem totalmente ajustados. Montovani et al. (1999), em um trabalho que avaliaram o desempenho de um conjunto trator-implemento agrícola, no campo, utilizando-se um sistema eletrônico de medições, consideraram que os resultados obtidos para esforço de tração líquida indicaram tendência de comportamento similar ao dos calculados por meio de fórmulas, com uma correlação de 0,996.

Calculando-se o desvio relativo entre a razão de redução de percurso simulada e observada, verificou-se que 67% dos resultados têm valores acima de 20% de desvio. Um ponto importante a ressaltar é o fato de que os desvios relativos para valores baixos de razão de redução de percurso são significativamente afetados quando se tem uma pequena variação entre a razão de redução de percurso observada e calculada. Para valores altos de razão de redução de percurso, uma variação pequena entre o observado e calculado não impacta tanto quanto em situação contrária.

Ao aplicar o teste “t” verificou-se a aceitação da hipótese alternativa, permitindo concluir que a razão de redução de percurso, medida experimentalmente, e a calculada pelo modelo matemático diferem significativamente, com 5% de probabilidade de erro.

A Figura 14 mostra a relação entre a velocidade de deslocamento do trator observada e a calculada. Os resultados revelam uma coerência alta entre

esses valores, pois diferem muito pouco uns dos outros, o que fica evidenciado pelo coeficiente de inclinação da equação da reta, que está muito próximo de 1, e pelo coeficiente de determinação acima de 94%. Além disso, em todos os testes, o desvio relativo da velocidade de deslocamento observada e calculada ficou em um valor abaixo de 9%. O desvio relativo foi utilizado por Kumar e Pandey (2009) para validar um programa em Visual Basic para previsão do desempenho, em campo, de tratores 4 x 2. Os resultados apresentaram desvio médio sempre menor que 10% em todos os testes realizados, confirmando, segundo os autores, a eficiência do programa.

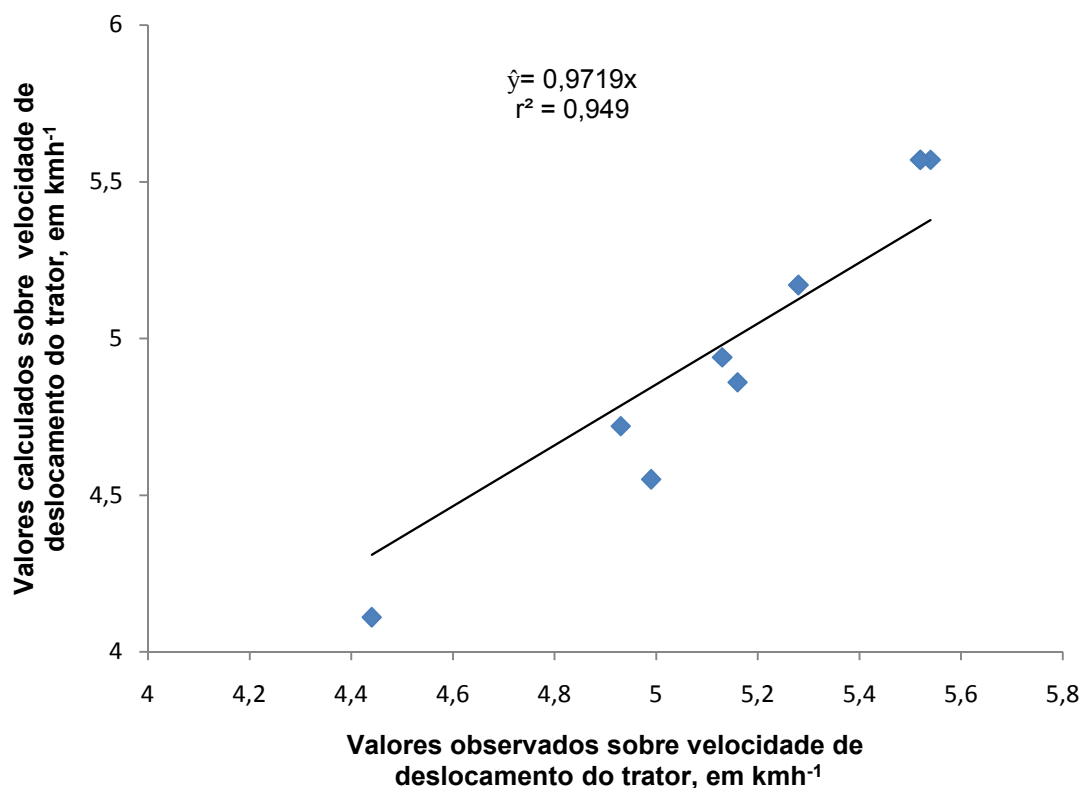


Figura 14 - Comparação entre os valores calculados e os experimentais de velocidade de deslocamento nos testes de tração realizados com a tração dianteira ligada.

Aplicando-se o teste “t”, verificou-se a aceitação da hipótese nula, concluindo-se, estatisticamente, que a velocidade de deslocamento do trator, medida experimentalmente, e a simulada pelo programa não diferem significativamente, com 5% de probabilidade de erro.

Al-Hamed et al. (1994) validaram um modelo de previsão de desempenho de trator com pneus radiais, comparando valores previstos pelo modelo matemático com valores experimentais encontrados na literatura. A validação levou em consideração o desvio relativo entre os valores calculados e os publicados, tido como aceitáveis valores abaixo de 20%. Ao analisarem 41 tratores, verificaram que o teste com 22 deles tiveram resultados na faixa percentual desejada.

Para análise do desempenho do trator em superfícies planas e rígidas, sem a utilização da TDA, os valores calculados e observados da razão de redução de percurso e da velocidade de deslocamento são apresentados no Quadro 5 e nas Figuras 15 e 16.

Quadro 5 - Valores da razão de redução de percurso das rodas traseiras (s_r) e velocidade de deslocamento (v_a) em função da força aplicada na barra de tração. Os experimentos foram realizados em diferentes superfícies e com a tração dianteira auxiliar desligada

Força aplicada na barra de tração (N)	Valores observados		Valores calculados	
	s_r (%)	v_a (km·h ⁻¹)	s_r (%)	v_a (km·h ⁻¹)
Estrada asfaltada				
0	1,0	5,49	1,1	5,49
8498	6,3	5,13	9,8	4,88
16026	37,5	3,38	24,8	3,97
Estrada de terra				
0	1,7	5,46	1,2	5,48
11160	17,7	4,49	13,9	4,61
13491	24,1	4,11	18,4	4,34
Estrada de terra gramada				
0	1,3	5,47	1,2	5,47
10031	12,2	4,79	12,2	4,72
17209	45,1	2,97	30,1	3,67

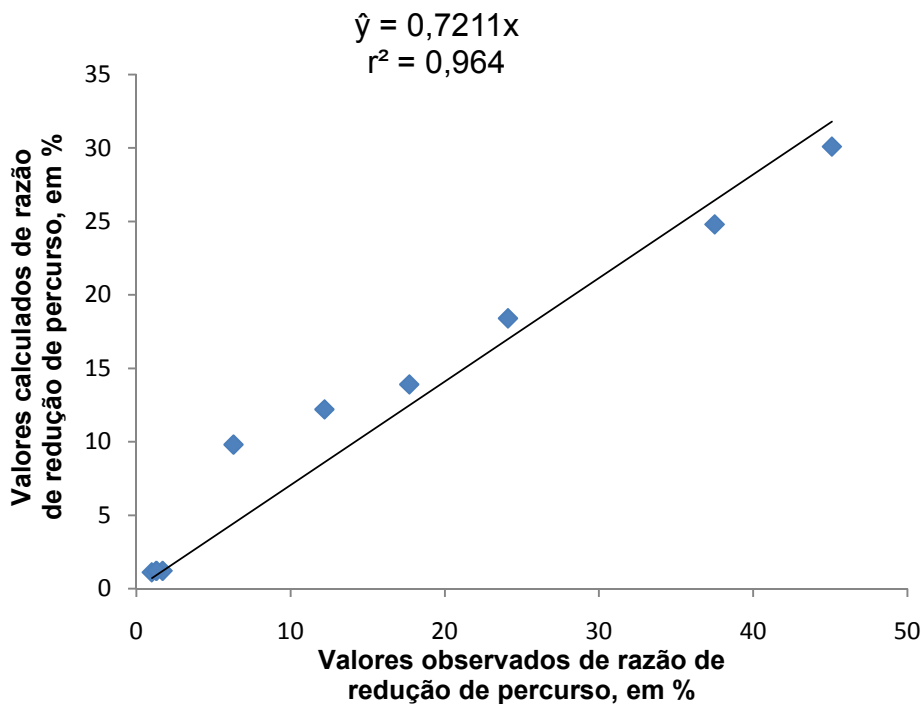


Figura 15 - Comparação entre os valores calculados e os experimentais de razão de redução de percurso nos testes de tração realizados com a tração dianteira desligada.

Ao contrário do que aconteceu com os testes realizados com a utilização da TDA, houve uma subestimação dos valores de razão de redução de percurso quando não se utilizou a tração dianteira auxiliar, como pode ser verificado analisando-se os valores apresentados no Quadro 6 e pela Equação da Figura 15. Observa-se, por estes dados, que 67% dos valores simulados e medidos da razão de redução de percurso apresentaram desvio relativo maior que 20%, e apenas 3 dos 9 testes realizados apresentaram desvio menores que 10%.

Esses resultados mostram uma discrepância significativa entre os valores de razão de redução de percurso observados e os calculados e explicam um valor afastado do coeficiente de inclinação da equação da reta. Ressalta-se, também, que a quantidade de valores superestimados nos testes em que foi utilizada a TDA e os subestimados onde não se usou a mesma foi igual a 67% do total, em cada situação. Isso mostra que o comportamento do modelo matemático é coerente, mesmo que os resultados não sejam

semelhantes. Aplicando-se o teste “t” ao coeficiente de inclinação da reta gerada entre os valores de razão de redução de percurso observados e calculados, verificou-se que eles diferem significativamente ao nível de 5% de erro.

Ao se analisar a TDA ligada e desligada, comparando-se os resultados da razão de redução de percurso, foi possível observar uma diminuição desta quando a TDA está ligada. Fato este confirmado também pelos trabalhos de Fontana et al. (1986), Yanai et al. (1999) e Hilbert et al. (1992). Esses dados confirmam que o modelo está bem ajustado e em concordância com testes experimentais encontrados na literatura.

Com relação à velocidade, os resultados apresentam-se semelhantes aos obtidos quando foi utilizado a TDA, conforme Quadro 5 e Figura 16. O coeficiente de inclinação da equação ficou muito próximo de 1, o coeficiente de determinação igual a 96% e o desvio relativo médio foi de 6,2%. Com isso, conclui-se que há uma concordância bastante razoável da velocidade de deslocamento calculada em relação à velocidade medida.

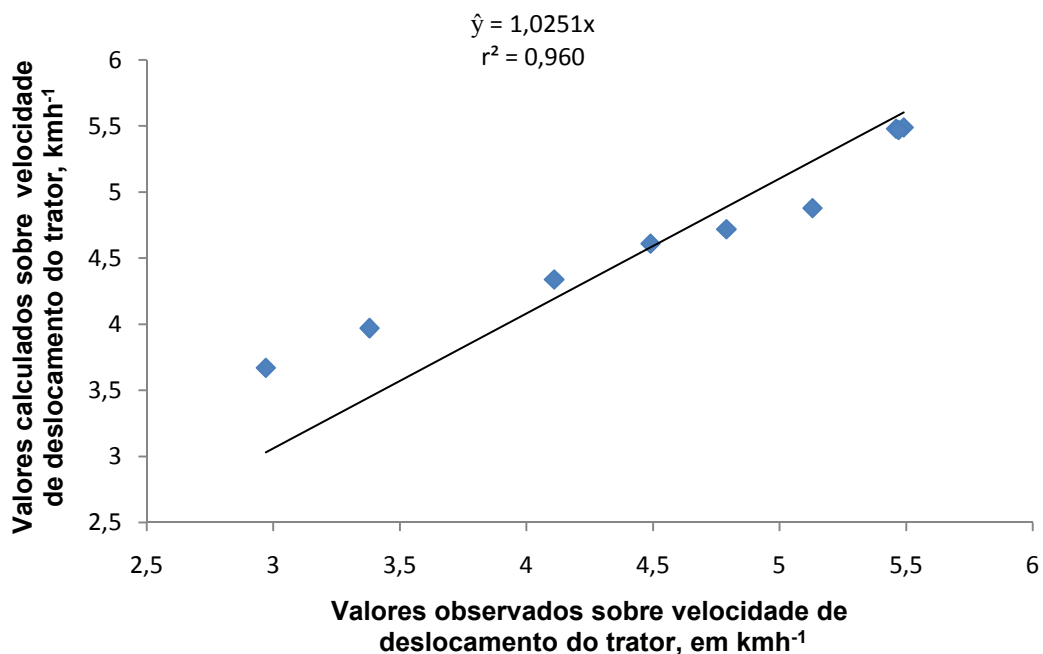


Figura 16 - Comparação entre os valores simulados e os experimentais de velocidade de deslocamento nos testes de tração realizados com a tração dianteira desligada.

Os experimentos realizados em superfícies inclinadas, comparados com os valores simulados pelo programa, são apresentados pelo Quadro 6 e pelas Figuras 17 e 18.

Quadro 6 - Valores de razão de redução de percurso das rodas dianteiras (s_f), traseiras (s_r), velocidade de deslocamento do trator (v_a) e rotação do motor, em superfícies inclinadas - trator com tração dianteira auxiliar ligada e sem aplicação de força na barra de tração

Parcelas e marchas do trator	Inclinação da pista de teste (graus)	Valores observados				Valores calculados			
		Rotação do motor (rpm)	S_f (%)	S_r (%)	V_a ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	Rotação do motor (rpm)	S_f (%)	S_r (%)	V_a ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
P1A1	11,9	2697,89	9,4	7,0	2,26	2679,58	7,0	5,3	2,21
P1A2		2689,86	10,5	7,8	3,21	2660,86	7,1	5,2	3,16
P1A3		2679,88	10,2	7,7	4,38	2638,60	6,9	5,3	4,27
P1B1		2674,39	10,2	7,7	5,24	2622,00	7,1	5,2	5,09
P1B2		2657,41	11,0	8,5	7,46	2577,73	7,1	5,2	7,22
P1B3		2649,14	7,6	5,5	9,15	2525,22	7,1	5,2	9,65
P2A1	15,5	2695,66	10,4	7,3	2,24	2671,27	8,9	7,2	2,16
P2A2		2682,05	11,5	9,0	3,17	2649,87	9,0	7,1	3,08
P2A3		2665,76	12,0	9,5	4,28	2620,47	8,8	7,2	4,16
P2B1		2664,47	10,5	7,7	5,20	2602,42	8,9	7,1	4,95
P2B2		2640,63	12,0	9,5	7,32	2551,81	8,9	7,1	7,00
P2B3		2631,79	12,5	10,1	9,81	2482,46	9,0	7,1	9,31
P3A1	14,7	2694,53	10,9	8,4	2,23	2673,10	8,4	6,7	2,17
P3A2		2683,87	10,5	8,0	3,21	2651,51	8,5	6,7	3,10
P3A3		2675,42	11,1	8,5	4,33	2625,86	8,4	6,7	4,19
P3B1		2667,69	11,0	8,7	5,19	2606,74	8,5	6,7	4,98
P3B2		2650,27	11,2	8,8	7,34	2555,71	8,5	6,7	7,05
P3B3		2634,47	11,8	9,5	9,87	2495,18	8,5	6,6	9,39

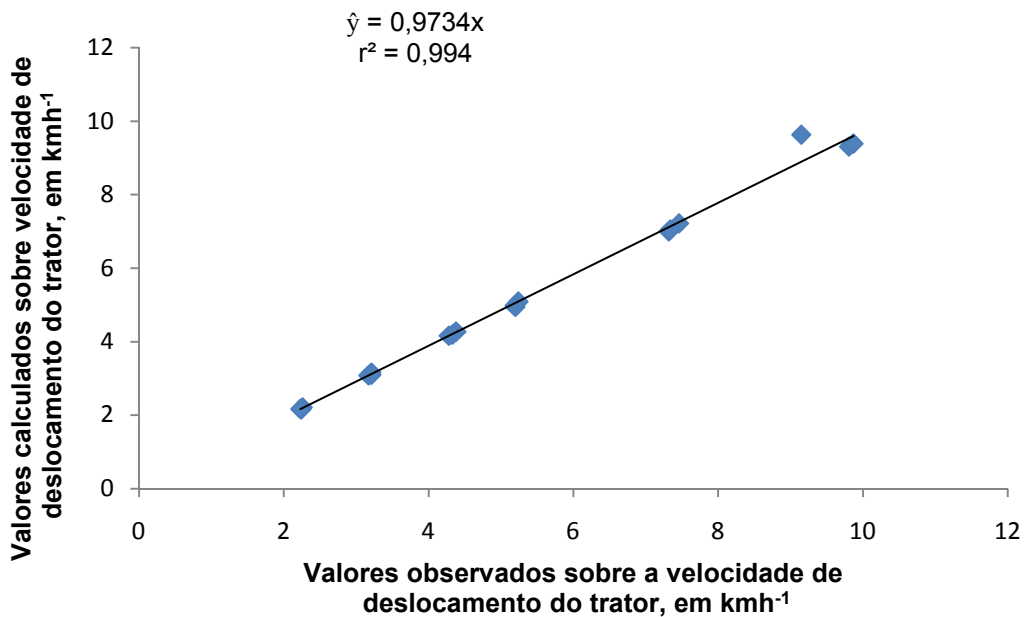


Figura 17 - Comparação entre os valores calculados e os experimentais de velocidade de deslocamento nos testes de tração realizados com a tração dianteira ligada, sem força aplicada na barra de tração e deslocamento em subida de rampa.

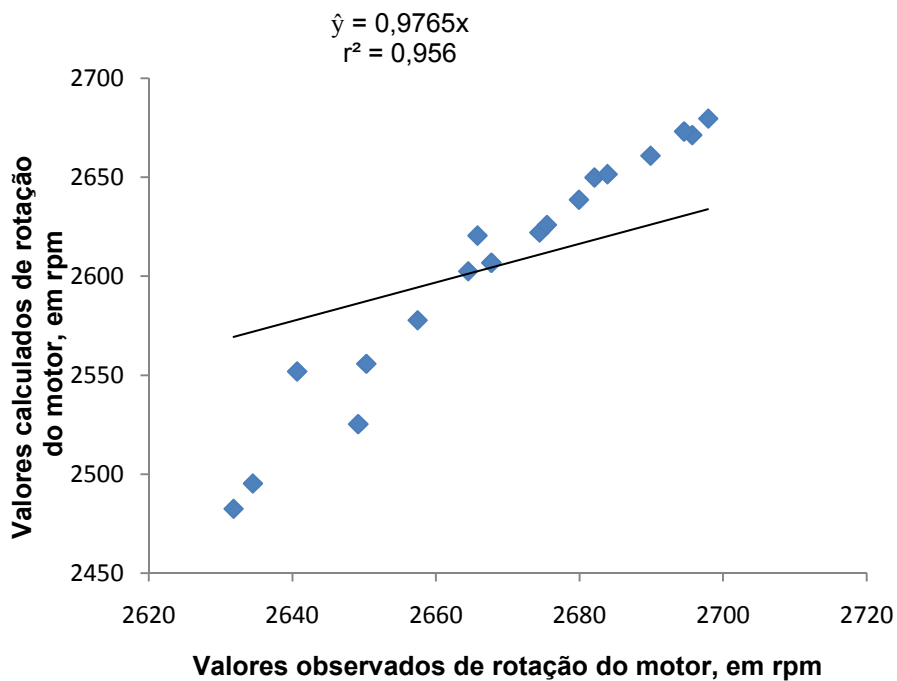


Figura 18 - Comparação entre os valores calculados e os experimentais de rotação do motor nos testes de tração realizados com a tração dianteira ligada, sem força aplicada na barra de tração e deslocamento em subida de rampa.

As rotações do motor e as velocidades de deslocamento do trator, medidas em campo, e as determinadas pelo programa de computador tiveram uma boa concordância, como verificado pelos gráficos acima. Analisando-se os dados do Quadro 6, pôde-se confirmar isso, calculando os seus respectivos desvios relativos médios e máximos que, neste caso, tiveram valores iguais a 2,4% e 3,5% para a rotação do motor, e 5,7% e 5,5% para a velocidade de deslocamento do trator.

Com relação à razão de redução de percurso, observaram-se valores sempre maiores para os dados obtidos em campo. Para as rodas dianteiras, houve desvio médio de 24,2% e desvio máximo de 35,5%; já para as traseiras, 22,8% e 38,8%, respectivamente. Estes valores são melhores que os dos testes em superfícies planas, mas não correspondem aos esperados, em que o ideal seria valores de desvio médio abaixo de 10% e valores máximos menores que 20%. Tais resultados são explicados pelo fato de o teste em campo ter sido realizado em superfície com restos de palhadas de milho, ocasionando razões de redução de percurso experimentais maiores do que as calculadas pelo modelo matemático.

Percebeu-se que os valores medidos mantêm uma distribuição normal semelhante aos dos valores simulados. No Quadro 6, vê-se que os valores simulados de razão de redução de percurso das rodas dianteiras se mantiveram sempre acima aos das rodas traseiras. O mesmo aconteceu com os valores encontrados em campo.

Pôde-se perceber, ainda, que a razão de redução de percurso das rodas dianteiras e traseiras aumenta seu valor quando o experimento é realizado em uma superfície com maior inclinação, conforme ressalta Lanças e Upadhyaya, 1997.

Não foi possível a confecção de gráficos lineares com equações cujos coeficientes de inclinação da reta e de determinação estivessem próximos a 1,00. Entende-se que as inclinações do terreno em que foram realizados os experimentos não variaram de maneira significativa, a ponto de se ter diferenças consideráveis de razão de redução de percurso para as variadas marchas utilizadas.

Para avaliar quais fatores têm maior influência sobre o modelo matemático, foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo

desenvolvido. Os parâmetros de entrada avaliados foram: o índice de cone (IC); o raio de rolamento dos pneus dianteiros e traseiros (rrf e rrr, respectivamente); o peso do trator (Wt); a pressão de insuflação dos pneus dianteiros e traseiros (pinff e pinfr respectivamente). Os parâmetros de saída analisados foram: a razão de redução de percurso das rodas traseiras e dianteiras (sr e sf, respectivamente); a velocidade de deslocamento do trator (va); e a eficiência de produção de tração (EPT). O Quadro 7 mostra os valores de índice de sensibilidade para os experimentos realizados em estrada de terra, sendo que o trator estava com a TDA ligada e foi submetido a diferentes cargas na barra de tração.

Quadro 7 - Índice de sensibilidade de cada uma das saídas do modelo matemático aos parâmetros de entrada: índice de cone (IC), raio de rolamento da roda dianteira (rrf), raio de rolamento da roda traseira (rrr), peso total do trator (Wt), pressão de insuflação dos pneus dianteiros (pinff) e traseiros (pinfr)

Parâmetros	Índice de Sensibilidade (IS)											
	0 N				12179 N				15378 N			
	Sf	Sr	Va	EPT	Sf	Sr	Va	EPT	Sf	Sr	Va	EPT
IC	-0,4	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,0	-0,1	0,0	0,0
rrf	28,1	-58,6	0,4	-10,0	6,7	-3,3	0,3	-0,1	5,1	-2,0	0,3	-0,1
rrr	-22,3	162,0	0,6	0,6	-6,2	3,5	0,7	-0,0	-4,7	2,3	0,7	0,0
Wt	-0,4	0,0	0,0	-0,9	-1,2	-1,5	0,1	0,0	-1,4	-1,6	0,2	0,1
pinff	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
pinfr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Os dados do Quadro 7 revelam que a razão de redução de percurso das rodas dianteiras e traseiras, para qualquer nível de carga na barra de tração, é fortemente influenciada pela variação no raio de rolamento de cada roda e moderadamente influenciada pelo peso total do trator, considerando-se cargas de 12000 e 15000N aplicadas à barra de tração. Já a velocidade de deslocamento do trator é moderadamente influenciada pelo raio de rolamento da roda traseira. Quando o trator não está submetido a cargas na barra de tração, a eficiência de produção de tração é moderadamente influenciada pelo

raio de rolamento das rodas traseiras e pelo peso total do trator. Além disso, é muito influenciada pelo raio de rolamento das rodas dianteiras.

O modelo matemático mostrou-se insensível aos parâmetros: índice de cone e pressão de insuflação dos pneus.

5. CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu concluir que o modelo matemático desenvolvido simulou, de maneira adequada, a capacidade de tração de um trator agrícola. Sendo possível, ainda, as seguintes conclusões:

- O modelo matemático foi validado porque apresentou comportamento semelhante aos dos testes experimentais realizados em campo.
- Os valores altos do coeficiente de determinação e os coeficientes de inclinação da reta próximos de 1 confirmam o comportamento semelhante entre o modelo e os experimentos.
- O modelo matemático foi capaz de simular coerentemente a capacidade de tração do trator para as diferentes superfícies analisadas e cargas aplicadas à barra de tração, pois apresentou a mesma tendência para todas as grandezas analisadas. Ou seja, baixo desvio relativo entre os valores calculados e observados para a velocidade do trator e rotação do motor, e diferença significativa em relação à razão de redução de percurso.
- A realização de testes experimentais de tração, utilizando-se um trator com TDA, possibilitou concluir que o modelo é capaz de realizar simulação com a utilização ou não da tração dianteira auxiliar.
- Há uma superestimação da razão de redução de percurso pelo modelo em relação ao observado em campo, quando os testes são realizados com TDA ligada, e uma subestimação desta grandeza quando a TDA é desligada.

REFERÊNCIAS

- AL-HAMED, S.A.; GRISSE, R.D.; ZOZ, F.M.; VON BARGEN, K. Tractor performance spreadsheet for radial tires. **Computer and Electronics in Agriculture**, v. 10, P. 45-62, 1994.
- AL-HAMED, S.A.; AL-JANOBI, A.A. A program for predicting tractor performance in Visual C++. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 31, p. 137-149, 2001.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS – ASABE. **S296.5**: general terminology for traction of agricultural traction and transport devices and vehicles. 2009. 4 p.
- BARBOSA, J.A.; VIEIRA, L.B.; DIAS, G.P.; JÚNIOR, M.S.D. Desempenho operacional de um trator agrícola equipado alternadamente com pneus radiais e diagonais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 474-480, 2005.
- BRIXIUS, W.W.; WISMER, R.D. **Traction prediction equations for wheeled vehicles**. Moline, Illinois: Technical Center, Deere & Company, 1975. (John Deere Report, 109 - Project 9008).
- CAMPOS, F.H. **Desenvolvimento de um programa computacional destinado à unidade móvel de ensaio na barra de tração (UMEB) para avaliação do desempenho de tratores**. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Jaboticabal, SP.
- CHAVES, H.M.L. Sensibilidade do modelo *Hydrus* aos parâmetros hidráulicos dos solo em diferentes texturas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, 2009.
- EVANGELISTA, A.W.P.; FERREIRA, P.A. Análise de sensibilidade do sistema de drenagem agrícola-SDA mediante variação dos parâmetros de entrada. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 30, n. 1, 2006.
- FIGUEIRA, M.A. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para simulação de sistemas mecânicos multicorpos**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- FONTANA, C.F.; DALLMEYER, A.U.; POZZERA, J.; WEISS, A. Desempenho comparativo de tratores com e sem tração dianteira auxiliar durante a escarificação do solo. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, RS, v. 16, n. 3, p. 237-249, 1986.

FURLANI, C.E.A.; SILVA, R.P. **Tratores agrícolas**. Jaboticabal: LAMMA (Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola), UNESP (Universidade do Estado de São Paulo), 2006.

GABRIEL FILHO, A.; LANÇAS, K.P.; LEITE, F.; ACOSTA, J.J.B.; JESUINO, P.R. Desempenho de trator agrícola em três superfícies de solo e quatro velocidades de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 333-339, 2010.

GABRIEL FILHO, A.G.; SILVA, S.L.; MODOLO, A.J.; SILVEIRA, J.C. Desempenho de um trator operando em solo com diferentes tipos de cobertura vegetal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 781-789, 2004.

GEE-CLOUGH, A. Selection of tyres sizes for agricultural vehicles. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 25, n. 3, p. 261-278, 1980.

GOERING, C.E.; STONE, M.L.; SMITH, D.W.; TURNQUIST, P.K. **Off-road vehicle engineering principles**. St. Joseph: ASAE, 2003.

HILBERT, J.; BALBUENA, R.G.; CLAVERIE, J. Medición y predicción de la resistencia a la rodadura em tractores de tracción simple y tracción delantera asistida en laboreo secundario. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1992, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM/SBEA, 1992. v. 3, p. 1742-1752.

HOFFMANN, B.M. **Parametrização e validação de um modelo de estimativas das exigências e do desempenho de gado de corte**. 2007. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

JESUÍNO, P.R. **Desempenho de um trator agrícola em função do desgaste das garras dos pneus e das condições superficiais do solo**. 2007. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu, SP.

KUMAR, R.; PANDEY, K.P. A program in Visual Basic for predicting haulage and field performance of 2WD tractors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 67, p. 18-26, 2009.

LANÇAS, K.P.; UPADHYAYA, S.K. **Pneus radiais para tratores**: guia para a seleção correta da pressão de inflação. Botucatu: FCA/UNESP, 1997. 33 p. (Boletim Técnico, 1).

LOPES, A.; LANÇAS, K.P.; SILVA, R.P. Desempenho de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 366-370, 2005.

MANTOVANI, E.C.; LEPLATOIS, M.; INAMASSU, R.Y. Automação do processo de avaliação de desempenho de tratores e implementos em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 7, p. 1241-1246, 1999.

MÁRQUES, L. Metodologia para cálculo rápido das dimensões de pneus de tratores agrícolas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 590-603, 2008.

MONTEIRO, L.A. **Desempenho operacional e energético de um trator agrícola em função do tipo de pneu, velocidade de deslocamento, lastragem líquida e condição superficial do solo**. 2008. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu, SP.

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

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

RUSSINI, A. **Projeto, construção e testes de instrumentação eletrônica para avaliação do desempenho de tratores agrícolas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

SAHU, R.K.; RAHEMAN, H. A decision support system on matching and field performance prediction of tractor-implement system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 60, p. 76-86, 2008.

SANTOS, P.M. **Modelagem do desempenho em tração de conjuntos mecanizados visando ao dimensionamento do trator**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

SANTOS, P.M.; SCHLOSSER, J.F.; RUSSINI, A.; CASALI, A.L.; RIBAS, R.L.; JÚNIOR, O.L.R. Validação de teorias de simulação para operações com escarificadores em solo argiloso no planalto do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 1, p. 120-126, 2011.

SARGENT, R.G. Validation and verification of simulation models. In: KUHL, M.E.; STEIGER, N.M.; ARMSTRONG, F.B.; JOINES, J.A. (Eds.). **Proceedings 2005 Winter Simulation Conference**. Orlando, FL, 2005. p. 130-143.

SCHLOSSER, J.F.; LINARES, P.; FILHO, E.G.S. Desempenho de três teorias de simulação do comportamento de um trator agrícola em tração. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 720-726, 2004.

SERRANO, J.M.P.R. Pressão de insuflagem dos pneus no desempenho do conjunto trator-grade de discos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 2, p. 227-233, 2008.

WISMER, R.D.; LUTH, H.J. Off-road traction prediction of wheeled vehicles. **Journal of Terramechanics**, v. 10, n. 2, p. 49-61, 1973.

YANAI, K.; SILVEIRA, G.M.; LANÇAS, K.P.; CORRÊA, I.M.; MAZIERO, J.V.G. Desempenho operacional de um trator com e sem o acionamento da tração dianteira auxiliar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 8, p. 1427-1434, 1999.

ZOZ, F.M.; GRISSO, R.D. Traction and tractor performance. In: AGRICULTURAL EQUIPMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2003, Louisville, Kentucky. **Proceedings...** Louisville, Kentucky: ASAE, 2003. (ASAE Distinguished Lecture, 27).

APÊNDICES

APÊNDICE A

PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, SUPERFÍCIE ASFALTADA COM TDA LIGADA

Dados gerais sobre o sistema			
Símbolo	Descrição	Unidade	Valor
Pneus Dianteiros			
TPf	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nf	Numero de pneus no eixo dianteiro	(-)	2
bf	Largura dos pneus dianteiros	(m)	0,31496
RIMf	Diâmetro do aro das rodas dianteiras	(m)	0,6096
df	Diâmetro externo dos pneus dianteiros indeformados	(m)	1,16332
pinff	Pressao de insuflacao dos pneus dianteiros	(psi)	14
hf	Altura da sessão dos pneus dianteiros	(m)	0,25186
deltaf	Deflexão dos pneus dianteiros	(m)	0,0359177
rf	Raio de rolamento dos pneus dianteiros	(m)	0,5457423
Pneus Traseiros			
TPr	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nr	Numero de pneus no eixo traseiro	(-)	2
br	Largura dos pneus traseiros	(m)	0,46736
RIMr	Diâmetro do aro das rodas traseiras	(m)	0,762
dr	Diâmetro externo dos pneus traseiros indeformados	(m)	1,55194
pinfr	Pressao de insuflacao dos pneus traseiros	(psi)	14
hr	Altura da sessão dos pneus traseiros	(m)	0,36997
deltar	Deflexão dos pneus traseiros	(m)	0,056398671
rrr	Raio de rolamento dos pneus traseiros	(m)	0,719571329
Características Gerais do Trator			
Wt	Peso total do trator	(N)	31392,00
L1	Distancia entre centro dos rodados	(m)	2,60
xcg	Posicao do centro de gravidade do trator no eixo x	(m)	1,21
zcg	Altura do centro de gravidade do trator em relacao ao eixo traseiro	(m)	0,071
Posicao da Barra de Tracao			
xbt	Distancia horizontal entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,85
zbt	Distancia vertical entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,26
Características do Motor			
NP	Numero de pontos que define a curva Te x Ne (minimo de tres, maximo de cinco pontos)	-	4
N1	Rotação do motor no ponto 1	(rpm)	2722
T1	Torque do motor no ponto 1	(N.m)	0
N2	Rotação do motor no ponto 2	(rpm)	2400
T2	Torque do motor no ponto 2	(N.m)	246,6901618
N3	Rotação do motor no ponto 3	(rpm)	2000
T3	Torque do motor no ponto 3	(N.m)	296,0281942
N4	Rotação do motor no ponto 4	(rpm)	1600
T4	Torque do motor no ponto 4	(N.m)	330
N5	Rotação do motor no ponto 5	(rpm)	
T5	Torque do motor no ponto 5	(N.m)	
Dados Relativos a Transmissao de Potencia			
Netam	Eficiência de transmissão de potência entre o motor e os eixos de tracao	(decimal)	0,85
Gf	Relação de transmissão entre o motor e as rodas dianteiras	(-)	98,48
Gr	Relação de transmissão entre o motor e as rodas traseiras	(-)	132,42
Outros Dados Gerais			
IC	Indice de cone do solo	(kPa)	5000
Acel	Aceleracao do motor	(%)	100
Beta	Angulo de inclinacao da superficie do solo	(graus)	0
Alfa	Angulo de aplicacao da forza na barra de tracao	(graus)	0
DeltaP	Incremento de forza aplicada na barra de tracao	(N)	500

APÊNDICE D

PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, SUPERFÍCIE ASFALTADA COM TDA DESLIGADA

Dados gerais sobre o sistema			
Símbolo	Descrição	Unidade	Valor
Pneus Dianteiros			
TPf	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nf	Numero de pneus no eixo dianteiro	(-)	2
bf	Largura dos pneus dianteiros	(m)	0,31496
RIMf	Diametro do aro das rodas dianteiras	(m)	0,6096
df	Diâmetro externo dos pneus dianteiros indeformados	(m)	1,16332
pinff	Pressao de insuflacao dos pneus dianteiros	(psi)	14
hf	Altura da sessão dos pneus dianteiros	(m)	0,25186
deltaf	Deflexão dos pneus dianteiros	(m)	0,0359177
rf	Raio de rolamento dos pneus dianteiros	(m)	0,5457423
Pneus Traseiros			
TPr	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nr	Numero de pneus no eixo traseiro	(-)	2
br	Largura dos pneus traseiros	(m)	0,46736
RIMr	Diametro do aro das rodas traseiras	(m)	0,762
dr	Diâmetro externo dos pneus traseiros indeformados	(m)	1,55194
pinfr	Pressao de insuflacao dos pneus traseiros	(psi)	14
hr	Altura da sessão dos pneus traseiros	(m)	0,36997
deltar	Deflexão dos pneus traseiros	(m)	0,056398671
rrr	Raio de rolamento dos pneus traseiros	(m)	0,719571329
Características Gerais do Trator			
Wt	Peso total do trator	(N)	31392,00
L1	Distancia entre centro dos rodados	(m)	2,60
xcg	Posicao do centro de gravidade do trator no eixo x	(m)	1,21
zcg	Altura do centro de gravidade do trator em relacao ao eixo traseiro	(m)	0,071
Posicao da Barra de Tracao			
xbt	Distancia horizontal entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,85
zbt	Distancia vertical entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,26
Características do Motor			
NP	Numero de pontos que define a curva Te x Ne (minimo de tres, maximo de cinco pontos)	-	4
N1	Rotação do motor no ponto 1	(rpm)	2722
T1	Torque do motor no ponto 1	(N.m)	0
N2	Rotação do motor no ponto 2	(rpm)	2400
T2	Torque do motor no ponto 2	(N.m)	246,6901618
N3	Rotação do motor no ponto 3	(rpm)	2000
T3	Torque do motor no ponto 3	(N.m)	296,0281942
N4	Rotação do motor no ponto 4	(rpm)	1600
T4	Torque do motor no ponto 4	(N.m)	330
N5	Rotação do motor no ponto 5	(rpm)	
T5	Torque do motor no ponto 5	(N.m)	
Dados Relativos a Transmissao de Potencia			
Netam	Eficiência de transmissão de potência entre o motor e os eixos de tracao	(decimal)	0,85
Gf	Relação de transmissão entre o motor e as rodas dianteiras	(-)	98,48
Gr	Relação de transmissão entre o motor e as rodas traseiras	(-)	132,42
Outros Dados Gerais			
IC	indice de cone do solo	(kPa)	5000
Acel	Aceleracao do motor	(%)	100
Beta	Angulo de inclinacao da superficie do solo	(graus)	0
Alfa	Angulo de aplicacao da forca na barra de tracao	(graus)	0
DeltaP	Incremento de forca aplicada na barra de tracao	(N)	500
TracaoD	Situacao da tracao dianteira (ligada ou desligada)	-	desligada

APÊNDICE F

PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, ESTRADA DE TERRA COM TDA LIGADA

Dados gerais sobre o sistema			
Símbolo	Descrição	Unidade	Valor
Pneus Dianteiros			
TPf	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nf	Numero de pneus no eixo dianteiro	(-)	2
bf	Largura dos pneus dianteiros	(m)	0,31496
RIMf	Diâmetro do aro das rodas dianteiras	(m)	0,6096
df	Diâmetro externo dos pneus dianteiros indeformados	(m)	1,16332
pinff	Pressao de insuflacao dos pneus dianteiros	(psi)	14
hf	Altura da sessão dos pneus dianteiros	(m)	0,25186
deltaf	Deflexão dos pneus dianteiros	(m)	0,0359177
rrf	Raio de rolamento dos pneus dianteiros	(m)	0,5457423
Pneus Traseiros			
TPr	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nr	Numero de pneus no eixo traseiro	(-)	2
br	Largura dos pneus traseiros	(m)	0,46736
RIMr	Diâmetro do aro das rodas traseiras	(m)	0,762
dr	Diâmetro externo dos pneus traseiros indeformados	(m)	1,55194
pinfr	Pressao de insuflacao dos pneus traseiros	(psi)	14
hr	Altura da sessão dos pneus traseiros	(m)	0,36997
deltar	Deflexão dos pneus traseiros	(m)	0,056398671
rrr	Raio de rolamento dos pneus traseiros	(m)	0,719571329
Características Gerais do Trator			
Wt	Peso total do trator	(N)	31392,00
L1	Distancia entre centro dos rodados	(m)	2,60
xcg	Posicao do centro de gravidade do trator no eixo x	(m)	1,21
zcg	Altura do centro de gravidade do trator em relacao ao eixo traseiro	(m)	0,071
Posicao da Barra de Tracao			
xbt	Distancia horizontal entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,85
zbt	Distancia vertical entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,26
Características do Motor			
NP	Numero de pontos que define a curva Te x Ne (minimo de tres, maximo de cinco pontos)	-	4
N1	Rotação do motor no ponto 1	(rpm)	2722
T1	Torque do motor no ponto 1	(N.m)	0
N2	Rotação do motor no ponto 2	(rpm)	2400
T2	Torque do motor no ponto 2	(N.m)	246,6901618
N3	Rotação do motor no ponto 3	(rpm)	2000
T3	Torque do motor no ponto 3	(N.m)	296,0281942
N4	Rotação do motor no ponto 4	(rpm)	1600
T4	Torque do motor no ponto 4	(N.m)	330
N5	Rotação do motor no ponto 5	(rpm)	
T5	Torque do motor no ponto 5	(N.m)	
Dados Relativos a Transmissao de Potencia			
Netam	Eficiência de transmissão de potência entre o motor e os eixos de tracao	(decimal)	0,85
Gf	Relação de transmissão entre o motor e as rodas dianteiras	(-)	98,48
Gr	Relação de transmissão entre o motor e as rodas traseiras	(-)	132,42
Outros Dados Gerais			
IC	indice de cone do solo	(kPa)	2500
Acel	Aceleracao do motor	(%)	100
Beta	Angulo de inclinacao da superficie do solo	(graus)	0
Alfa	Angulo de aplicacao da forza na barra de tracao	(graus)	0
DeltaP	Incremento de forza aplicada na barra de tracao	(N)	500

APÊNDICE G

VALORES CALCULADOS PELO PROGRAMA DE DESEMPENHO DE TRATOR, ESTRADA DE TERRA COM TDA LIGADA

Valores Calculados																				
P	Bnf	Bnr	Rf	Rr	TFf	TFr	Ff	Fr	sf	sr	Twf	Twr	Nwf	Nwr	Te	Ne	Pe	va	Pbt	EPT
(N)	(-)	(-)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(-)	(-)	(N.m)	(N.m)	(rpm)	(rpm)	(N.m)	(rpm)	(kW)	(km/h)	(kW)	(decimal)
500	123.04	193.87	14074.1	17317.9	686.6	778.98	1846.84	118.76	0.015	-0.005	1007.9	85.46	27.47	20.43	12.8	2705.29	3.63	5.57	0.77	0.213
1000	124.5	192.05	13909.55	17482.45	678.81	788.88	2035.65	432.04	0.017	-0.002	1110.94	310.88	27.43	20.4	16.03	2701.07	4.54	5.55	1.54	0.34
1500	125.99	190.26	13744.95	17647.05	671.02	798.88	2219.22	750.68	0.02	0	1211.12	540.17	27.38	20.37	19.27	2696.85	5.44	5.52	2.3	0.423
2000	127.52	188.5	13580.33	17811.67	663.23	808.98	2397.54	1074.67	0.022	0.003	1308.44	773.3	27.34	20.33	22.5	2692.63	6.34	5.5	3.05	0.481
2500	129.08	186.77	13415.68	17976.32	655.44	819.18	2570.64	1403.98	0.025	0.006	1402.91	1010.26	27.3	20.3	25.74	2688.41	7.25	5.47	3.8	0.525
3000	130.69	185.08	13251	18141	647.66	829.49	2738.53	1738.62	0.028	0.009	1494.53	1251.06	27.26	20.27	28.97	2684.19	8.14	5.45	4.54	0.558
3500	132.33	183.41	13086.29	18305.71	639.88	839.9	2901.21	2078.57	0.031	0.012	1583.31	1495.68	27.21	20.24	32.2	2679.97	9.04	5.43	5.28	0.584
4000	134.02	181.78	12921.55	18470.45	632.1	850.42	3058.7	2423.83	0.034	0.015	1669.26	1744.12	27.17	20.21	35.44	2675.74	9.93	5.4	6	0.604
4500	135.75	180.17	12756.78	18635.22	624.33	861.07	3211.01	2774.39	0.037	0.018	1752.38	1996.37	27.13	20.17	38.67	2671.52	10.82	5.38	6.72	0.621
5000	137.53	178.59	12591.97	18800.03	616.56	871.83	3358.15	3130.24	0.04	0.021	1832.68	2252.43	27.08	20.14	41.91	2667.3	11.7	5.35	7.43	0.635
5500	139.35	177.04	12427.12	18964.88	608.79	882.71	3500.13	3491.37	0.043	0.024	1910.17	2512.29	27.04	20.11	45.14	2663.08	12.59	5.33	8.14	0.646
6000	141.23	175.51	12262.24	19129.76	601.03	893.72	3636.96	3857.79	0.046	0.027	1984.85	2775.96	27	20.08	48.37	2658.86	13.47	5.3	8.83	0.656
6500	143.15	174.01	12097.33	19294.67	593.27	904.87	3768.66	4229.48	0.049	0.03	2056.72	3043.41	26.96	20.05	51.61	2654.64	14.35	5.27	9.52	0.664
7000	145.13	172.54	11932.37	19459.63	585.52	916.16	3895.24	4606.44	0.053	0.034	2125.8	3314.66	26.91	20.02	54.84	2650.41	15.22	5.25	10.2	0.67
7500	147.16	171.09	11767.37	19624.63	577.76	927.59	4016.69	4988.66	0.056	0.037	2192.08	3589.7	26.87	19.98	58.08	2646.19	16.09	5.22	10.87	0.676
8000	149.26	169.66	11602.33	19789.67	570.02	939.18	4133.05	5376.14	0.059	0.041	2255.58	3868.52	26.83	19.95	61.32	2641.97	16.96	5.19	11.54	0.68
8500	151.41	168.26	11437.24	19954.76	562.27	950.92	4244.31	5768.88	0.063	0.044	2316.3	4151.12	26.78	19.92	64.55	2637.74	17.83	5.16	12.19	0.684
9000	153.63	166.87	11272.11	20119.89	554.54	962.82	4350.48	6166.88	0.067	0.048	2374.24	4437.51	26.74	19.89	67.79	2633.52	18.69	5.14	12.84	0.687
9500	155.91	165.52	11106.93	20285.07	546.8	974.9	4451.58	6570.12	0.07	0.052	2429.42	4727.67	26.7	19.86	71.02	2629.29	19.56	5.11	13.48	0.689
10000	158.27	164.18	10941.7	20450.3	539.07	987.16	4547.62	6978.62	0.074	0.056	2481.83	5021.61	26.66	19.82	74.26	2625.07	20.41	5.08	14.1	0.691
10500	160.7	162.86	10776.41	20615.59	531.35	999.61	4638.59	7392.37	0.078	0.06	2531.48	5319.33	26.61	19.79	77.5	2620.84	21.27	5.05	14.72	0.692
11000	163.2	161.57	10611.07	20780.93	523.63	1012.26	4724.53	7811.37	0.082	0.064	2578.37	5620.84	26.57	19.76	80.74	2616.61	22.12	5.02	15.33	0.693
11500	165.79	160.29	10445.67	20946.33	515.92	1025.12	4805.42	8235.62	0.087	0.068	2622.52	5926.12	26.53	19.73	83.98	2612.38	22.97	4.99	15.93	0.693
12000	168.45	159.03	10280.21	21111.79	508.22	1038.2	4881.28	8665.13	0.091	0.073	2663.92	6235.18	26.48	19.7	87.22	2608.15	23.82	4.95	16.51	0.693
12500	171.21	157.8	10114.68	21277.32	500.52	1051.52	4952.13	9099.91	0.095	0.077	2702.59	6548.03	26.44	19.66	90.46	2603.92	24.67	4.92	17.09	0.693
13000	174.06	156.58	9949.07	21442.93	492.83	1065.08	5017.96	9539.96	0.1	0.082	2738.51	6864.68	26.4	19.63	93.7	2599.69	25.51	4.89	17.65	0.692
13500	177.01	155.38	9783.4	21608.6	485.15	1078.91	5078.78	9985.28	0.105	0.087	2771.71	7185.12	26.36	19.6	96.95	2595.46	26.35	4.85	18.2	0.691
14000	180.06	154.19	9617.64	21774.36	477.48	1093.03	5134.61	10435.9	0.11	0.092	2802.17	7509.37	26.31	19.57	100.19	2591.22	27.19	4.82	18.74	0.689
14500	183.22	153.03	9451.8	21940.2	469.82	1107.44	5185.44	10891.82	0.115	0.097	2829.91	7837.44	26.27	19.54	103.44	2586.98	28.02	4.78	19.26	0.687
15000	186.49	151.88	9285.87	22106.13	462.17	1122.17	5231.29	11353.06	0.12	0.103	2854.93	8169.33	26.23	19.5	106.69	2582.75	28.85	4.75	19.77	0.685
15500	189.89	150.75	9119.84	22272.16	454.53	1137.26	5272.15	11819.64	0.126	0.109	2877.24	8505.07	26.18	19.47	109.93	2578.5	29.68	4.71	20.27	0.683
16000	193.41	149.63	8953.7	22438.3	446.91	1152.72	5308.05	12291.58	0.132	0.115	2896.82	8844.67	26.14	19.44	113.19	2574.26	30.51	4.67	20.75	0.68
16500	197.07	148.53	8787.44	22604.56	439.3	1168.58	5338.97	12768.91	0.138	0.121	2913.7	9188.14	26.1	19.41	116.44	2570.01	31.34	4.63	21.21	0.677
17000	200.87	147.45	8621.06	22770.94	431.71	1184.88	5364.92	13251.67	0.145	0.128	2927.87	9535.52	26.05	19.38	119.69	2565.77	32.16	4.59	21.65	0.673
17500	204.83	146.38	8454.55	22937.45	424.14	1201.67	5385.91	13739.89	0.151	0.134	2939.32	9886.83	26.01	19.34	122.95	2561.51	32.98	4.54	22.08	0.669
18000	208.95	145.32	8287.88	23104.12	416.6	1218.99	5401.94	14233.63	0.158	0.142	2948.07	10242.11	25.97	19.31	126.21	2557.26	33.8	4.5	22.48	0.665
18500	213.24	144.28	8121.04	23270.96	409.07	1236.89	5413.01	14732.95	0.166	0.149	2954.11	10601.41	25.92	19.28	129.48	2553	34.62	4.45	22.86	0.66
19000	217.72	143.25	7954.02	23437.98	401.58	1255.45	5419.12	15237.9	0.174	0.158	2957.44	10964.76	25.88	19.25	132.75	2548.73	35.43	4.4	23.21	0.655
19500	222.39	142.24	7786.79	23605.21	394.13	1274.74	5420.26	15748.59	0.182	0.166	2958.07	11332.24	25.84	19.22	136.02	2544.46	36.24	4.35	23.54	0.649
20000	227.28	141.23	7619.32	23772.68	386.71	1294.85	5416.44	16265.12	0.192	0.176	2955.98	11703.91	25.79	19.18	139.3	2540.18	37.05	4.29	23.83	0.643
20500	232.4	140.24	7451.58	23940.42	379.35	1315.91	5407.63	16787.61	0.201	0.186	2951.17	12079.89	25.75	19.15	142.58	2535.9	37.86	4.23	24.09	0.636
21000	237.76	139.27	7283.53	24108.47	372.05	1338.06	5393.84	17316.25	0.212	0.196	2943.65	12460.28	25.71	19.12	145.87	2531.6	38.67	4.17	24.31	0.629
21500	243.39	138.3	7115.11	24276.89	364.82	1361.48	5375.04	17851.23	0.224	0.208	2933.39	12845.24	25.66	19.09	149.17	2527.3	39.48	4.1	24.48	0.62
22000	249.31	137.34	6946.23	24445.77	357.68	1386.43	5351.21	18392.89	0.236	0.221	2920.38	13235	25.62	19.05	152.47	2522.98	40.28	4.03	24.6	0.611
22500	255.54	136.4	6776.87	24615.13	350.65	1413.21	5322.34	18941.48	0.25	0.235	2904.63	13629.75	25.58	19.02	155.79	2518.65	41.09	3.94	24.65	0.6
23000	262.12	135.46	6606.78	24785.22	343.78	1442.28	5288.34	19497.71	0.266	0.252	2886.07	14029.99	25.53	18.99	159.13	2514.3	41.9	3.85	24.63	0.588
23500	269.07	134.54	6435.94	24956.06	337.12	1474.27	5249.22	20062.09	0.284	0.27	2864.72	14436.11	25.49	18.95	162.48	2509.92	42.71	3.75	24.5	0.574
24000	276.47	133.61	6263.75	25128.25	330.73	1510.18	5204.69	20636.22	0.305	0.292	2840.42	14849.23	25.44	18.92	165.86	2505.51	43.52	3.64	24.24	0.557
24500	284.35	132.7	6090.09	25301.91	324.77	1551.58	5154.8	21221.55	0.331	0.318	2813.19	15270.42	25.4	18.89	169.28	2501.05	44.33	3.5	23.79	0.537
26114	311.63	129.96	5557.03	25834.97	395.94	2353.75	5109.55	23754.55	0.99	0.99	2788.5	17093.09	25.19	18.73	185.17	2480.3	48.1	0.05	0.38	0.008

Execute

APÊNDICE H

PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, ESTRADA DE TERRA COM TDA DESLIGADA

Dados gerais sobre o sistema			
Símbolo	Descrição	Unidade	Valor
Pneus Dianteiros			
TPf	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nf	Numero de pneus no eixo dianteiro	(-)	2
bf	Largura dos pneus dianteiros	(m)	0,31496
RIMf	Diâmetro do aro das rodas dianteiras	(m)	0,6096
df	Diâmetro externo dos pneus dianteiros indeformados	(m)	1,16332
pinff	Pressao de insuflacao dos pneus dianteiros	(psi)	14
hf	Altura da sessão dos pneus dianteiros	(m)	0,25186
deltaf	Deflexão dos pneus dianteiros	(m)	0,0359177
rrf	Raio de rolamento dos pneus dianteiros	(m)	0,5457423
Pneus Traseiros			
TPr	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nr	Numero de pneus no eixo traseiro	(-)	2
br	Largura dos pneus traseiros	(m)	0,46736
RIMr	Diâmetro do aro das rodas traseiras	(m)	0,762
dr	Diâmetro externo dos pneus traseiros indeformados	(m)	1,55194
pinfr	Pressao de insuflacao dos pneus traseiros	(psi)	14
hr	Altura da sessão dos pneus traseiros	(m)	0,36997
deltar	Deflexão dos pneus traseiros	(m)	0,056398671
rrr	Raio de rolamento dos pneus traseiros	(m)	0,719571329
Características Gerais do Trator			
Wt	Peso total do trator	(N)	31392,00
L1	Distancia entre centro dos rodados	(m)	2,60
xcg	Posicao do centro de gravidade do trator no eixo x	(m)	1,21
zcg	Altura do centro de gravidade do trator em relacao ao eixo traseiro	(m)	0,071
Posicao da Barra de Tracao			
xbt	Distancia horizontal entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,85
zbt	Distancia vertical entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,26
Características do Motor			
NP	Numero de pontos que define a curva Te x Ne (minimo de tres, maximo de cinco pontos)	-	4
N1	Rotação do motor no ponto 1	(rpm)	2722
T1	Torque do motor no ponto 1	(N.m)	0
N2	Rotação do motor no ponto 2	(rpm)	2400
T2	Torque do motor no ponto 2	(N.m)	246,6901618
N3	Rotação do motor no ponto 3	(rpm)	2000
T3	Torque do motor no ponto 3	(N.m)	296,0281942
N4	Rotação do motor no ponto 4	(rpm)	1600
T4	Torque do motor no ponto 4	(N.m)	330
N5	Rotação do motor no ponto 5	(rpm)	
T5	Torque do motor no ponto 5	(N.m)	
Dados Relativos a Transmissao de Potencia			
Netam	Eficiência de transmissão de potência entre o motor e os eixos de tracao	(decimal)	0,85
Gf	Relação de transmissão entre o motor e as rodas dianteiras	(-)	98,48
Gr	Relação de transmissão entre o motor e as rodas traseiras	(-)	132,42
Outros Dados Gerais			
IC	Indice de cone do solo	(kPa)	2500
Acel	Aceleracao do motor	(%)	100
Beta	Angulo de inclinacao da superficie do solo	(graus)	0
Alfa	Angulo de aplicacao da forza na barra de tracao	(graus)	0
DeltaP	Incremento de forza aplicada na barra de tracao	(N)	10
TracaoD	Situacao da tracao dianteira (ligada ou desligada)	-	desligada

APÊNDICE J

PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, ESTRADA DE TERRA COM GRAMA TDA LIGADA

Dados gerais sobre o sistema			
Símbolo	Descrição	Unidade	Valor
Pneus Dianteiros			
TPf	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nf	Numero de pneus no eixo dianteiro	(-)	2
bf	Largura dos pneus dianteiros	(m)	0,31496
RIMf	Diâmetro do aro das rodas dianteiras	(m)	0,6096
df	Diâmetro externo dos pneus dianteiros indeformados	(m)	1,16332
pinff	Pressao de insuflacao dos pneus dianteiros	(psi)	14
hf	Altura da sessão dos pneus dianteiros	(m)	0,25186
deltaf	Deflexão dos pneus dianteiros	(m)	0,0359177
rf	Raio de rolamento dos pneus dianteiros	(m)	0,5457423
Pneus Traseiros			
TPr	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nr	Numero de pneus no eixo traseiro	(-)	2
br	Largura dos pneus traseiros	(m)	0,46736
RIMr	Diâmetro do aro das rodas traseiras	(m)	0,762
dr	Diâmetro externo dos pneus traseiros indeformados	(m)	1,55194
pinfr	Pressao de insuflacao dos pneus traseiros	(psi)	14
hr	Altura da sessão dos pneus traseiros	(m)	0,36997
deltar	Deflexão dos pneus traseiros	(m)	0,056398671
rrr	Raio de rolamento dos pneus traseiros	(m)	0,719571329
Características Gerais do Trator			
Wt	Peso total do trator	(N)	31392,00
L1	Distancia entre centro dos rodados	(m)	2,60
xcg	Posicao do centro de gravidade do trator no eixo x	(m)	1,21
zcg	Altura do centro de gravidade do trator em relacao ao eixo traseiro	(m)	0,071
Posicao da Barra de Tracao			
xbt	Distancia horizontal entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,85
zbt	Distancia vertical entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,26
Características do Motor			
NP	Numero de pontos que define a curva Te x Ne (minimo de tres, maximo de cinco pontos)	-	4
N1	Rotação do motor no ponto 1	(rpm)	2722
T1	Torque do motor no ponto 1	(N.m)	0
N2	Rotação do motor no ponto 2	(rpm)	2400
T2	Torque do motor no ponto 2	(N.m)	246,6901618
N3	Rotação do motor no ponto 3	(rpm)	2000
T3	Torque do motor no ponto 3	(N.m)	296,0281942
N4	Rotação do motor no ponto 4	(rpm)	1600
T4	Torque do motor no ponto 4	(N.m)	330
N5	Rotação do motor no ponto 5	(rpm)	
T5	Torque do motor no ponto 5	(N.m)	
Dados Relativos a Transmissao de Potencia			
Netam	Eficiência de transmissão de potência entre o motor e os eixos de tracao	(decimal)	0,85
Gf	Relação de transmissão entre o motor e as rodas dianteiras	(-)	98,48
Gr	Relação de transmissão entre o motor e as rodas traseiras	(-)	132,42
Outros Dados Gerais			
IC	Índice de cone do solo	(kPa)	2000
Acel	Aceleracao do motor	(%)	100
Beta	Angulo de inclinacao da superficie do solo	(graus)	0
Alfa	Angulo de aplicacao da forza na barra de tracao	(graus)	0
DeltaP	Incremento de forza aplicada na barra de tracao	(N)	10

APÊNDICE L

PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRATOR, DADOS GERAIS SOBRE O SISTEMA, ESTRADA DE TERRA COM GRAMA TDA DESLIGADA

Dados gerais sobre o sistema			
Símbolo	Descrição	Unidade	Valor
Pneus Dianteiros			
TPf	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nf	Numero de pneus no eixo dianteiro	(-)	2
bf	Largura dos pneus dianteiros	(m)	0,31496
RIMf	Diâmetro do aro das rodas dianteiras	(m)	0,6096
df	Diâmetro externo dos pneus dianteiros indeformados	(m)	1,16332
pinff	Pressao de insuflacao dos pneus dianteiros	(psi)	14
hf	Altura da sessão dos pneus dianteiros	(m)	0,25186
deltaf	Deflexão dos pneus dianteiros	(m)	0,0359177
rrf	Raio de rolamento dos pneus dianteiros	(m)	0,5457423
Pneus Traseiros			
TPr	Tipo de pneu	(-)	diagonal
nr	Numero de pneus no eixo traseiro	(-)	2
br	Largura dos pneus traseiros	(m)	0,46736
RIMr	Diâmetro do aro das rodas traseiras	(m)	0,762
dr	Diâmetro externo dos pneus traseiros indeformados	(m)	1,55194
pinfr	Pressao de insuflacao dos pneus traseiros	(psi)	14
hr	Altura da sessão dos pneus traseiros	(m)	0,36997
deltar	Deflexão dos pneus traseiros	(m)	0,056398671
rrr	Raio de rolamento dos pneus traseiros	(m)	0,719571329
Características Gerais do Trator			
Wt	Peso total do trator	(N)	31392,00
L1	Distancia entre centro dos rodados	(m)	2,60
xcg	Posicao do centro de gravidade do trator no eixo x	(m)	1,21
zcg	Altura do centro de gravidade do trator em relacao ao eixo traseiro	(m)	0,071
Posicao da Barra de Tracao			
xbt	Distancia horizontal entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,85
zbt	Distancia vertical entre a barra de tracao e o centro da roda traseira	(m)	0,26
Características do Motor			
NP	Numero de pontos que define a curva Te x Ne (minimo de tres, maximo de cinco pontos)	-	4
N1	Rotação do motor no ponto 1	(rpm)	2722
T1	Torque do motor no ponto 1	(N.m)	0
N2	Rotação do motor no ponto 2	(rpm)	2400
T2	Torque do motor no ponto 2	(N.m)	246,6901618
N3	Rotação do motor no ponto 3	(rpm)	2000
T3	Torque do motor no ponto 3	(N.m)	296,0281942
N4	Rotação do motor no ponto 4	(rpm)	1600
T4	Torque do motor no ponto 4	(N.m)	330
N5	Rotação do motor no ponto 5	(rpm)	
T5	Torque do motor no ponto 5	(N.m)	
Dados Relativos a Transmissao de Potencia			
Netam	Eficiência de transmissão de potência entre o motor e os eixos de tracao	(decimal)	0,85
Gf	Relação de transmissão entre o motor e as rodas dianteiras	(-)	98,48
Gr	Relação de transmissão entre o motor e as rodas traseiras	(-)	132,42
Outros Dados Gerais			
IC	Indice de cone do solo	(kPa)	2000
Acel	Aceleracao do motor	(%)	100
Beta	Angulo de inclinacao da superficie do solo	(graus)	0
Alfa	Angulo de aplicacao da forca na barra de tracao	(graus)	0
DeltaP	Incremento de forca aplicada na barra de tracao	(N)	500

APÊNDICE M

VALORES CALCULADOS PELO PROGRAMA DE DESEMPENHO DE TRATOR, ESTRADA DE TERRA COM GRAMA TDA DESLIGADA

Valores Calculados																				
P	Bnf	Bnr	Rf	Rr	Tf	Tfr	Ff	Fr	sf	sr	Twf	Twr	Nwf	Nwr	Te	Ne	Pe	va	Pbt	EPT
(N)	(-)	(-)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(-)	(-)	(N.m)	(N.m)	(rpm)	(rpm)	(N.m)	(rpm)	(kW)	(km/h)	(kW)	(decimal)
500	98.52	154.99	14061.68	17330.32	715.71	801.79	1866.95	150.57	0.015	-0.005	1018.87	108.34	27.47	20.43	13.13	2704.86	3.72	5.57	0.77	0.208
1000	99.69	153.63	13897.05	17494.95	707.42	812.32	2055.34	464.41	0.017	-0.002	1121.68	334.18	27.42	20.39	16.37	2700.63	4.63	5.54	1.54	0.333
1500	100.88	152.1	13732.38	17659.62	699.14	822.97	2238.48	783.62	0.02	0.001	1221.63	563.87	27.38	20.36	19.6	2696.41	5.54	5.52	2.3	0.416
2000	102.11	150.69	13567.68	17824.32	690.86	833.73	2416.4	1108.19	0.023	0.003	1318.73	797.42	27.34	20.33	22.84	2692.19	6.44	5.5	3.05	0.474
2500	103.36	149.31	13402.95	17989.05	682.59	844.6	2589.09	1438.11	0.025	0.006	1412.97	1034.82	27.29	20.3	26.07	2687.97	7.34	5.47	3.8	0.518
3000	104.65	147.96	13238.18	18153.82	674.33	855.59	2756.56	1773.36	0.028	0.009	1504.37	1276.06	27.25	20.27	29.31	2683.74	8.24	5.45	4.54	0.551
3500	105.97	146.63	13073.37	18318.63	666.07	866.71	2918.84	2113.95	0.031	0.012	1592.93	1521.14	27.21	20.24	32.54	2679.52	9.13	5.42	5.27	0.577
4000	107.32	145.32	12908.53	18483.47	657.83	877.96	3075.93	2459.86	0.034	0.015	1678.66	1770.04	27.17	20.2	35.78	2675.3	10.02	5.4	6	0.598
4500	108.71	144.03	12743.65	18648.35	649.59	889.34	3227.84	2811.09	0.037	0.018	1761.57	2022.78	27.12	20.17	39.02	2671.07	10.91	5.37	6.72	0.616
5000	110.14	142.77	12578.73	18813.27	641.35	900.85	3374.58	3167.63	0.04	0.021	1841.65	2279.34	27.08	20.14	42.25	2666.85	11.8	5.35	7.43	0.63
5500	111.6	141.53	12413.77	18978.23	633.13	912.51	3516.16	3529.48	0.043	0.024	1918.92	2539.71	27.04	20.11	45.49	2662.63	12.68	5.32	8.13	0.641
6000	113.1	140.31	12248.76	19143.24	624.91	924.32	3652.6	3896.63	0.046	0.027	1993.38	2803.9	26.99	20.08	48.72	2658.4	13.56	5.3	8.83	0.651
6500	114.65	139.11	12083.72	19308.28	616.71	936.28	3783.9	4269.08	0.05	0.031	2065.04	3071.91	26.95	20.04	51.96	2654.18	14.44	5.27	9.52	0.659
7000	116.24	137.93	11918.62	19473.38	608.51	948.39	3910.08	4646.82	0.053	0.034	2133.9	3343.72	26.91	20.01	55.2	2649.95	15.32	5.24	10.2	0.666
7500	117.87	136.77	11753.48	19638.52	600.31	960.68	4031.14	5029.85	0.056	0.038	2199.96	3619.34	26.87	19.98	58.44	2645.72	16.19	5.22	10.87	0.671
8000	119.55	135.63	11588.29	19803.71	592.13	973.13	4147.09	5418.17	0.06	0.041	2263.24	3898.76	26.82	19.95	61.68	2641.5	17.06	5.19	11.53	0.676
8500	121.28	134.51	11423.05	19968.95	583.96	985.77	4257.95	5811.77	0.063	0.045	2323.74	4181.99	26.78	19.92	64.91	2637.27	17.93	5.16	12.18	0.68
9000	123.06	133.4	11257.75	20134.25	575.79	998.59	4363.72	6210.66	0.067	0.049	2381.47	4469.01	26.74	19.88	68.15	2633.04	18.79	5.13	12.83	0.683
9500	124.9	132.32	11092.4	20299.6	567.64	1011.61	4464.42	6614.83	0.071	0.052	2436.42	4759.84	26.69	19.85	71.39	2628.81	19.65	5.1	13.47	0.685
10000	126.79	131.25	10926.99	20465.01	559.49	1024.84	4560.04	7024.29	0.075	0.056	2488.61	5054.48	26.65	19.82	74.64	2624.58	20.51	5.07	14.09	0.687
10500	128.74	130.2	10761.51	20630.49	551.36	1038.28	4650.61	7439.03	0.079	0.06	2538.03	5352.91	26.61	19.79	77.88	2620.35	21.37	5.04	14.71	0.688
11000	130.75	129.16	10595.97	20796.03	543.23	1051.96	4736.12	7859.06	0.083	0.065	2584.7	5655.16	26.56	19.76	81.12	2616.12	22.22	5.01	15.32	0.689
11500	132.82	128.14	10430.37	20961.63	535.12	1065.87	4816.59	8284.39	0.087	0.069	2628.62	5961.21	26.52	19.72	84.36	2611.88	23.07	4.98	15.91	0.69
12000	134.97	127.13	10264.69	21127.31	527.01	1080.03	4892.03	8715.02	0.091	0.073	2669.79	6271.08	26.48	19.69	87.61	2607.65	23.92	4.95	16.5	0.69
12500	137.18	126.14	10098.93	21293.07	518.92	1094.47	4962.44	9150.95	0.096	0.078	2708.21	6584.76	26.44	19.66	90.85	2603.41	24.77	4.92	17.07	0.689
13000	139.47	125.17	9933.09	21458.91	510.85	1109.18	5027.83	9592.2	0.101	0.083	2743.9	6902.27	26.39	19.63	94.1	2599.17	25.61	4.88	17.64	0.689
13500	141.84	124.21	9767.17	21624.83	502.78	1124.2	5088.2	10038.78	0.105	0.088	2776.85	7223.62	26.35	19.6	97.35	2594.93	26.45	4.85	18.19	0.687
14000	144.29	123.26	9601.15	21790.85	494.73	1139.54	5143.57	10490.71	0.11	0.093	2807.06	7548.81	26.31	19.56	100.6	2590.69	27.29	4.81	18.72	0.686
14500	146.83	122.33	9435.03	21956.97	486.7	1155.23	5193.93	10947.99	0.116	0.098	2834.55	7877.86	26.26	19.53	103.85	2586.44	28.13	4.78	19.25	0.684
15000	149.47	121.41	9268.81	22123.19	478.68	1171.28	5239.3	11410.66	0.121	0.104	2859.31	8210.78	26.22	19.5	107.11	2582.2	28.96	4.74	19.75	0.682
15500	152.2	120.5	9102.48	22289.52	470.69	1187.73	5279.68	11878.73	0.127	0.11	2881.35	8547.59	26.18	19.47	110.36	2577.95	29.79	4.7	20.25	0.68
16000	155.03	119.61	8936.02	22455.98	462.71	1204.6	5315.08	12352.23	0.133	0.116	2900.66	8888.31	26.13	19.44	113.62	2573.69	30.62	4.66	20.73	0.677
16500	157.98	118.73	8769.43	22622.57	454.75	1221.95	5345.48	12831.21	0.139	0.122	2917.26	9232.97	26.09	19.4	116.88	2569.44	31.45	4.62	21.19	0.674
17000	161.04	117.86	8602.7	22789.3	446.82	1239.79	5370.91	13315.69	0.145	0.128	2931.13	9581.59	26.05	19.37	120.14	2565.18	32.27	4.58	21.63	0.67
17500	164.23	117.01	8435.81	22956.19	438.91	1258.19	5391.36	13805.74	0.152	0.135	2942.29	9934.21	26	19.34	123.41	2560.92	33.1	4.54	22.05	0.666
18000	167.55	116.16	8268.74	23123.26	431.04	1277.2	5406.83	14301.4	0.159	0.143	2950.74	10290.88	25.96	19.31	126.68	2556.65	33.92	4.49	22.45	0.662
18500	171	115.33	8101.48	23290.52	423.19	1296.88	5417.32	14802.75	0.167	0.151	2956.46	10651.63	25.92	19.27	129.95	2552.38	34.73	4.44	22.82	0.657
19000	174.61	114.5	7934.01	23457.99	415.39	1317.31	5422.82	15309.87	0.175	0.159	2959.46	11016.54	25.87	19.24	133.23	2548.1	35.55	4.39	23.17	0.652
19500	178.38	113.69	7766.29	23625.71	407.63	1338.58	5423.34	15822.86	0.184	0.168	2959.75	11385.68	25.83	19.21	136.51	2543.81	36.37	4.34	23.49	0.646
20000	182.33	112.89	7598.3	23793.7	399.93	1360.81	5418.86	16341.86	0.193	0.177	2957.3	11759.13	25.79	19.18	139.8	2539.52	37.18	4.28	23.78	0.64
20500	186.46	112.09	7430	23962	392.28	1384.13	5409.38	16867.02	0.203	0.187	2952.13	12137.02	25.74	19.15	143.1	2535.22	37.99	4.22	24.04	0.633
21000	190.79	111.31	7261.33	24130.67	384.71	1408.71	5394.87	17398.53	0.214	0.198	2944.21	12519.48	25.7	19.11	146.4	2530.91	38.8	4.16	24.25	0.625
21500	195.34	110.54	7092.23	24299.77	377.23	1434.78	5375.32	17936.66	0.226	0.21	2933.54	12906.71	25.66	19.08	149.71	2526.58	39.61	4.09	24.41	0.616
22000	200.13	109.77	6922.59	24469.41	369.86	1462.63	5350.68	18481.8	0.239	0.223	2920.09	13298.97	25.61	19.05	153.04	2522.24	40.42	4.01	24.52	0.607
22500	205.17	109.01	6752.39	24639.61	362.63	1492.64	5320.97	19034.26	0.253	0.238	2903.88	13696.5	25.57	19.01	156.38	2517.89	41.23	3.93	24.56	0.596
23000	210.51	108.26	6581.26	24810.74	355.58	1525.36	5285.96	19594.84	0.269	0.255	2884.77	14099.89	25.52	18.98	159.73	2513.51	42.04	3.84	24.52	0.583
23500	216.16	107.51	6409.2	24982.8	348.78	1561.59	5245.81	20164.56	0.288	0.274	2862.86	14509.84	25.48	18.95	163.11	2509.09	42.86	3.73	24.36	0.568
24000	222.17	106.77	6235.75	25156.25	342.34	1602.55	5200.25	20744.64	0.31	0.296	2838	14927.25	25.43	18.91	166.52	2504.64	43.68	3.61	24.07	0.551
24500	228.6	106.03	6060.32	25331.68	336.43	1650.33	5149.07	21337.68	0.337	0.324	2810.07	15353.99	25.39	18.88	169.98	2500.13	44.5	3.46	23.57	0.53
25910	247.66	104.12	5593.92	25798.08	422.3	2530.96	5143.47	23719.99	0.99	0.99	2807.01	17068.23	25.19	18.73	185.17	2480.3	48.1	0.05	0.37	0.008

Execute

APÊNDICE O

PARTE DOS DADOS COLETADOS PELO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (SPIDER8) E PROCESSADO PELO PROGRAMA CATMAN, TESTE REALIZADO EM ESTRADA DE TERRA, COM CARGA NA BARRA DE TRAÇÃO E TDA LIGADA

31/08/2011					
09:10					
CHANNELS: 6					
SEPARATOR: 9					
MAXLINES: 14800					
<u>_CH1_Time base</u>	<u>_CH2_Velocidade</u>	<u>_CH3_Velocidade</u>	<u>_CH4_Rotação</u>	<u>_CH5_velocidade</u>	<u>_CH6_Força</u>
	Roda Traseira	Roda Dianteira	TDP	Trator	Barra de Tração
s	km/h	km/h	rpm	km/h	N
08/31/11-09:09:24	08/31/11-09:09:24	08/31/11-09:09:24	08/31/11-09:09:24	08/31/11-09:09:24	08/31/11-09:09:24
0,00E+00	5,25E+00	5,79E+00	6,70E+02	4,935	15471,351
1,25E-03	5,25E+00	5,65E+00	6,70E+02	4,935	15465,465
2,50E-03	5,25E+00	5,51E+00	6,65E+02	4,935	15412,491
3,75E-03	5,25E+00	5,38E+00	6,65E+02	4,935	15371,289
5,00E-03	5,25E+00	5,36E+00	6,65E+02	4,935	15330,087
6,25E-03	5,25E+00	5,36E+00	6,65E+02	4,935	15338,916
7,50E-03	5,25E+00	5,36E+00	6,65E+02	4,935	15303,6
8,75E-03	5,25E+00	5,36E+00	6,65E+02	4,935	15230,025
1,00E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,65E+02	4,921	15038,73
1,13E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,65E+02	4,921	14959,269
1,25E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,65E+02	4,921	14965,155
1,38E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,65E+02	4,921	14935,725
1,50E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,65E+02	4,921	14897,466
1,63E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,65E+02	4,921	14873,922
1,75E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,906	14862,15
1,88E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,906	14823,891
2,00E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,906	14820,948
2,13E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,906	14794,461
2,25E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,906	14750,316
2,38E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,906	14747,373
2,50E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,878	14762,088
2,63E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,878	14753,259
2,75E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,878	14750,316
2,88E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,878	14762,088
3,00E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,878	14770,917
3,13E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,66E+02	4,878	14773,86
3,25E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,64E+02	4,878	14779,746
3,38E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,64E+02	4,878	14765,031
3,50E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,64E+02	4,878	14776,803
3,63E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,64E+02	4,878	14806,233
3,75E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,64E+02	4,878	14806,233
3,88E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,64E+02	4,863	14785,632
4,00E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,64E+02	4,863	14773,86
4,13E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,64E+02	4,863	14791,518
4,25E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,64E+02	4,863	14797,404
4,38E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,64E+02	4,863	14806,233
4,50E-02	5,25E+00	5,36E+00	6,64E+02	4,863	14818,005

APÊNDICE P

GRÁFICOS GERADOS PELO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE TRATOR

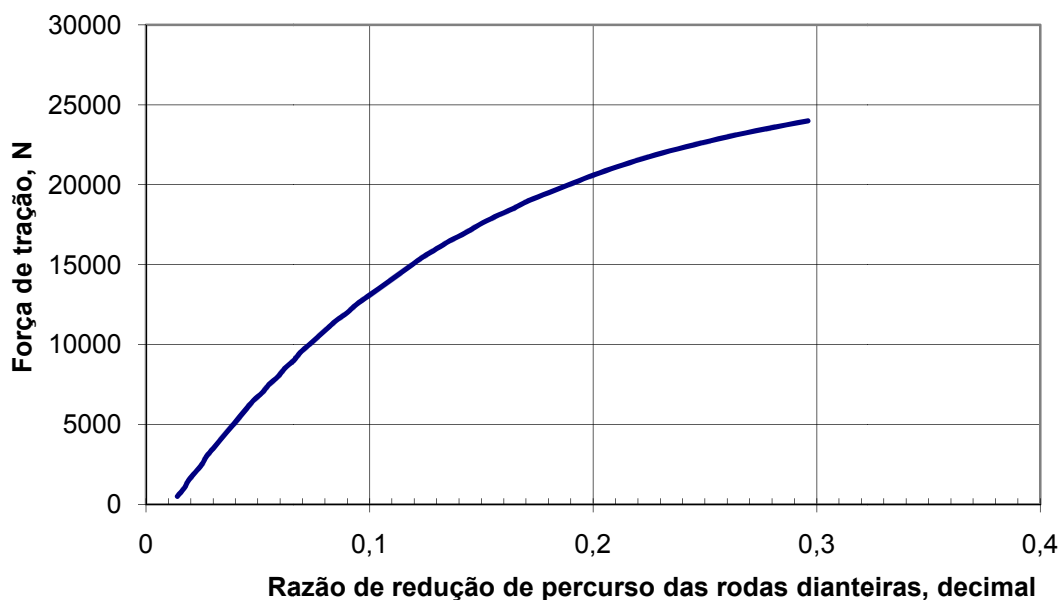


Figura 1P - Gráfico da força de tração x razão de redução de percurso das rodas dianteiras para solo rígido e trator com TDA ligada.

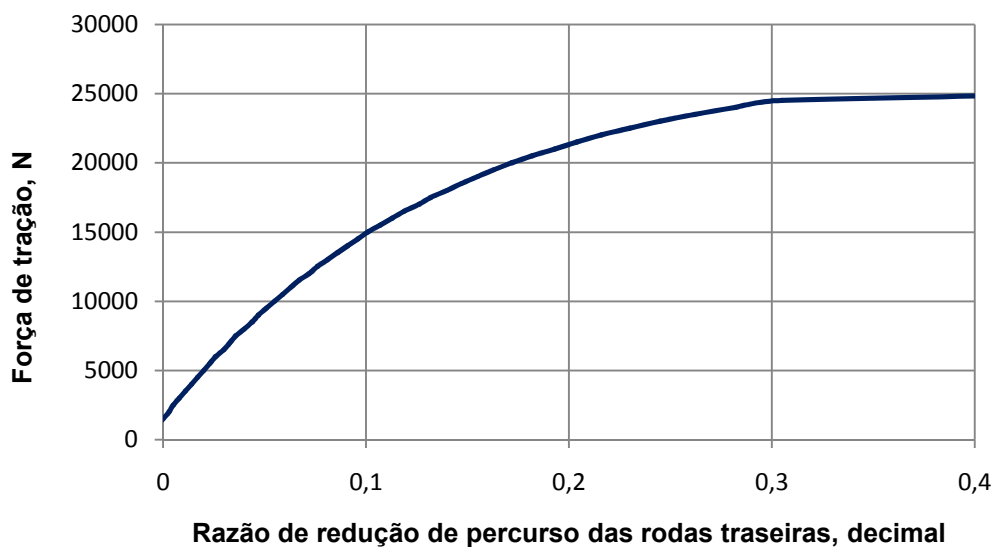


Figura 2P - Gráfico da força de tração x razão de redução de percurso das rodas traseiras para solo rígido e trator com TDA ligada.

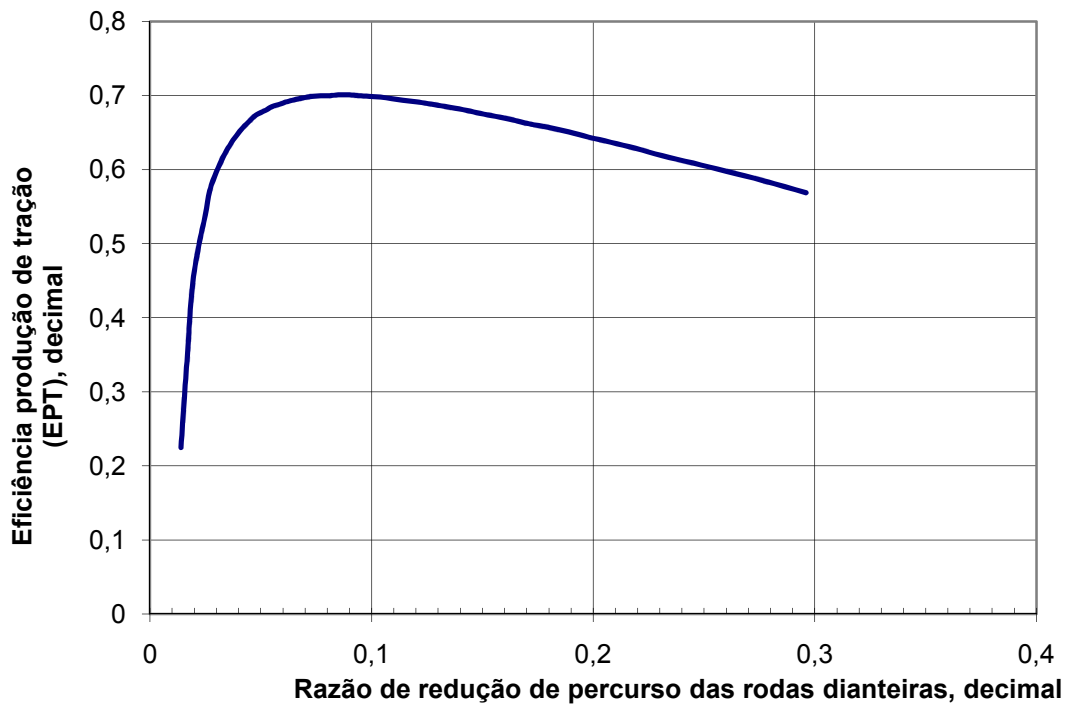


Figura 3P - Gráfico da eficiência de produção de tração x razão de redução de percurso das rodas dianteiras para solo rígido e TDA ligada.

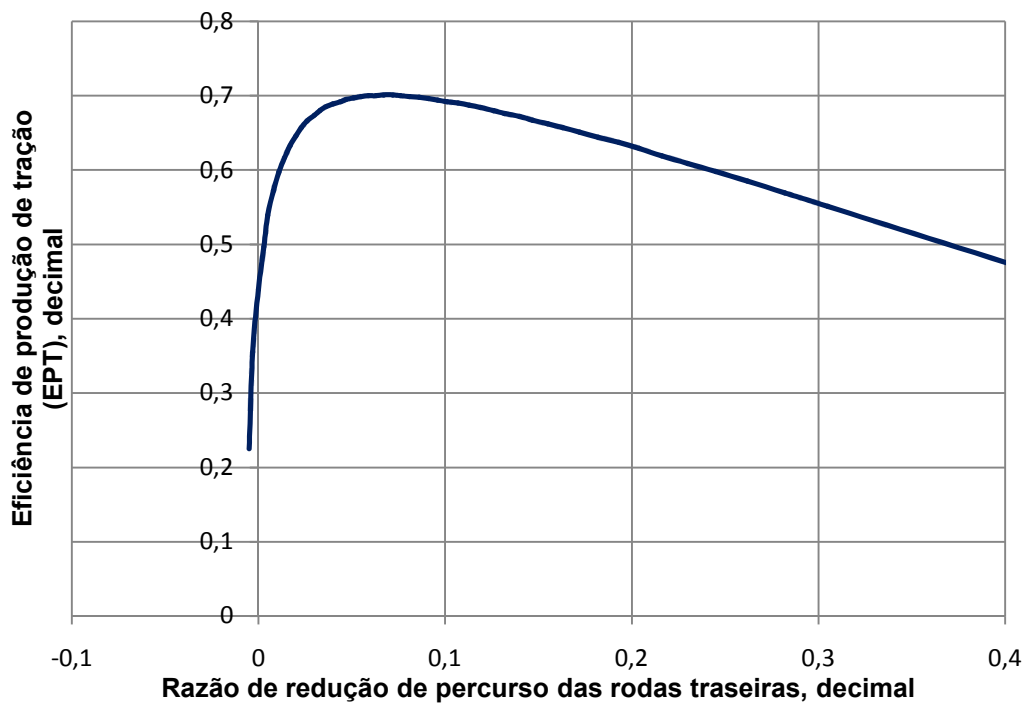


Figura 4P - Gráfico da eficiência de produção de tração x razão de redução de percurso das rodas traseiras para solo rígido e TDA ligada.

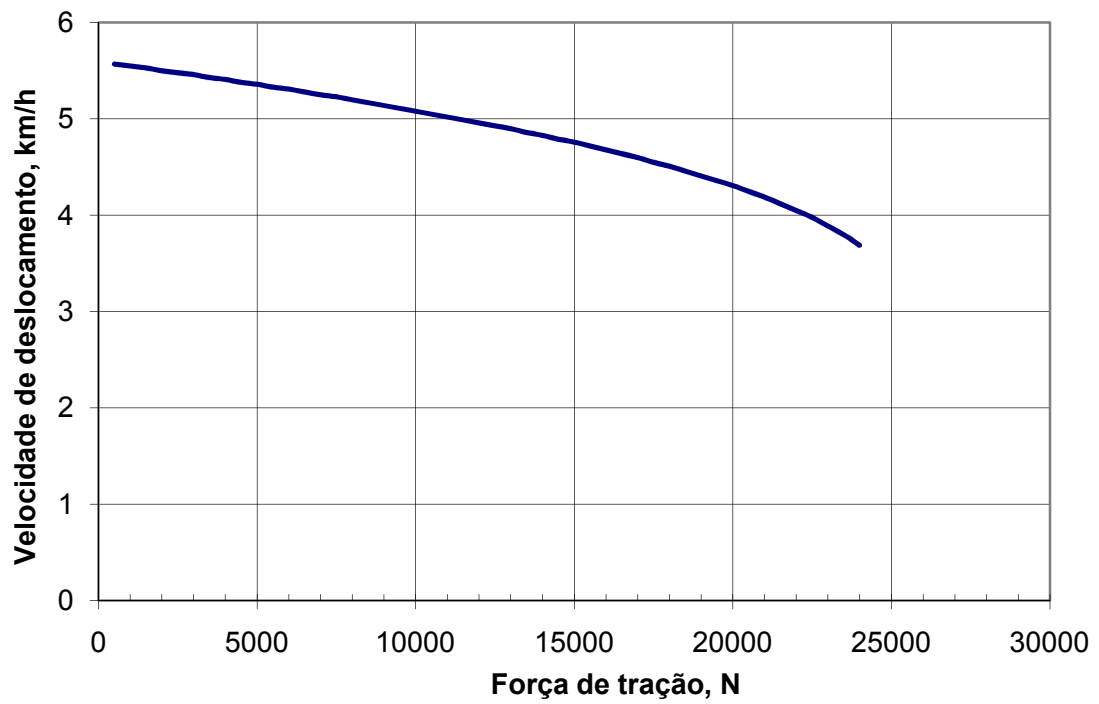


Figura 5P - Gráfico da velocidade de deslocamento x força de tração solo rígido e TDA ligada.

APÊNDICE Q

DETERMINAÇÃO DO CENTRO DE GRAVIDADE (CG) DO TRATOR

Neste trabalho foi utilizado para determinação do centro de gravidade (CG) do trator a metodologia e equações propostas por Goering et al. (2003). As Figuras 1Q e 2Q representam as grandezas consideradas no cálculo do CG quando realizada a dupla pesagem.

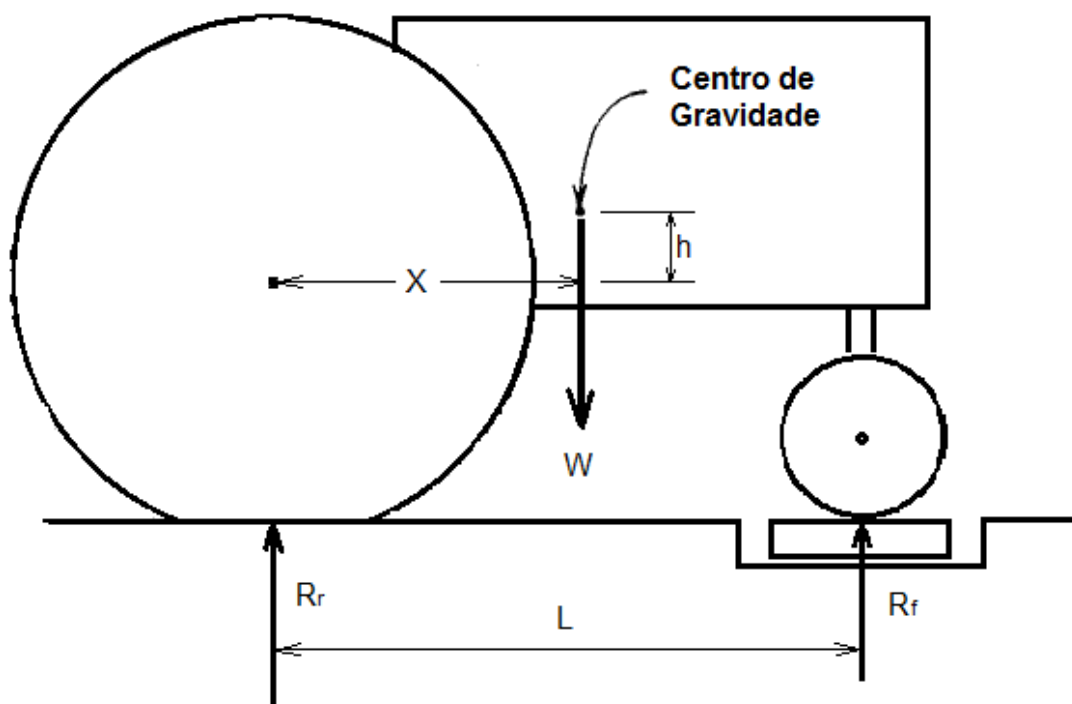


Figura 1Q - Dimensões básicas do trator para determinação do centro de gravidade.

A coordenada longitudinal (X) do centro de gravidade foi calculada conforme a seguinte equação:

$$X = \frac{R_f \cdot L}{W}$$

em que:

X = coordenada longitudinal horizontal do centro de gravidade (m);

R_f = reação do solo contra as rodas dianteiras (N);

W = peso do trator;

L = distância entre os eixos dianteiros e traseiros (m).

A coordenada vertical (h) foi determinada, elevando-se o eixo dianteiro a uma altura H , sobre uma balança (Figura 2Q) e determinando a reação do solo sobre este eixo.

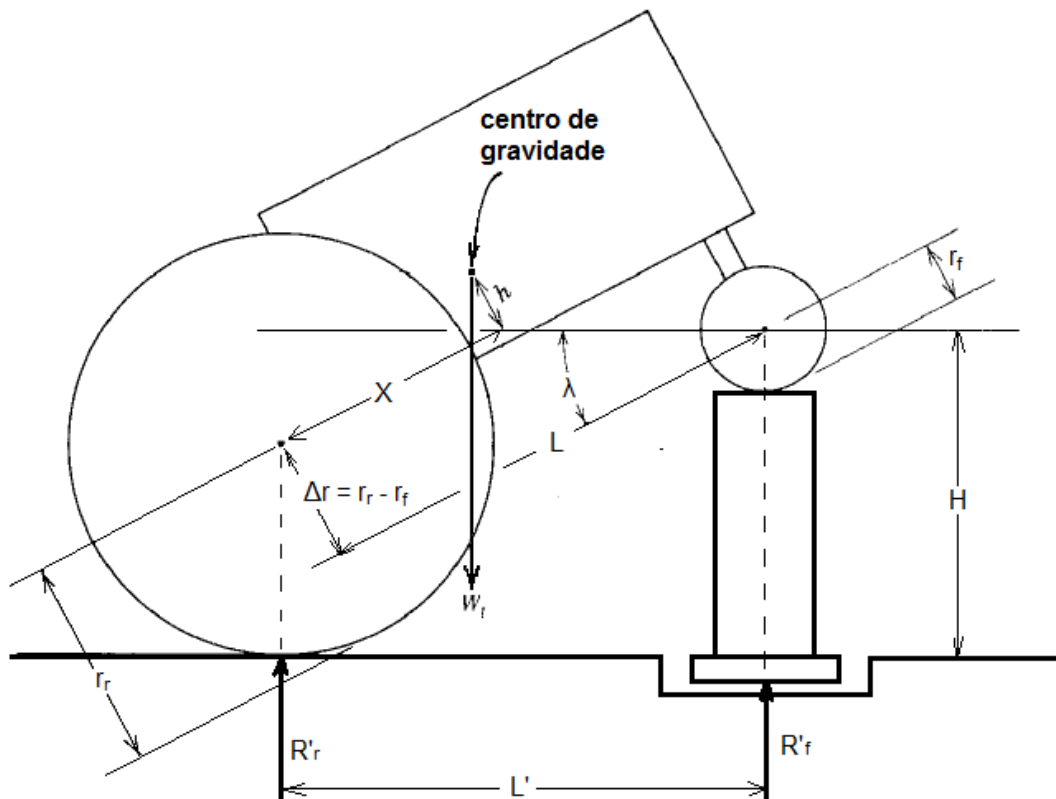


Figura 2Q - Inclinação do trator para determinação do centro de gravidade.

A coordenada vertical h foi determinada a partir da equação abaixo:

$$h = \frac{W_t - R'_f L}{W_t \cdot \tan \lambda} - \frac{R'_f \cdot \Delta r}{W_t}$$

em que:

h = coordenada vertical do CG (m);

R'_f = reação do solo contra as rodas dianteiras elevadas (N);

Δr = diferença entre o raio estático do rodado traseiro e dianteiro (m);

λ = ângulo de inclinação do eixo traseiro (graus).