

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ESTUDO DE TRAFEGABILIDADE APLICADO A
VEÍCULOS DE RODA EM TRANSPORTE E TRAÇÃO**

TESE DE DOUTORADO

Marcelino João Knob

Santa Maria, RS, Brasil

2010

ESTUDO DE TRAFEGABILIDADE APLICADO A VEÍCULOS DE RODA EM TRANSPORTE E TRAÇÃO

por

Marcelino João Knob

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. José Fernando Schlosser

Santa Maria, RS, Brasil

2010

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**ESTUDO DE TRAFEGABILIDADE APLICADO A
VEÍCULOS DE RODA EM TRANSPORTE E TRAÇÃO**

elaborado por
Marcelino João Knob

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Fernando Schlosser, Dr.
(Orientador)

Roberto Lilles Tavares Machado, Dr. (UFPEl)

André Anibal Brandt, Dr. (IF Sudeste de Minas Gerais)

José Mario Doleys Soares, Dr. (UFSM)

Arno Udo Dallmeyer, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 24 de março de 2010.

Dedico este trabalho ...

... à toda Nação Brasileira,
especialmente, aos que consagram
sua vida pela educação, ciência e
pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida e saúde.

Ao professor José Fernando Schlosser, pela orientação, pelos ensinamentos, pela confiança e amizade durante todos os anos de convívio.

À Universidade Federal de Santa Maria, por meio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso e aperfeiçoamento profissional.

Ao Exército Brasileiro, nas pessoas General Marco Antonio Longo, Coronel Cláudio Duarte de Moraes, Coronel Carrion e Major Geovanini pelo incentivo e apoio de pessoal, material, operacional e financeiro na realização do projeto.

Ao Instituto Federal Farroupilha Campus de São Vicente do Sul, pelo apoio e reconhecimento ao trabalho e compreensão quando de minha ausência.

Aos professores Isaías Farret, Airton dos Santos Alonço e Reges Durigon, pela amizade, convivência e incentivo. Em especial, ao grande amigo, colega e professor Joel Cordeiro da Silva, pela solidariedade e colaboração. Aos demais professores do PPGEA, pela doutrina e ensinamentos repassados.

Aos amigos Eder Dornelles Pinheiro, Alexandre Russini, Ulisses Giacomini Frantz, Gustavo Heller Nietiedt, pelo incansável e incondicional auxílio e apoio operacional de campo. A eles, minha eterna gratidão e reconhecimento. Ao André Casali, Rodrigo Ribas e Paula Machado dos Santos, meu muito obrigado.

Aos colegas do PPGEA, em especial ao Gismael Perin, Luis Henrique Ereno, Marçal Dornelles e Fabrício Medeiros, pela companhia e convívio, por compartilharem os conhecimentos e, principalmente, pela amizade.

Ao bolsista do IFF, Luis Roberto Cardoso e aos colaboradores, Adriano Vargas, Guiliano Daronco e João Telló, pela valiosa ajuda.

Aos funcionários do NEMA, Alberi Barbosa, Manoel Zeri, Sérgio, pela disponibilidade quando solicitados.

Aos professores da banca, Roberto Lilles Machado, André Anibal Brandt, José Mario Soares e Arno Udo Dallmeyer, que contribuíram significativamente pela qualificação da tese.

Enfim, agradeço à minha família, que sempre me incentivou na realização deste trabalho. À Greice e ao Kerbs, pela companhia.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

ESTUDO DE TRAFEGABILIDADE APLICADO A VEÍCULOS DE RODA EM TRANSPORTE E TRAÇÃO

AUTOR: MARCELINO JOÃO KNOB
ORIENTADOR: JOSÉ FERNANDO SCHLOSSER
Santa Maria, 24 de março de 2010.

A habilidade de um veículo se locomover em solos com baixa capacidade de carga é um aspecto importante em seu desempenho. A diversidade geológica, climática e de relevo originou, no Rio Grande do Sul, extensas áreas de solos Hidromórficos argilosos, entre eles, os Planossolos e os Gleissolos. Quando saturados, estes solos apresentam baixa capacidade de suporte de carga, dificultando o trabalho de máquinas agrícolas e o deslocamento de veículos militares de roda. O presente trabalho teve por objetivo determinar as condições de solo limite para a trafegabilidade de veículos militares de roda com tração 6 x 6 (Cascavel e Urutu), determinar a pressão de contato pneu-solo e prever a condição de mobilidade a partir índice de cone do solo (ICS) e das características do veículo. O trabalho também propôs avaliar o desempenho de um trator agrícola com TDA em ensaio de tração e trafegabilidade, para verificar a influência da baixa pressão interna dos pneus e a quantidade de lastro do trator sobre o patinamento dos rodados, a capacidade de tração, o consumo de combustível e a mobilidade sob diferentes condições de umidade do solo. Foi verificado que a viatura militar Cascavel exerce pressão mínima pneu-solo de 357 kPa e requer ICS de 402 kPa na camada crítica para se locomover. O veículo Urutu exerce uma pressão pneu-solo de 401 kPa e necessita de uma resistência do solo mínima de 431 kPa para o tráfego singular. Os modelos de previsão de trafegabilidade de veículos militares NATO *Reference Mobility Model* (NRMM) e *Mean Maximum Pressure* (MMP) subestimam o ICS necessário para os solos estudados, porém, o modelo que mais aproximou o ICS ao requerido pelos veículos testados foi o MMP. No experimento com tratores verificou-se que a pressão interna dos pneus alterou e a adição de lastro não alterou a superfície de contato pneu-solo. Os maiores esforços na barra de tração foram obtidos em baixa velocidade de deslocamento, baixa pressão interna dos pneus e com trator completamente lastrado, operando em solo firme. O menor consumo específico de combustível foi obtido em solo firme, com trator sem lastro, baixa pressão nos pneus e operando em marcha alta. O acréscimo de umidade no solo diminuiu o coeficiente dinâmico de tração de 0,57 para 0,31 e a eficiência de tração de 50 para 37%. A utilização de baixa pressão interna nos pneus tem efeitos positivos na trafegabilidade em solos alagados, reduzindo significativamente o patinamento e aumentando a velocidade de deslocamento. A utilização de lastro no trator em condições de solo saturado tem efeito negativo, porque aumenta a demanda de potência e o consumo de combustível da operação.

Palavras-chave: índice de cone do solo; veículo militar; força de tração; pressão interna do pneu; patinamento; trator de rodas.

ABSTRACT

Doctor Thesis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

TRAFFICABILITY STUDY APPLIED TO WHEELED VEHICLES IN TRANSPORT AND TRACTION

AUTHOR: MARCELINO JOÃO KNOB
ADVISER: JOSÉ FERNANDO SCHLOSSER
Santa Maria, March, 24th, 2010.

The ability of vehicles to traverse soft soils is an important aspect of their performance. The geological, climate and topography diversity originated, in Rio Grande do Sul, extensive areas of hydromorphic clay soils, as example, Planssoils and Gleissoils. When saturated of water, these soft soils present low loads support, difficult agricultural machinery work and limit the traverse of military wheeled vehicles. The aim of this study was to determine the limit of soil conditions for trafficability of military 6 x 6 wheeled trucks (Cascavel and Urutu), determine the ground pressure and predict the mobility condition from soil cone index (SCI) and vehicle characteristics. This study also proposed to evaluate the performance of a four wheel drive tractor in drawbar pull test and trafficability performance, to correlate the reduced tire inflation pressure and vehicle loading effect on slipping, drawbar pull, fuel consumption and mobility under different soil moisture conditions. It was found that the Cascavel military truck had a minimal ground pressure of 357 kPa and it needed SCI of 402 kPa in the critical layer for a single pass. The Urutu truck had a ground pressure of 401 kPa and required at least 431 kPa in SCI for one-way pass. The NATO Reference Mobility Model (NRMM) and Mean Maximum Pressure (MPP) predicting model underestimate the soil cone index required for these military vehicles to traverse soft-soils, however, MPP was more appropriate to predict the correct SIC for the tested vehicles. For the tractor experiment it was found that tire inflation pressure changed the ground pressure and the vehicle loading didn't change the ground surface pressure. The greatest drawbar pull were obtained at low tractor speed, reduced inflation pressure and high loading level, operating on hard ground. The lowest specific fuel consumption was obtained on hard ground, empty weight, low tire pressure and operating in high speed gear. The increase of soil moisture decreased the dynamic traction coefficient from 0.57 to 0.31 and the traction efficiency decrease from 50 to 37%. Reduced inflation tire pressure had positive effects on tractor mobility in waterlogged soils, reducing slipping and increasing traverse speed. Using height loading level had negative effect on wet soils because it require more engine power and increase the fuel consumption.

Keywords: soil cone index, military vehicle, drawbar pull, tire inflation pressure, slipping, wheeled tractor.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	16
2 CAPÍTULO 2: DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES LÍMITES DE TRAFEGABILIDADE DE VEÍCULOS MILITARES DE RODAS EM SOLOS COM BAIXA CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA	19
2.1 Introdução	19
2.2 Revisão bibliográfica	22
2.2.1 Locomoção de veículos terrestres.....	22
2.2.2 Estudos de trafegabilidade	26
2.2.3 Índice de cone do solo.....	29
2.2.4 Modelos de interação solo-veículo	32
2.3 Material e métodos	40
2.3.1 Caracterização dos veículos	40
2.3.2 Determinação da área e pressão de contato pneu-solo	42
2.3.3 Procedimentos de campo.....	43
2.3.4 Caracterização do solo.....	45
2.3.5 Determinação do patinamento	50
2.3.6 Modelos de predição de trafegabilidade.....	55
2.4 Resultados e discussão	57
2.4.1 Caracterização dos veículos	57
2.4.2 Curvas do Índice de Cone do Solo	61
2.4.3 Desempenho dos veículos a campo	62
2.4.4 Avaliação do patinamento	71
2.4.5 Resultados e análise dos modelos.....	73
2.5 Conclusões	76
3 CAPÍTULO 3: DESEMPENHO DE UM TRATOR AGRÍCOLA EM ENSAIOS DE TRAÇÃO E TRAFEGABILIDADE SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE LASTRAGEM E PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS	77
3.1 Introdução	77
3.2 Revisão bibliográfica	81
3.2.1 Desempenho de um trator.....	82
3.2.2 Força de Tração	83

3.2.3 Avaliação do desempenho do trator.....	85
3.2.4 Pneus agrícolas.....	87
3.2.5 Patinamento dos rodados.....	89
3.2.6 Consumo de combustível.....	91
3.2.7 Transferência de peso.....	92
3.2.8 Influência do solo sobre o desempenho de tratores.....	94
3.3 Material e métodos.....	98
3.3.1 Procedimento e delineamento experimental.....	98
3.3.2 Caracterização dos veículos.....	103
3.3.3 Determinações no trator tração.....	105
3.3.4 Determinações do solo.....	112
3.4 Resultados e discussão.....	115
3.4.1 Determinações do trator tração.....	115
3.4.2 Experimento de tração.....	118
3.4.3 Experimento de trafegabilidade.....	125
3.5 Conclusões.....	132
4. CONCLUSÃO GERAL.....	133
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tensões e forças atuantes sobre a roda na interação pneu e solo.....	23
Figura 2 - Relação do Índice de Cone Veicular em função do Índice de Mobilidade para solos argilosos.	35
Figura 3 - Veículos blindados sobre rodas, pertencentes ao Exército Brasileiro: a) Cascavel; b) Urutu.	41
Figura 4 - Impressão da área de contato do pneu sobre o solo segundo seu formato: a) área de contato retangular; b) área de contato elipsoidal.	42
Figura 5 - Área do experimento situada na várzea do NEMA/UFSM.	44
Figura 6 - Viatura Cascavel com pneus ajustados para trafegar em baixa pressão..	45
Figura 7 - Dimensões padronizadas pela ASAE para hastes e cones de penetrômetros.	46
Figura 8 - Sonda TDR modelo TRIME-FM e acessórios para medição da umidade do solo.....	47
Figura 9 - Momento da determinação da resistência à penetração do solo e da medição da umidade do solo na área experimental do NEMA/UFSM.....	48
Figura 10 - Cilindros de solo coletados para a obtenção do ICS em umidade controlada.....	49
Figura 11 - Medição de velocidade angular com sensor indutivo e roda dentada.....	51
Figura 12 - <i>Datalogger</i> de aquisição de dados CAMPBELL modelo CR1000 usado nos experimentos.	53
Figura 13 - Veículo Cascavel instrumentado com sensor de roda, GPS e <i>datalogger</i>	53
Figura 14 - Amostra do registro das velocidades no teste de calibração dos sensores em pista seca para o veículo Cascavel.	54
Figura 15 - Pressão de contato com o solo dos veículos Cascavel e Urutu determinadas para três diferentes pressões interna dos pneus.	60
Figura 16 - Curvas da resistência à penetração do solo em função do teor de água para os Planossolos utilizados no experimento.....	62
Figura 17 - Testes de trafegabilidade a campo com veículo Urutu nos dois locais dos experimentos: a) NEMA/UFSM; b) CIBLD/EB.	63

Figura 18 - Resistência à penetração do Planossolo Hidromórfico saturado na área do NEMA/UFSM, medido adjacente ao tráfego em diferentes desempenhos do veículo Urutu.	65
Figura 19 - Resistência à penetração do Planossolo Hidromórfico saturado na área do CIBLD/EB, medido adjacente ao tráfego em diferentes desempenhos do veículo Urutu.	66
Figura 20 - Resistência à penetração do Planossolo Hidromórfico saturado na área do NEMA/UFSM, medido adjacente (A, B e C) e na linha do tráfego (D) com diferentes desempenhos do veículo Cascavel.....	68
Figura 21 - Resistência à penetração do Planossolo Hidromórfico em campo nativo saturado na área do CIBLD/EB, medido adjacente ao tráfego em diferentes desempenhos do veículo Cascavel.	70
Figura 22 - Trabalhos de campo realizados: a) tráfego do veículo Cascavel na área do NEMA/UFSM; b) momento da medição da penetrometria e umidade do solo na área do CIBLD/EB.....	71
Figura 23 - Patinamento medido no veículo Cascavel na área do NEMA/UFSM, trafegando em solo firme e com duas pressões interna dos pneus.....	72
Figura 24 - Patinamento medido no veículo Cascavel na área do NEMA/UFSM, trafegando em solo mobilizado e com duas pressões interna dos pneus.	72
Figura 25 - Ilustração do patinamento através dos deslizamentos parciais entre pneu e solo.....	89
Figura 26 - Forças envolvidas no equilíbrio de tração em solo horizontal.....	93
Figura 27 - Área dos experimentos de tração na UFSM com solo firme e mobilizado.	98
Figura 28 - Arranjo do trator teste instrumentado acoplado ao trator freio.	99
Figura 29 - Área do experimento de trafegabilidade no IFF/SVS, sob solo saturado.	101
Figura 30 - Arranjo do trator teste instrumentado acoplado ao reboque.	102
Figura 31 - Determinação da área de contato dos pneus do trator com o solo: a) delimitação da área com cal; b) área de contato deixada sobre o solo.	106
Figura 32 - Imagens da superfície de contato do pneu dianteiro sobre o solo: a) área fotografada; b) contraste da imagem obtida pelo programa informático Fito-Área.	106
Figura 33 - Vista externa do fluxômetro e seu sistema de engrenagens ovais.	108

Figura 34 - Sistema de engate da célula de carga para medição força de tração, desenvolvido por Russini (2009).	110
Figura 35 - Relação entre as leituras de aferição e equação de regressão linear...	111
Figura 36 - Preparação do trator para os experimentos de tração e de trafegabilidade: a) instrumentação eletrônica; b) lastragem do pneu com água.....	112
Figura 37 - Determinação dos parâmetros de solo: a) coleta para obtenção da umidade; b) medição do índice de cone do solo.	114
Figura 38 - Velocidade obtida pelos sensores de roda e registrada pelo GPS.	117
Figura 39 - Força de tração e velocidade escalar das rodas do trator e do GPS, relativas a uma fração de 30 segundos de teste sob diferentes combinações de marcha.....	118
Figura 40 - Resistência à penetração do solo firme e mobilizado no perfil 0 a 400 mm em duas condições de umidade gravimétrica do solo, seco e úmido, sobre o qual foram realizados os experimentos de tração na área do NEMA/UFSM.	124
Figura 41 - Informação do conjunto trator e reboque para o cálculo da transferência de peso.....	125
Figura 42 - Condições de solo enfrentadas na trafegabilidade na área do IFF/SVS.	126
Figura 43 - Curvas da resistência à penetração no perfil do solo na área de tráfego do conjunto trator e reboque, na área do IFF-SVS, medido adjacente ao rastro.	130
Figura 44 - Curvas da resistência à penetração no perfil do solo medido antes e depois do tráfego do conjunto trator e reboque.	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fator “k” do modelo MMP para veículos de roda.	36
Tabela 2 - Fator multiplicador do ICV para diversas passadas do veículo.	37
Tabela 3 - Classificação dos veículos militares quanto ao Índice de Cone Veicular.	37
Tabela 4 - Dimensões e pesos das viaturas blindadas Cascavel e Urutu.	41
Tabela 5 - Dados da caracterização estática do veículo blindado Urutu.	57
Tabela 6 - Distância percorrida em 10 voltas das rodas do veículo blindado Urutu.	58
Tabela 7 - Dados da caracterização estática do veículo blindado Cascavel.	59
Tabela 8 - Distância percorrida em 10 voltas das rodas do veículo Cascavel.	60
Tabela 9 - Pressão de contato sobre o solo para veículos de esteira e de rodas utilizados pelo EB.	61
Tabela 10 - Índice de cone do solo (ICS) na camada de 230 a 380 mm e desvio padrão (DP) da resistência à penetração no perfil, relativo às condições de tráfego para os veículos Urutu e Cascavel em dois locais de teste, CIBLD/EB e NEMA/UFSM.	74
Tabela 11 - Tratamentos executados no experimento de tração.	100
Tabela 12 - Tratamentos executados no experimento de trafegabilidade.	103
Tabela 13 - Escalonamento de marchas do trator teste MF 292 <i>Advanced</i>	104
Tabela 14 - Medidas dos pneus utilizados no trator teste MF 292 <i>Advanced</i>	104
Tabela 15 - Pesagens do trator MF 292 <i>Advanced</i> e distribuição por eixo.	107
Tabela 16 - Parâmetros físicos para caracterização do Planossolo estudado.	113
Tabela 17 - Circunferência das rodas do trator MF 292 <i>Advanced</i> obtidos com e sem lastro, tração dianteira auxiliar ligada e desligada e para pressão interna alta e baixa.	115
Tabela 18 - Área de contato dos pneus do trator MF 292 <i>Advanced</i> obtidas em solo macio para diferentes pesos e pressões internas dos pneus.	116
Tabela 19 - Resumo dos resultados estatísticos do experimento de tração com trator freio em solo seco, expressos pelos valores médios de força, consumo específico, velocidade de deslocamento e patinamento por tratamento.	119

Tabela 20 - Velocidade, patinamento, consumo horário, distribuição dinâmica de peso, coeficiente dinâmico de tração, eficiência de tração do trator MF 292 para diferentes tratamentos do experimento de tração em solo seco.	121
Tabela 21 - Resumo dos resultados estatísticos do experimento de tração com trator freio em solo úmido, expressos pelos valores médios de força, consumo específico, velocidade de deslocamento e patinamento por tratamento.	122
Tabela 22 - Velocidade, patinamento, consumo horário, coeficiente dinâmico de tração, eficiência de tração do trator MF 292 para diferentes tratamentos do experimento de tração em solo úmido.	123
Tabela 23 - Valores médios para velocidade, consumo horário de combustível e patinamento do trator MF292 obtidos em função do lastro, pressão de pneu e utilização de TDA em trafegabilidade.	127
Tabela 24 - Comparação de médias entre velocidade de locomoção, consumo horário de combustível e patinamento do trator MF292 obtidos em função do lastro, pressão de pneu e utilização de TDA.	128

LISTA DE SIGLAS

AMM:	Modelo de Mobilidade Analítico
ASAE:	Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas
AT:	Transmissão Automática
BPAF:	Baixa Pressão e Alta Flutuação
BT:	Barra de Tração
CIBLD:	Centro de Instrução de Blindados
CVT:	Transmissão Continuamente Variável
DP:	Desvio Padrão
EB:	Exército Brasileiro
EE-11:	Veículo blindado de rodas Urutu
EE-9:	Veículo blindado de rodas Cascavel
ENGESA:	Engenheiros S.A.
GPS:	Sistema de Posicionamento Global
IC:	Índice de Cone
ICR:	Índice de Cone Relativo
ICS:	Índice de Cone do Solo
ICV:	Índice de Cone do Veículo
IFF:	Instituto Federal Farroupilha
IM:	Índice de Mobilidade
MMP:	Média das Pressões Máximas
MT:	Transmissão Mecânica
NEMA:	Núcleo de Ensaio de Máquinas Agrícolas
NRMM:	Modelo de Mobilidade de Referência da OTAN
ONU:	Organização das Nações Unidas
OTAN (NATO):	Organização do Tratado do Atlântico Norte
RCC:	Regimento de Carros de Combate
RM:	Região Militar
SVS:	São Vicente do Sul
TDA:	Tração Dianteira Auxiliar
TDP:	Tomada Direta de Potência
TDR:	Reflectômetro no Domínio de Tempo
UFSM:	Universidade Federal de Santa Maria
USDA:	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
WES:	Estação Experimental de Waterways (Vicksburg, EUA)

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1 - Configuração do GPS Trimble modelo AgGPS EZ-Guide SL	144
Apêndice 2 - Rotina do programa para aquisição de dados com o <i>datalogger</i>	145
Apêndice 3 - Valores da resistência à penetração do solo, em kPa, medidos na área do NEMA/UFSM e do 1º RCC/CIBLD para diferentes condições de trafegabilidade do veículo Urutu.	146
Apêndice 4 - Valores da resistência à penetração do solo, em kPa, medidos na área do NEMA/UFSM e do 1º RCC/CIBLD para diferentes condições de trafegabilidade do veículo Cascavel.	147
Apêndice 5 - Planilha de cálculo do Índice de Cone Veicular pelo modelo NRMM-II	148
Apêndice 6 - Rotina para aquisição de dados de tração com <i>datalogger</i>	150
Apêndice 7 - Valores da resistência à penetração do solo, medidos em kPa, referente aos experimentos de tração e trafegabilidade com trator.	152

1. INTRODUÇÃO GERAL

No Rio Grande do Sul, a combinação da diversidade geológica, climática e de relevo originou uma grande variedade de tipos de solos com características e comportamentos distintos. Sobretudo, na metade sul do estado, nas regiões fisiográficas do litoral, depressão central e campanha, os Planossolos e os Gleissolos, quando saturados, apresentam baixa capacidade de suporte de carga para o deslocamento dos diferentes veículos, entre os quais, máquinas agrícolas e veículos militares. Também o clima da região, com um regime pluviométrico considerado alto, é um fator de manutenção de umidade, que colabora para a diminuição da qualidade destes solos ao tráfego de veículos, tanto agrícolas como militares.

Os solos próprios para o cultivo do arroz irrigado caracterizam-se pelo relevo plano, geralmente hidromórficos, que permanecem saturados na maior parte do ciclo da cultura. Aliado ao fato, a drenagem deficiente está relacionada principalmente à ocorrência de horizontes argilosos com baixa condutividade hidráulica. Como destaque na produção de alimentos, estima-se que, somente no estado do Rio Grande do Sul, um milhão de hectares de arroz são cultivados nestas condições de solo.

A ocorrência de lavouras comerciais de arroz irrigado com manutenção de lâmina de água em grande parte do ciclo de produção e a dificuldade de retirar-se esta água de irrigação na fase de colheita e transporte de grãos induz a uma alta frequência de solos agrícolas com baixíssima capacidade de suporte de carga. As máquinas agrícolas, principalmente tratores e colhedoras que operam nas lavouras nestas condições difíceis, muitas vezes dotadas de rodados e pneus convencionais, refletem as suas dificuldades com um baixo rendimento operacional e com freqüentes interrupções no trabalho, elevando os custos de produção.

Também alguns veículos de transporte e combate, utilizados pelo Exército Brasileiro apresentam problemas para o deslocamento em solos na condição natural, tanto em operações de manobras e simulação, como no treinamento das tropas. Durante alguns meses do ano, principalmente os de maior precipitação, são muito freqüentes os problemas enfrentados no deslocamento. O “Carro de

Transporte Sobre Rodas Anfíbio (Urutu) e o “Carro de Reconhecimento Sobre Rodas (Cascavel), são bastante prejudicados na sua mobilidade pelas condições de umidade do solo. As características dos veículos e seus dispositivos de deslocamento, assim como as condições do terreno, principalmente o teor de água no solo, são algumas variáveis que interferem quanto ao sucesso do deslocamento dos veículos.

Na área militar, a importância do tema ainda é mais relevante. Por se tratar de uma região geográfica de fronteira, historicamente com grandes conflitos, o estado é visto como estratégico para a defesa territorial e soberania nacional, com forte presença militar na região, recentemente ampliada pela transferência de unidades militares vindas do Rio de Janeiro.

Neste âmbito, as máquinas agrícolas e alguns tipos de veículos militares, especificamente, os de rodas, enfrentam dificuldades similares quando operam ou trafegam nas condições de solo mencionadas. Porém, poucos estudos têm voltado seu foco na questão local. Na agricultura, porque a atividade orizícola é vista e tratada com menor expressão mercadológica, e na área militar, os avanços tem se restringido aos países impulsionados pelas guerras, a exemplo dos Estados Unidos, que ainda é o grande fornecedor de tecnologia militar para o mundo.

Sem dúvida, o exército sempre foi um grande propulsor no desenvolvimento tecnológico, inclusive na mecanização agrícola, demonstrado em trabalhos sobre o comportamento de veículos e máquinas em terrenos com condições naturais, impulsionando a ciência da mecânica dos solos. A mecânica dos solos clássica foi um ponto de partida, porém considerava o solo como suporte de cargas estáticas ou aplicadas muito lentamente, por isso o problema da mobilidade requeria estudos específicos, organizados em outro ramo da ciência, a dinâmica da relação solo-máquina.

Existem dois grandes ramos: a mecânica do sistema terreno-veículo e a mecânica do sistema terreno-implemento, entendendo como tal a ferramenta que trabalha o solo. Como caso particular em que o veículo não é capaz de deslocar-se a si mesmo sobre a superfície suporte encontra-se a trafegabilidade. Trafegabilidade, conforme definido por Vieira (1994), é a capacidade dos solos de suportarem a passagem de um dado veículo pelo mesmo local um determinado número de vezes.

O propósito da terramecânica é estudar as leis que regem as relações entre o terreno e o veículo para servir de base científica no projeto dos mesmos, assim como ajudar na sua seleção, avaliação, ensaio e análise de comportamento.

A interface terreno-veículo é a zona de contato entre a superfície do solo e os elementos de apoio do veículo, podendo ser rodas ou esteiras. Nesta zona se transmitem as forças produzidas pelo movimento do veículo sobre o terreno. Para prever o comportamento do veículo é necessário, portanto, conhecer as solicitações produzidas pelo veículo e a consequente resposta do terreno.

O propósito deste trabalho foi realizar estudos relacionados à trafegabilidade de veículos agrícolas e militares em caminhos não pavimentados utilizando conhecimentos da mecânica dos solos e com técnicas especiais como a penetrometria e o georreferenciamento.

Por questão de conveniência o tema investigado foi dividido em dois capítulos. O primeiro trata da “Determinação das condições limites de trafegabilidade de veículos militares de roda em solos com baixa capacidade de suporte de carga” que ocorre nas manobras, exercícios e combates militares com as viaturas blindadas de rodas, principalmente quando estes veículos trafegam sobre Planossolos e Gleissolos da Depressão Central do Estado. Tem como objetivo geral determinar as condições de trafegabilidade de veículos militares de roda e prever o comportamento do veículo a campo através do conhecimento prévio das condições do terreno (índice de cone e teor de água do solo) e das características do veículo (peso, pressão dos pneus e pressão aplicada sobre o solo).

O segundo capítulo destina-se ao estudo agrícola, investigando o “Desempenho de um trator agrícola em ensaios de tração e trafegabilidade sob diferentes condições de lastragem e pressão interna dos pneus” nas operações de transporte na colheita de arroz e no preparo do solo, com o objetivo de determinar a influência que a pressão interna dos pneus, a quantidade de lastro do trator e a área de contato pneu/solo exercem sobre o patinamento dos rodados, a capacidade de tração, o consumo de combustível e a trafegabilidade sobre solos com diferente índice de cone e umidade.

CAPÍTULO 2:

DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES LÍMITES DE TRAFEGABILIDADE DE VEÍCULOS MILITARES DE RODAS EM SOLOS COM BAIXA CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA

2.1 Introdução

Segundo o Manual de Trafegabilidade dos Solos do Exército Brasileiro (BRASIL, 2001), trafegabilidade é a capacidade dos solos de suportarem a passagem de um dado veículo militar, pelo mesmo local, um determinado número de vezes. Este conceito restringe-se apenas às condições encerradas no solo e no veículo que irá transpô-lo.

O estudo da trafegabilidade de veículos desempenhou fundamental importância para condução das operações militares nas duas grandes Guerras Mundiais. Reconhecimentos prévios realizados com a ajuda de equipamentos especiais para amostragem de solos e o engajamento de cientistas ingleses com conhecimentos em mecânica do solo foram cruciais, visando assim, assegurar aos chefes militares, que as viaturas aliadas poderiam trafegar sobre os campos nos quais seria necessário seu deslocamento para o desenvolvimento das missões militares.

Estes estudos continuaram evoluindo no período pós-guerra e mais recentemente, no Oriente Médio, por ocasião da Guerra do Golfo, pode-se comprovar o uso da tecnologia do georreferenciamento e levantamento remoto das condições de solo para o sucesso das operações militares, o que levou os Estados Unidos a criar novos campos de provas direcionados para pesquisas referentes ao assunto.

A dificuldade de locomoção que certos veículos militares enfrentam é mais problemática aos dotados de dispositivos pneumáticos (rodas e pneus), por apresentarem uma pressão de contato veículo-solo consideravelmente superior aos que possuem esteira como mecanismo de propulsão, impondo-lhes restrições extras ao trafegar em solos com baixa capacidade de suporte de carga, tais como

os lamacentos e pantanosos. Mais especificamente, os Planossolos e Gleissolos comumente encontrados na Depressão Central do Estado impõem restrições semelhantes ao tráfego.

Planossolos são solos imperfeitamente ou mal drenados, encontrados em áreas de várzea, com relevo plano a suave ondulado. Apresentam perfis com seqüência de horizontes A-E-Bt-C, sendo os horizontes A e E mais arenosos, com passagem abrupta para o horizonte Bt, bem mais argiloso e adensado. Essa mudança abrupta de textura dos horizontes mais superficiais (A + E) para o horizonte Bt distingue os Planossolos dos Gleissolos. Os Planossolos são freqüentes nas áreas de várzeas dos rios e lagos e ocorrem principalmente na Depressão Central do Estado. Os Gleissolos são solos muito mal drenados, de cor acinzentada ou preta, com horizontes superficiais mais argilosos, com maior teor de matéria orgânica e ocorrem tipicamente em depressões mal drenadas, como em várzeas de rios e nas planícies lagunares, geralmente associados aos Planossolos (STRECK et al., 2008).

É consenso que a resistência do solo está intimamente ligada a parâmetros intrínsecos à constituição e estado, tais como o tipo de solo, textura, densidade, e principalmente, à umidade do mesmo, devendo assim, ser considerada sua variação espacial e temporal. Desta forma, um dos parâmetros que podem definir a capacidade de suporte de um solo é o Índice de Cone (IC). Linares (1995) define o IC do solo como a resistência média oferecida à penetração de uma haste com ponteira cônica com ângulo de 30° em uma determinada profundidade, medida em unidades de pressão (força por unidade de área da base do cone).

Por outro lado, a relação que descreve o índice de cone do solo necessário para a trafegabilidade é feita por meio de Modelos aplicados aos veículos, que se utilizam de equações para expressar as características num parâmetro denominado Índice de Cone Veicular. Considerando fatores como peso, número de eixos e rodas, dimensões dos pneus, entre outros, os Modelos estimam o comportamento dos veículos quanto à trafegabilidade para determinada condição de solo.

Quando se deseja avaliar o desempenho da trafegabilidade de veículos, também é vital conhecer o patinamento porque ele é um parâmetro que agrega uma série de relações entre a roda e superfície de contato, traduzindo seus valores no grau de dificuldade apresentada à mobilidade ou a transmissão de força propiciada entre eles.

Longo (2008) diagnosticou, dentro da área técnica do Exército Brasileiro, a necessidade de realizarem-se estudos técnico-científicos sobre a questão de mobilidade dos veículos militares de roda, algo problemático na área abrangida pela 3ª Região Militar do Sul, em função das características regionais de clima, solos, vegetação, etc, além das especificações de alguns veículos militares brasileiros, de combate e transporte utilizados nesta região de fronteira. Possuindo pouca estrutura especificamente voltada para esta temática, o Exército Brasileiro vem adotando a tecnologia e os conceitos desenvolvidos pelos norte-americanos. Neste sentido, o Exército adquiriu para uso em suas unidades de engenharia, penetrômetros de cone digitais para realizar a avaliação da capacidade de suporte dos terrenos no que se refere ao tráfego de viaturas e propôs ao Núcleo de Ensaio de Máquinas Agrícolas a realização do presente trabalho, em parceria com a Universidade Federal de Santa Maria.

O objetivo geral deste estudo foi determinar as condições de trafegabilidade de veículos militares de rodas sobre solos com baixa capacidade de suporte de carga, especificamente Planossolos e Gleissolos saturados, através dos seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar a pressão de contato do rodado sobre uma superfície indeformável de diferentes veículos militares para diferentes pressões internas;
- b) Encontrar o valor mínimo de índice de cone do solo necessário ao tráfego de veículos militares de roda para o tráfego singular e repetido, sem que ocorra imobilização;
- c) Testar e comparar os modelos de predição de trafegabilidade *NATO Reference Mobility Model edition II* (NRMM-II) e *Mean Maximum Pressure* (MMP) para prever o comportamento de veículos militares brasileiros Urutu e Cascavel sobre solos hidromórficos da Depressão Central do Estado;
- d) Determinar a umidade máxima do solo que resulta no índice de cone mínimo necessário ao suporte da carga aplicada pelos rodados do veículo, possibilitando sua trafegabilidade.

2.2 Revisão bibliográfica

2.2.1 Locomoção de veículos terrestres

Entende-se por mobilidade de um veículo, a sua capacidade plena para mover-se de um lugar para outro com o propósito de realizar uma missão a ele confiada. Quando esta mobilidade se dá através de terrenos naturais, os trabalhos sobre mobilidade se dedicam, fundamentalmente, na locomoção extraviária. Em terrenos naturais, um veículo encontra maiores dificuldades para seu trânsito do que quando se desloca por caminhos artificiais. O relevo do terreno, a cobertura da via, o tipo, consistência e teor de água do solo são fatores que podem limitar a capacidade de manobra dos veículos e restringe seu acesso a determinadas zonas.

Veículos terrestres são todos aqueles que trafegam em vias terrestres, podendo ser guiados ou não guiados, a exemplo dos que se locomovem em diferentes direções de acordo com a vontade do seu condutor (WONG, 1978). Segundo Bosch (1986), as características dos veículos terrestres são definidas de acordo com os termos desempenho, dirigibilidade e deslocamento vertical. Wong (1978) ainda complementa que o comportamento de qualquer veículo terrestre é o resultado das interações entre o condutor, o veículo e o meio ao seu redor.

Segundo Gillespie (1992), a dinâmica veicular refere-se ao movimento dos veículos terrestres, das forças atuantes sobre eles e suas respostas a elas. O seu entendimento é realizado em dois níveis: o empírico (baseado em ensaios experimentais) e o analítico (baseado na modelagem matemática). Priddy (1995) apresenta, de forma ilustrativa, a atuação das forças envolvidas na dinâmica da locomoção veicular na Figura 1.

A resistência ao rolamento é devida a três fatores principais: deformação da roda e da via; efeito de sucção causado pela separação da área de contato da roda com superfície de rolamento; e, o escorregamento da roda em relação ao pavimento ou superfície da via. A magnitude desta resistência depende da dureza e da rugosidade da roda e do pavimento (PRADO Jr., 2002). Para Carvalho (2004), a resistência ao rolamento ocorre por meio do trabalho de deformação dos pneus sobre o solo, sendo que ela está presente desde o momento que o veículo inicia o seu movimento. Ainda, segundo o autor, ela não apresenta nenhuma outra

propriedade indesejável, sendo a energia consumida transformada em calor dentro do pneu e este aumento de temperatura reduz a resistência à abrasão do pneu e sua resistência à fadiga.

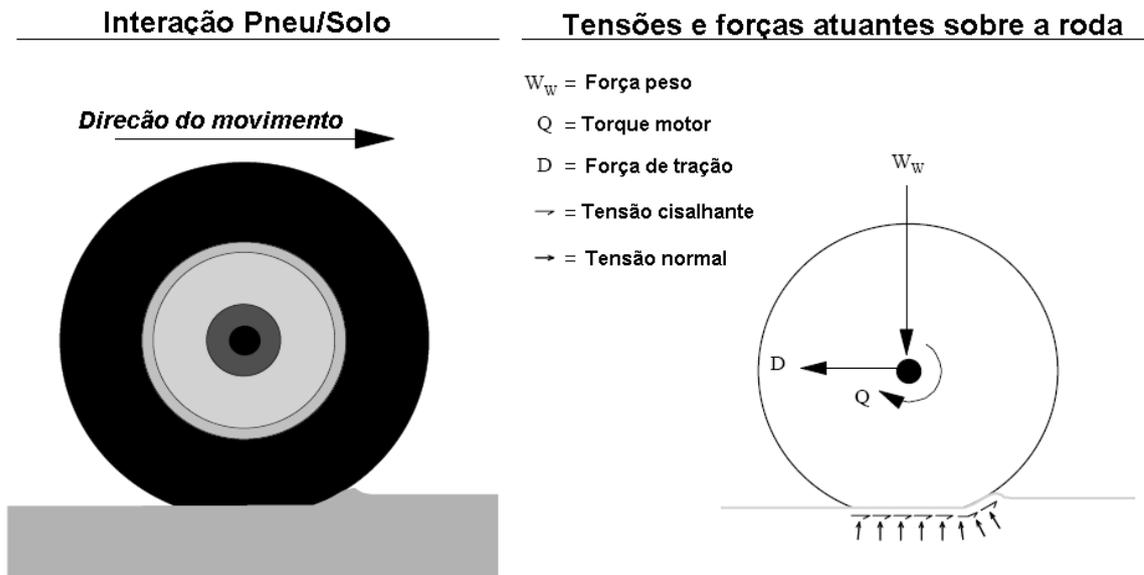


Figura 1 - Tensões e forças atuantes sobre a roda na interação pneu e solo.

Fonte: Priddy (1995).

A resistência aerodinâmica é provocada pelo ar que flui ao redor do veículo e o ar que flui através do radiador com o objetivo de refrigeração, arrefecimento e ventilação. Destes dois fatores, o primeiro é dominante e representa mais de 90% da resistência aerodinâmica total de um veículo terrestre.

Segundo Inns e Kilgour (1978), citado por Reis et al. (1999), a área de contato pneu-solo pode ser estimada de forma simplificada considerando-se apenas as dimensões dos pneus, a partir da Equação 1, em que A é a área; L é a largura da banda do pneu; e D é o diâmetro externo da roda.

$$A = 0,27 \times L \times D \quad (1)$$

A tração é a força que as rodas efetivamente transmitem ao solo para que o veículo possa se movimentar. Ela é gerada pelo motor do veículo. Na realidade o motor não gera força e sim torque. A força de tração surge porque as rodas recebem o torque do motor, que produz um binário, cujo módulo dos vetores é o valor da força de tração. Segundo Wong (1978), a característica ideal de um motor

relaciona-se à quantidade constante de potência fornecida, qualquer que seja a rotação. Com isso o torque fornecido variaria inversamente com a rotação do motor, de modo que em baixas rotações, situação em que o veículo necessita de maior torque (como iniciando o seu movimento ou na subida de um aclive), o motor teria condições de suprir essa exigência. Já em rotações elevadas, como em altas velocidades, o torque fornecido seria baixo. Estas características não são encontradas em motores a combustão, apesar de os motores de ciclo diesel terem a capacidade de fornecer elevado torque mesmo em baixas rotações.

Como forma de se aproveitar da melhor forma possível o torque e a potência do motor há a necessidade da utilização de um conjunto mecânico denominado de sistema de transmissão. O trabalho do sistema de transmissão consiste em atuar como uma espécie de transformador entre o motor e as rodas, permitindo, a todo momento, que o regime de giro do motor se encontre dentro de seus próprios limites de utilização, independentemente da velocidade do veículo. Este objetivo é alcançado mediante o emprego de trens de engrenagens de diferentes números de dentes acoplados entre si. Conforme se encaixam, a relação entre a velocidade de rotação do eixo de entrada na caixa e a do eixo de saída varia, obtendo-se, dessa forma, as diversas velocidades.

Os dois tipos de sistemas de transmissão mais comumente empregados são: a transmissão manual e a transmissão automática com conversor de torque. Podem-se citar ainda outros tipos de transmissão como a CVT e a hidrostática. A transmissão manual é a mais comum de ser encontrada sendo basicamente composta por uma embreagem mecânica, caixa de transmissão, eixo cardã e diferencial. Nos veículos com motorização dianteira e tração dianteira ou com motorização traseira e tração traseira, a caixa de transmissão e o diferencial formam um só conjunto.

Os sistemas da transmissão automática são basicamente compostos por uma embreagem hidráulica, um conversor de torque, caixa de transmissão, eixo cardã e diferencial. Os veículos com transmissão automática são distinguidos por duas características fundamentais: não possuem embreagem (são dotados de um dispositivo de acoplamento hidráulico denominado conversor de torque) e possuem uma caixa de câmbio de funcionamento automático, isto é, capaz de efetuar por si mesma as mudanças de velocidade que são indicadas pelas necessidades do transporte. Segundo Lucas (1994), o acoplamento hidráulico é feito por meio de um

dispositivo hidrocínético, também chamado de hidrodinâmico, sendo que o seu princípio de funcionamento se baseia na transmissão de energia de um fluido em alta velocidade (óleo) entre dois elementos rotativos de uma bomba ou turbina.

Outro componente presente nos sistema veicular se refere a dinâmica vertical dos movimentos. Esta está intimamente relacionada ao sistema de suspensão, o qual é um conjunto de elementos que serve de união entre as rodas e a própria estrutura do veículo. De acordo com Genta (1997), esse sistema persegue dois objetivos principais: assegurar permanentemente o contato das rodas com o solo, condição importante para se obter uma boa aderência e um nível aceitável de estabilidade e segurança de marcha, de forma a haver uma boa distribuição do peso do veículo sobre o solo; e, minimizar o efeito das irregularidades do terreno, permitindo, deste modo, um maior conforto ao condutor e passageiros.

Entre os veículos blindados mais utilizados pelo Exército Brasileiro estão “Carro de Transporte Sobre Rodas Anfíbio” EE-11 Urutu e o “Carro de Reconhecimento Sobre Rodas Cascavel” EE-9 Cascavel. Projetados em 1970 e fabricados até 1992 pela brasileira ENGESA, em São José dos Campos, SP, ambos são veículos de três eixos com tração 6x6, suspensão dianteira independente, de molas helicoidais e suspensão traseira do tipo ENGESA “*Boomerang*”, de molas planas. Porém, foram fabricados diversos modelos, que se diferenciam basicamente na motorização e transmissão.

Segundo o Exército Brasileiro (2004a), o EE-11 Urutu foi fabricado em sete modelos, Mk I-VII, com motor diesel Mercedes Benz OM-352A de 126,8 e 141,7 kW e Diesel Detroit 6V-53 e 6V-53T, com 158,1 e 193,9 kW, respectivamente. Os primeiros dois modelos foram dotados com transmissão manual MB e os demais foram equipados com transmissão automática Alisson. Pesa até 14 toneladas e atinge a velocidade de 100 km h⁻¹ em terra e 8 km h⁻¹ na água, com autonomia de 850 km em estrada e 60 km na água. Tem capacidade para transportar nove homens armados e equipados e pode ser encontrado na versão ambulância, comando, comunicações, transporte de cargas gerais e de munições.

Conforme Exército Brasileiro (2004b), o veículo EE-9 Cascavel também foi fabricado em sete modelos e utiliza motor diesel Perkins 6357V, Mercedes Benz OM-352A ou Diesel Detroit 6V-53, de similar potência ao EE-11 Urutu. Os primeiros dois modelos são dotados de transmissão manual Clark e os demais utilizam transmissão automática Alisson MT-643 ou AT-540 / 545. Seu peso em combate é

na ordem de 13,4 toneladas e tem autonomia para 880 km, atingindo velocidade máxima de 100 km h^{-1} . Para defesa possui um canhão de 90 mm montado sobre uma torre central de 360° de giro e uma metralhadora 12,7 mm (0,50") ou 7,62 mm montada a esquerda do canhão.

Apesar de enfrentarem dificuldades ao trafegar em solos úmidos ou pantanosos, os veículos blindados de rodas levam grande vantagem sobre os de esteira, principalmente em relação à velocidade e versatilidade ao trafegar em vias pavimentadas, ressaltando sua reduzida necessidade de manutenção. Esta é a razão pela qual sua fabricação foi um sucesso e seu uso tão difundido pelos diversos exércitos do mundo, inclusive na ONU.

2.2.2 Estudos de trafegabilidade

Desde a invenção da roda (aproximadamente 3.500 anos a.C.) o homem já vem enfrentando problemas de trafegabilidade extraviária. Aplicando métodos empíricos de análise para resolver seus problemas, sucessos, fracassos, provar e aprender com os erros fizeram desta, uma metodologia amplamente empregada. No entanto, no princípio do século XX se publicaram os primeiros trabalhos de Bernstein contendo as primeiras tentativas de explicar o comportamento do terreno em relação às cargas aplicadas pelos veículos.

A partir da Segunda Guerra Mundial, foi a técnica militar que tomou iniciativa, sobretudo, para dispor de procedimentos que resolvessem a questão trafegabilidade. Inicialmente, abordou-se o problema a partir de modelos teóricos de comportamento do terreno. A exemplo, no *Land Locomotion Laboratory do U.S. Army Tank Automotive Command (Warren, Michigan)* foram construídas pistas edafométricas próprias para ensaios de trafegabilidade em protótipos.

Já na década de 60, Knight e Meyer (1961) utilizaram um sistema de classificação de solos (*USDA - Soil Classification System*) para estimar a probabilidade de um veículo ser capaz de atravessar com sucesso um determinado solo. A estimativa era baseada numa ampla correlação empírica que estabelecia a probabilidade de trafegabilidade de diferentes veículos em relação a solos de diferentes capacidades de suporte.

A complexidade do tema levou a que se buscassem procedimentos rápidos para sua aplicação prática. A Estação Experimental de Vicksburg, Mississipi, da WES, se encarregou de iniciar um programa de trafegabilidade. O êxito maior deste projeto foi a utilização do parâmetro atualmente mais empregado na análise do comportamento da mobilidade de veículos: o índice de cone. Bekker (1956) mencionou pela primeira vez ao parâmetro “índice de cone” como forma de avaliar a consistência do solo e sua capacidade de suportar cargas, contribuindo significativamente para melhor entender a interação entre solo e veículo em relação à trafegabilidade.

Segundo Linares (1995), o Corpo de Engenharia do Exército Americano foi o organismo que adotou intensivamente a utilização do penetrômetro nas avaliações da condição do solo. Com base nesse instrumento, foi desenvolvido um sistema de avaliação da trafegabilidade do solo para 50 passadas de um veículo. Os veículos eram caracterizados por um “índice de cone veicular”, como sendo o índice de cone de avaliação mínimo requerido pelo veículo para completar 50 passadas sobre o solo. O solo era caracterizado pelo índice de cone de avaliação medido através de um penetrômetro de cone. O índice de cone do solo era determinado através de medições diretas de forma que o valor médio possibilitava predizer se um veículo tinha possibilidade de passar ou não pelo terreno.

Uma das questões intrigantes no estudo da arte da guerra na atualidade consiste em determinar a velocidade de progressão de uma tropa que realiza um ataque. Porém, em função da natureza da tropa que progredirá no terreno, há necessidade de estabelecer uma classificação quanto à possibilidade de movimento e esta não é definida em termos absolutos porque é basicamente influenciada pelas condições meteorológicas e do terreno (OLIVEIRA, 2006). Segundo Carvalho (2005), para facilitar esse planejamento, o Exército Brasileiro adotou, a partir de 1999, o Processo de Integração do Terreno, das Condições Meteorológicas e do Inimigo (PITCI), o qual já tem sido aplicado no processo de tomada da decisão do comandante tático.

Para Carvalho (2005) a resistência do solo pode contribuir apenas de maneira emergencial na determinação da trafegabilidade, isto porque fornecerá dados imprecisos ante as variações de umidade do solo, freqüentes no território brasileiro. Um exemplo, é a resistência do solo arenoso que oscila entre 200 e 500 kPa (BRASIL, 1999). Entretanto, sob elevada concentração de água poderá se

liquefazer, chegando à capacidade de suporte inferior a dos solos lamacentos, não suportando a pressão exercida pelos carros de combate do Exército Brasileiro.

Francisco (2004) cita dois estudos importantes que foram desenvolvidos nesta área para os solos brasileiros. No primeiro, Vieira (1994), utilizando os softwares do Exército Americano e os dados de terreno do Campo de Instrução de Formosa, GO, simulou as condições de mobilidade dos veículos militares americanos M1A1 (carro de combate pesado), M2A2 (blindado de combate de infantaria), M113A1 (blindado de transporte de pessoal), M35A2 (caminhão 6x6, 2 1/2 t) e dos veículos brasileiros EE-T1 (carro de combate pesado), EE-9 (Cascavel – blindado de reconhecimento sobre rodas) e EE-25 (caminhão 6 x 6, 2 1/2 t). Suas conclusões mencionam que os parâmetros de cálculo adotados para os solos de regiões temperadas (EUA e Europa) não são adequados para os solos brasileiros. Embora o estudo de Vieira (1994) tenha se limitado aos solos locais, concluiu que o atual modelo da OTAN para análise da trafegabilidade (*NATO Reference Mobility Model – NRMM II*) seria viável e adequado, carecendo apenas da implementação dos estudos pertinentes para obtenção dos índices relativos aos solos locais.

De fato, as tabelas atualmente disponíveis sobre trafegabilidade não se aplicam aos veículos e às áreas de interesse do Brasil. Por conseguinte, para a determinação da capacidade de suporte dos solos se faz necessária a obtenção de índices de trafegabilidade pertinentes aos meios mecanizados e blindados nacionais, com enfoque sobre as viaturas e carros a serem empregados nas possíveis áreas de atuação da Força Terrestre, dentro ou mesmo fora do território nacional.

Prevendo esta necessidade, Francisco (2004) elaborou uma proposta de validação de um modelo para avaliação da trafegabilidade aplicado aos solos e veículos brasileiros, se dispendo determinar o menor índice de cone necessário e suficiente para permitir que uma viatura consiga completar com sucesso 50 passadas subseqüentes. O autor propôs a construção de uma pista protegida construída com materiais provenientes de solos finos (argilosos e siltosos) no qual os veículos de teste trafegariam, primeiramente, numa condição boa, ou seja, sob solo seco. Caso o veículo completasse as 50 passadas, este solo seria revolvido e umedecido gradualmente, no sentido de impor maior dificuldade ao tráfego. Como resultados seriam conhecidos o índice de cone, o teor de água do solo e a lâmina de água adicionada ao ponto em que houvesse imobilização do veículo. A grande

contribuição de Francisco (2004) seria agregar os dados ao PITCI, mediante o acréscimo de informações em tempo real das possibilidades e vulnerabilidades das condições meteorológicas na área de operações.

Se fosse superado este importante passo, grandes contribuições seriam fornecidas ao corpo logístico e estratégico do EB através da construção de mapas de restrições ao movimento, assim denominado por Oliveira (2006), que usando ferramentas do ARCGIS (*software* para manipulação de informações geográficas), comprovou a viabilidade de localizar áreas no terreno onde as tropas poderão se deslocar, evitando regiões restritivas ou impeditivas, através da organização e estruturação de uma base de dados espaciais relativas ao terreno, obtidas por sensoriamento remoto.

2.2.3 Índice de cone do solo

A medida da capacidade de trafegar de uma determinada viatura sobre certo tipo de solo é medida por intermédio do penetrômetro de cone. O cone foi desenvolvido com o objetivo de medir a resistência do solo à penetração e o resultado da medida é representado pelo IC que permite a comparação com o desempenho dos veículos.

Os maiores problemas de trafegabilidade estão relacionados com os solos de textura fina (argilas, siltes e suas variações) pela perda de resistência associada ao aumento do teor de água do solo. O parâmetro mais importante a ser considerado neste estudo é a resistência do solo ao tráfego continuado, que é expresso pelo ICR.

O Manual de Trafegabilidade dos Solos do Exército Brasileiro (BRASIL, 2001) reporta a utilização do penetrômetro de cone e instrui sobre a determinação do índice de cone do solo. A terminologia adotada e o procedimento operatório são descritos a seguir.

a) Terminologia (Fonte: BRASIL, 2001)

- Índice de Cone do Solo (ICS): é o valor que representa a resistência à penetração no solo de um cone com ângulo ponta de 30° e com área de 0,5 pol²;

- Ensaio de Remoldagem: é a quebra da estrutura do solo, seja pelo tráfego de veículos, seja por corte do extrator de solo. Normalmente resulta em redução da resistência à penetração, entretanto, o ensaio de remoldagem com o solo confinado pode gerar resistências maiores que no solo “in situ”;
- Índice de Remoldagem (IR): é a relação entre a resistência do solo remoldado e a resistência do solo em seu estado natural; é calculado pela razão entre a soma dos valores das resistências medidas depois da remoldagem e a soma das resistências medidas antes da remoldagem;
- Índice de Cone Relativo (ICR): é o produto entre o índice de cone pelo índice de remoldagem;
- Índice de Cone do Veículo (ICV): é o índice atribuído à determinada viatura e que indica a resistência mínima que o solo deve ter, em termos de índice de cone, necessária para suportar “n” passadas da viatura.

b) Procedimento para determinação do ICS (Fonte: BRASIL, 2001)

A área a ser examinada ou ensaiada deve ser devidamente limpa (recomenda-se cerca de 1 m²) e o solo superficial (camada vegetal e solo orgânico) deve ser retirado. A determinação do ICS é realizada observando a seqüência dos seguintes passos:

- escolhem-se pontos na área selecionada para a determinação do índice de cone;
- um operador segura o penetrômetro com as mãos pressiona-o contra o solo o mais verticalmente possível e faz a leitura no mostrador;
- são registradas 4 leituras: primeira leitura quando a base do cone coincidir com a superfície do terreno; segunda e terceira leitura, quando atingir a profundidade de 150 e 300 mm; quarta e última leitura, quando atingir a profundidade de 450 mm;
- repete-se a operação nos demais locais selecionados dentro da área e o valor a ser registrado em cada caso é o menor valor encontrado (correspondente à camada crítica);
- calcula-se o ICS tomando a média aritmética dos valores encontrados nos pontos selecionados dentro da área.

c) Procedimento para determinação do IR (Fonte: BRASIL, 2001)

Utiliza-se um cilindro de remoldagem que possui 50 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, montado sobre uma base de alumínio, com um soquete de aço com 450 gramas de massa, realizando o seguinte procedimento:

- retira-se uma amostra de solo indeformada com extrator;
- coloca-se a amostra diretamente no cilindro de remoldagem;
- com a amostra (solo de graduação fina) dentro do cilindro de remoldagem, empurra-se a amostra para o fundo do cilindro e mede-se a resistência com o penetrômetro, fazendo as leituras em 0 – 25 – 50 – 75 e 100 mm, a partir da superfície;
- aplica-se 100 golpes com o soquete caindo de uma altura de 300 mm, e mede-se a resistência desde a superfície até a profundidade de 100 mm, nos mesmos intervalos, resultando em cinco leituras.

Em relação aos veículos, foi estabelecida uma característica para cada viatura que é representada pelo ICV. O ICV se correlaciona ao valor mínimo de ICS para o qual o veículo pode completar com sucesso “n” passadas sobre o mesmo local, admitindo que o mesmo se desloque com velocidade constante, em terreno plano e não esteja tracionando reboque. O valor de ICV pode ser determinado tanto analiticamente quanto experimentalmente e será tanto mais baixo quanto melhor for o desempenho do veículo em solo de textura argilosa.

Porém, sabe-se que a resistência dos solos, especificamente os solos de textura fina, está intimamente ligada ao teor de água do solo local. O Exército Americano desenvolveu um modelo de previsão da resistência associada à umidade do solo chamado *Soil Moisture (Soil Strength Prediction Methodology) – SMSP*. Segundo Vieira (1994), o modelo permite obter o teor água do solo em duas faixas de profundidade (0 a 150 mm) e (150 a 300 mm) em intervalos de 24 horas durante todo o ano, partindo da pluviosidade e das características de drenagem do solo local para cada estação do ano (clima local). A resistência, representada pelo índice de cone, é obtida efetuando medições e associando-as aos respectivos teores de água.

2.2.4 Modelos de interação solo-veículo

As tentativas de prever o comportamento da trafegabilidade de veículos avançam para o desenvolvimento de modelos matemáticos com uso de equações empíricas a partir de dados experimentais. Um dos primeiros e mais aceitos modelos que definem a capacidade de tráfego de um determinado veículo sobre o solo foi proposto pela WES. Gill e Vanden Berg (1968) mencionam que o modelo da WES baseia-se no Índice de Mobilidade (IM) como uma característica específica do veículo, que agrega vários parâmetros, entre eles, o seu peso, pneus, motor, transmissão, etc. Neste método as condições do terreno são identificadas usando um penetrômetro de cone e as correlações entre o IM e o ICS são feitas por meio de equações empíricas.

A partir dos anos 70, baseados na difusão do índice de cone para avaliar o terreno, ocorre em todos os países um processo de análise crítica das teorias existentes e comparações de resultados experimentais. Em 1971, foi desenvolvido e publicado por Collins (1971) o primeiro modelo analítico de mobilidade (*Army Mobility Model – AMM 71*), permitindo a avaliação do comportamento dos veículos fora-de-estrada. Revisado e ampliado, esse modelo se transformou em referência para estudos de mobilidade, o *NATO Reference Mobility Model – NRMM* (HALEY et al., 1979). Após quase duas décadas de pesquisas e experimentos, o modelo sofreu atualizações, passando para sua segunda versão, o *NATO Reference Mobility Model Edition II - NRMM II* (AHLVIN; HALEY, 1992). Com a segunda versão do modelo, o NRMM II foi adotado pela OTAN e pelo EB.

Para Linares (1995), os inúmeros modelos empíricos para solucionar o problema da avaliação da trafegabilidade de veículos fizeram com que o desenvolvimento operativo destes se reduzisse aos baseados no índice de cone. Isso porque os parâmetros solo-veículo, derivados dos modelos teóricos dependem da natureza do solo, de sua umidade e da consolidação. O índice de cone, ao contrário, se “esquece” do tipo de solo e das condições em que se encontra, limitando-se a informar o seu estado resistente. Por isso, podem-se fazer classificações de solo para trafegabilidade baseado unicamente no índice de cone.

A maioria dos modelos baseia-se no ICS como único parâmetro representativo da capacidade de suporte do terreno, que corresponde à média dos

valores obtidos para a resistência à penetração por camada do solo. Os veículos, por sua vez, se caracterizam por índices, obtidos a partir de algumas de suas características em uma série de equações empíricas propostas pelos modelos. A comparação dos índices representativos de ambos os elementos, terreno e veículo, determina a possibilidade de passar ou não pelo terreno. A condição de trafegabilidade de um solo para um determinado veículo é dado por:

Se $ICS \geq ICV$, então “Passa”

O ICV é um parâmetro que se obtém a partir de um índice no qual estão incluídas uma série de variáveis do veículo, como o motor, a transmissão, a estrutura, as rodas e outras. Em alguns casos, o ICS é substituído pelo ICR, que é um índice de cone modificado para expressar a capacidade do solo em suportar diversas passadas subseqüentes de um veículo, calculado pela Equação 2.

$$ICR = ICS * IR \quad (2)$$

A condição de trafegabilidade ocorre quando o ICR de um solo é maior que ICV de um veículo, ou seja, nesta condição o solo tem resistência suficiente para suportar a passagem de um ou mais veículos iguais, em baixa velocidade e pelo mesmo caminho, permitindo paradas e reinício do deslocamento.

Além de analisar a questão de trafegabilidade ou não trafegabilidade, a maioria dos modelos também permite quantificar a força de tração capaz de ser desenvolvida pela excessiva resistência do solo, considerando para este fator a diferença entre ICS e ICV. Para tal, utilizam-se curvas experimentais que relacionam os parâmetros de capacidade de tração em função do excedente de resistência oferecida pelo terreno.

a) *NATO Reference Mobility Model (NRMM)*

O modelo de trafegabilidade NRMM é um modelo semi-empírico elaborado pela WES para calcular as ações na interface roda-solo, dirigido a resolver o problema da trafegabilidade e locomoção em caminhos com características de solo conhecidas. A seguir são apresentadas as expressões analíticas do modelo que permitem determinar o ICV para solos de textura fina. Elas sofreram alterações

entre a versão original proposta por Haley et al. (1979) e a segunda edição do modelo sugerida por Ahlvin e Haley (1992). As equações foram traduzidas e transcritas preservando suas unidades originais, portanto, não obedecendo ao SI.

ICV do modelo NRMM proposto por Haley et al. (1979)

$$ICV_1 = 7,0 + 0,2 \cdot IM - \left(\frac{39,2}{IM + 5,6} \right) \quad (3)$$

$$ICV_{50} = 19,27 + 0,43 \cdot IM - \left(\frac{125,79}{IM + 7,08} \right) \quad (4)$$

Sendo ICV_1 o índice de cone veicular para uma passada e ICV_{50} o índice correspondente a 50 passadas. Com a validação da segunda edição do modelo, foi introduzido um novo parâmetro na equação, que considera características dos pneus utilizados pelos veículos.

ICV do modelo NRMM-II proposto por Ahlvin e Haley (1992)

$$ICV_1 = \left(11,48 + 0,2 \cdot IM - \frac{39,2}{IM + 3,74} \right) \cdot \left(\frac{0,15}{\delta/h} \right)^{0,25} \quad \text{quando } IM < 115 \text{ psi} \quad (5)$$

$$ICV_1 = \left(4,1 \cdot IM^{0,446} \right) \cdot \left(\frac{0,15}{\delta/h} \right)^{0,25} \quad \text{quando } IM > 115 \text{ psi} \quad (6)$$

Em que IM é o Índice de Mobilidade definido como um parâmetro empírico composto por diversas características do veículo que influenciam na trafegabilidade. Ainda, δ é a deflexão e h é o perfil do pneu, ambos na unidade de polegadas.

IM do modelo NRMM proposto por Haley et al. (1979)

$$IM = 0,6 \left[\left(\frac{f. \text{ pressão} \times f. \text{ peso}}{f. \text{ pneu} \times f. \text{ garra}} + f. \text{ carga} - f. \text{ altura} \right) \times f. \text{ motor} \times f. \text{ transm.} \right] + 20 \quad (7)$$

IM do modelo NRMM-II proposto por Ahlvin e Haley (1992)

$$IM = \left(\frac{f. \text{ pressão pneu} \times f. \text{ peso}}{f. \text{ pneu} \times f. \text{ garra}} + f. \text{ carga} - f. \text{ altura} \right) \times f. \text{ motor} \times f. \text{ transm.} \quad (8)$$

A relação ICV e IM também foi obtida experimentalmente por Priddy (1995) para veículos de roda trafegando sobre solos de textura fina, validando as equações do NRMM, apresentado na Figura 2.

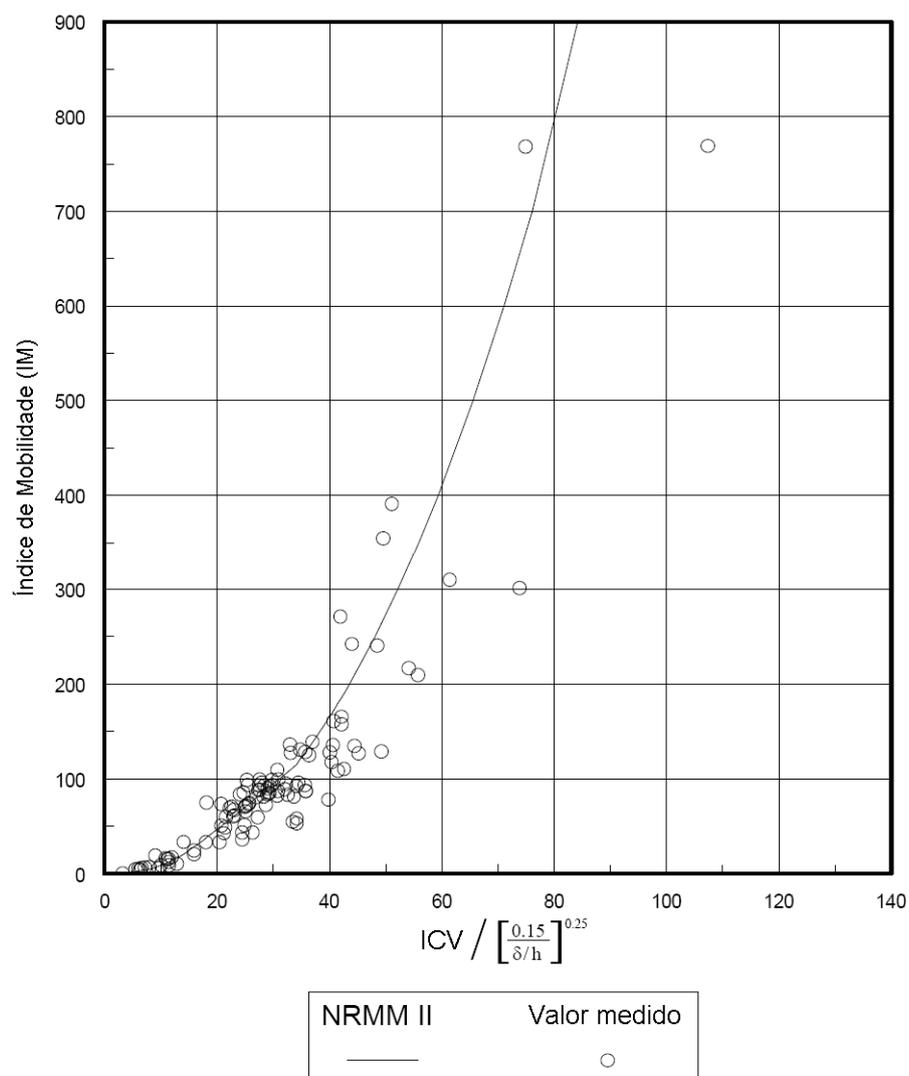


Figura 2 - Relação do Índice de Cone Veicular em função do Índice de Mobilidade para solos argilosos. Fonte: Priddy (1995)

b) *Mean Maximum Pressure* (MMP)

Antecedentes ao MMP remetem ao modelo desenvolvido por Schreiner (1971) como a uma forma simplificada de obter o ICV, em kPa, para viaturas de roda, necessário para uma única passada, que é calculado pela Equação 9.

$$ICV = \frac{1,85W}{2nb^{0,8}d^{0,8}\delta^{0,4}} \quad (9)$$

Em que “W” é o peso do veículo, “n” o número de eixos, “b” a largura do pneu, “d” o diâmetro da roda e “δ” a deflexão do pneu.

O modelo MMP foi originalmente proposto por Rowland (1972) baseado em teorias preditivas e medições da pressão aplicada ao solo por veículos de esteira. O autor desenvolveu uma equação própria que resume o modelo MMP a partir de parâmetros de peso do veículo, número de roletes, largura da esteira, entre outros. Segundo Rowland (1972), o ICV que permite a trafegabilidade de viaturas de rodas pode ser calculado multiplicando o valor obtido para MMP por 0,83. Posteriormente, Larminie (1992) adaptou sua equação para veículos de roda, assumindo a forma apresentada na Equação 10.

$$MMP = \frac{k.W}{2nb^{0,85}d^{1,15}(\delta/d)^{0,5}} \quad (10)$$

Em que o MMP é expresso em kPa e o valor de “k” representa um fator característico do veículo e dependente do número de eixos de tração, etc. Larminie (1992) apresenta o valor de “k” na Tabela 1.

Tabela 1 - Fator “k” do modelo MMP para veículos de roda.

Número de eixos	Proporção de eixos de tração						
	1	3/4	2/3	3/5	1/2	1/3	1/4
2	1,83	-	-	-	2,20	-	-
3	1,95	-	2,17	-	-	2,62	-
4	2,05	2,22	-	-	2,48	-	3,02
5	2,16	-	-	2,48	-	-	-
6	2,30	-	2,57	-	2,77	3,10	-

Fonte: Larminie (1992).

Segundo o modelo MMP, o índice de cone veicular (ICV) pode ser obtido para múltiplas passadas utilizando-se o fator multiplicador, indicado na Tabela 2.

Tabela 2 - Fator multiplicador do ICV para diversas passadas do veículo.

Número de passadas	1	2	5	10	25	50
Multiplicador do ICV	1,00	1,20	1,53	1,85	2,35	2,80

Fonte: Larminie (1988).

Por fim, os veículos militares foram classificados em categorias segundo o ICV necessário para trafegar, que se designam com números de 1 a 7 em ordem crescente de exigência quanto a dureza do solo. A Tabela 3 apresenta a classificação estabelecida com os valores de ICV para cada categoria.

Tabela 3 - Classificação dos veículos militares quanto ao Índice de Cone Veicular.

Categ.	ICV (kPa)	Veículos
1	140 a 200	Somente viaturas leves, com baixas pressões de contato com o solo (menos de 14,0 kPa).
2	20 a 340	Tratores de esteira, de alta velocidade, com esteiras relativamente largas e baixas pressões de contato.
3	340 a 410	Tratores com pressões médias de contato, carros de combate com pressões de contato relativamente baixas e algumas viaturas rebocadas com pressões de contato muito baixas.
4	410 a 480	A maior parte dos carros de combate médios, tratores com altas pressões de contato, e caminhões sobre rodas com tração total e viaturas reboque com baixa pressão de contato.
5	480 a 540	A maior parte dos caminhões sobre rodas com tração total ou grande número de reboques e carros de combate pesados.
6	540 a 610	Um grande número de caminhões de rodas com tração total e tração traseira e reboques construídos para aplicação principal em rodovias.
7	mais de 610	Viaturas com tração traseira e outras que geralmente não operam fora de estrada, especialmente em solos úmidos.

Fonte: BRASIL (2001).

Evidentemente, o que foi apresentado referente aos modelos é apenas a parte de interesse para o presente trabalho, ou seja, a forma de obtenção do ICV. De fato, eles englobam elementos intervenientes na trafegabilidade, tais como a previsão meteorológica, a distância de visibilidade, a presença de vegetação, de rampas, o tipo de solo e de obstáculos naturais e artificiais do terreno. Como foi

visto, as versões mais recentes consideram a deflexão dos pneus do veículo, o que de fato é importante. Francisco (2004) reforça que os algoritmos de previsão de trafegabilidade são fundamentados na interface entre o solo e o veículo.

Segundo análise de Viera (1994), o modelo americano adota as seguintes hipóteses para a interação solo-veículo: o terreno é descrito por atributos quantitativos; o motorista deve imprimir a máxima velocidade ao veículo, considerando-se como limitantes apenas a máxima aceleração que suporta e a máxima energia que pode absorver em função da rugosidade do terreno; os cálculos dinâmicos de tração do veículo e de transposição de obstáculos são tratados bidimensionalmente; a superfície do terreno, bem como os obstáculos são considerados rígidos, desconsiderando-se a suspensão do veículo ou a deformação dos pneus; o desempenho é previsto para cada veículo operando isoladamente; e, não é considerado o efeito do deslizamento das rodas.

O modelo MMP foi discutido por Hetherington (2001), que lhe atribuiu a vantagem pela aplicabilidade para ambos os veículos, com rodas ou sobre esteiras, porém impôs restrições sobre sua validade apenas para solos finos (entendem-se argilosos). Sua crítica recai sobre o significado físico do parâmetro que mensura pressão de contato do veículo sobre o solo, sabendo-se que os mecanismos que propulsionam a locomoção se diferem por completo.

O modelo de trafegabilidade para veículos de roda (NRMM) tem sido foco de estudo constante de vários pesquisadores, ora com objetivo de aperfeiçoar o modelo e ora para simplificá-lo, sem subtrair sua essência. Maclaurin (2007) comparou o modelo NRMM de Ahlvin e Haley (1992) com o modelo MMP para veículos de roda, de Rowland (1972) e concluiu que o modelo NRMM apresenta resultados similares, porém, estima valores de resistência necessária do solo inferior ao MMP. O autor ainda considera que a expressão de IM usada no modelo ICV se utiliza de parâmetros não usuais e recomenda que seja simplificado.

Priddy e Willoughby (2006) também compararam os dois modelos, baseados em ICV e MMP, avaliando o desempenho de 79 veículos de roda em solos argilosos úmidos. Usando a metodologia de predição observaram que os valores calculados para ICV pelas equações do NRMM foram mais aproximados (maior coeficiente R^2) do que os obtidos a partir do modelo MMP.

Considerado como uma crítica ao modelo MMP, Priddy e Willoughby (2006) publicaram um artigo de esclarecimento, mencionando as sutis diferenças entre os modelos MMP e ICV. Os autores reafirmam que o ICV é uma medida que se refere à resistência à penetração de cone mínima necessária para que um veículo atravesse um determinado número de vezes um solo “macio”, sem imobilização, e que pode ser obtido experimentalmente ou predito a partir das características dos veículos, com uso de equações. Porém, chamam atenção que o MMP, assim como o IM são valores que quantificam a habilidade de um veículo locomover-se sobre um terreno com baixa capacidade de suporte de carga, portanto, remetem no sentido de desempenho de um veículo. Para Priddy e Willoughby (2006), o MMP não deve ser comparado com ICV e sim com o IM, que no modelo NRMM, é o principal parâmetro para prever o ICV.

2.3 Material e métodos

2.3.1 Caracterização dos veículos

O estudo inicial se deu pela caracterização dos veículos, abrangendo duas viaturas: carro de reconhecimento sobre rodas (EE-9 Cascavel) e carro de transporte sobre rodas anfíbio (EE-11 Urutu).

O veículo blindado Cascavel mostrado na Figura 3a, de identificação EB-25287, era equipado com motor diesel MB OM-352A, de 128 kW de potência (DIN) a 2800 rpm, torque (DIN) de 432 N m e sua relação peso/potência foi de 95,8 kg kW⁻¹. Sua transmissão era automática (Allison MT-643), com quatro marchas para frente e uma de ré. O sistema de tração era composto por três eixos, de ação integral 4x4 e tração dianteira auxiliar, com bloqueio mecânico do diferencial de tração (6x6). A viatura usava pneus Continental Off-Road Sand, de bitola 12-R20, tipo E4 – 125 psi, com pressão interna recomendada de 390 kPa para rodovias, 290 kPa para deslocamento através de terreno firme e de 200 kPa para deslocamento em terrenos úmidos, arenosos ou com neve. O veículo ainda possui um sistema pneumático de ajuste da pressão dos pneus que permite a alteração em trânsito, de acordo com a necessidade.

O veículo blindado sobre rodas e anfíbio Urutu (Figura 3b), de identificação EB 3421-210181, era equipado com motor diesel MB OM-352A diesel, de 145 kW de potência (DIN) a 2800 rpm, com uma relação peso/potência de 78,9 kg kW⁻¹, porém, quando em carga máxima, pode chegar a 96,3 kg kW⁻¹. Sua transmissão e sistema de tração são idênticas ao veículo Cascavel. A viatura usava pneus Goodyear G377, bitola 12-R20, capacidade de carga J; similar ao Cascavel, o Urutu também possui um sistema pneumático de ajuste da pressão dos pneus que permite a alteração da pressão interna em trânsito.

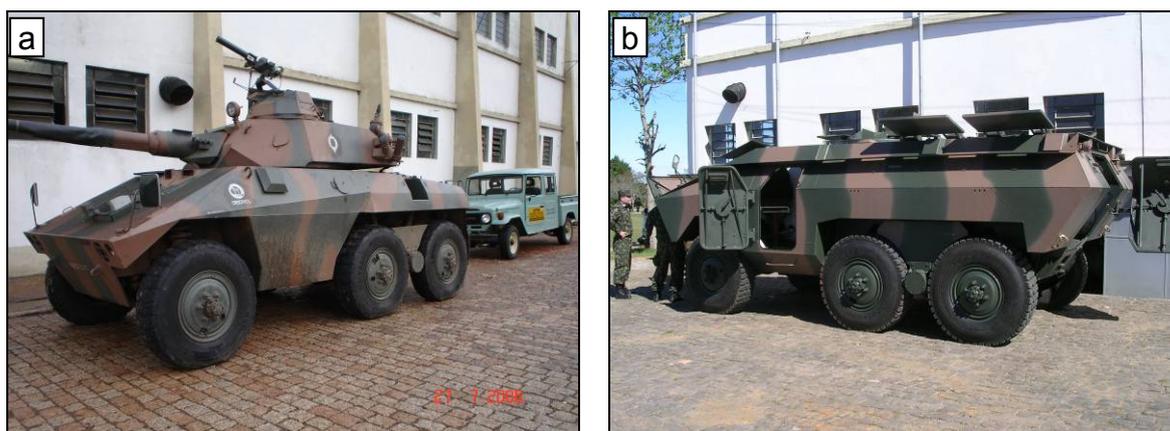


Figura 3 - Veículos blindados sobre rodas, pertencentes ao Exército Brasileiro:
a) Cascavel; b) Urutu.

Em laboratório, foram medidas as dimensões dos veículos (comprimento, largura, altura, bitola, distância entre eixos e altura mínima em relação ao solo). Também foram realizadas pesagens peso total e distribuição por eixo, sendo estes, pesados individualmente. As pesagens foram realizadas em balança tipo plataforma, marca Filizola, com capacidade de 200 kN e precisão de 0,1 kN. Os veículos foram pesados na sua configuração padrão, sem carga e com tanque de combustível cheio. As dimensões dos respectivos veículos e os pesos avaliados na sua caracterização constam na Tabela 4.

Tabela 4 – Dimensões e pesos das viaturas blindadas Cascavel e Urutu.

Dimensões (mm)	Cascavel	Urutu
Comprimento total	6.200	6.100
Largura total	2.640	2.650
Altura total	2.600	2.125
Distância entre eixos dianteiro e traseiro	3.750	3.770
Distância entre eixos dianteiro e mediano	2.340	2.340
Distância entre eixos mediano e traseiro	1.410	1.410
Bitola	2.100	2.100
Altura mínima do solo	378	370
Largura do pneu	240	240
Diâmetro do aro	600	600
Pesos (kN)		
Peso total medido	120,3	109,8
Peso medido no eixo dianteiro	42,8	42,0
Peso medido no eixo mediano	39,4	33,9
Peso medido no eixo traseiro	38,1	33,9

2.3.2 Determinação da área e pressão de contato pneu-solo

Foram determinadas as áreas de contato de cada pneu sobre o solo para diferentes pressões de pneu recomendadas pelo fabricante e apresentadas no manual de cada veículo. Para obtenção da área de contato, cada roda, com a pressão do pneu previamente ajustada, foi levantada e pintada com tinta e, posteriormente, baixada sobre uma folha de papel cartolina, seguindo a metodologia preconizada por Schwanghart (1991). As impressões dos pneus nessas folhas delinearam as áreas de contato dos pneus com o solo, permitindo atribuir-lhes valores numéricos de boa precisão.

Foi considerado o valor da área de contato igual à área delimitada pelo perímetro da imagem geométrica impressa no papel (Figura 4), calculada pelas Equações 11 e 12. Para baixas pressões a área foi considerada retangular e para altas pressões, foi considerada como elipsoidal.

$$\text{Área retangular: } A = L \times C \quad (11)$$

$$\text{Área elipsoidal: } A = \frac{L \times C \times \pi}{4} \quad (12)$$

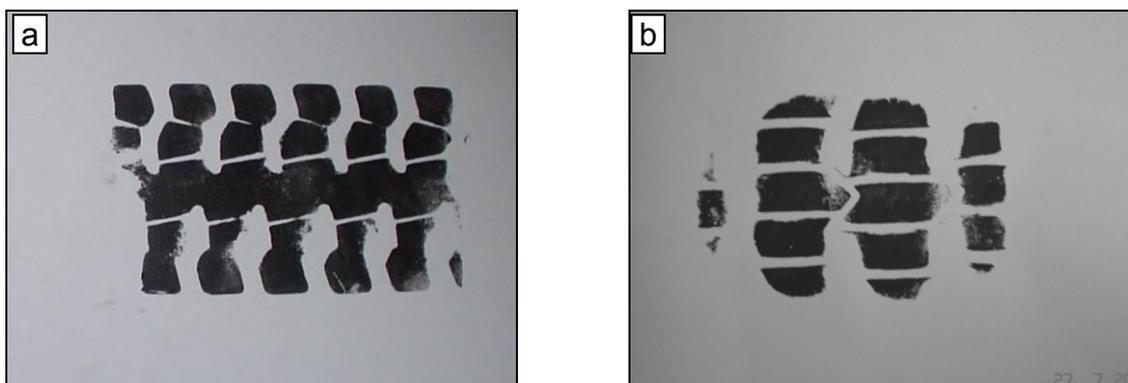


Figura 4 - Impressão da área de contato do pneu sobre o solo segundo seu formato: a) área de contato retangular; b) área de contato elipsoidal.

Esta metodologia foi adotada para diversas pressões internas de pneus, como forma de se obter valores alternativos de pressão de pneu para conseqüente uso em locais com solo de baixa capacidade de suporte de carga. As pressões para a qual se determinaram as áreas de contato foram 379; 276 e 138 kPa para todos os eixos dos veículos Cascavel e Urutu.

Para cada pressão também foi calculada a deflexão, como sendo a relação percentual entre a deformação do pneu e o seu perfil. O perfil indica a deformação máxima que um pneu possa ter, a fim de evitar aquecimento demasiado e fadiga prematura da borracha. Via de regra, deve-se evitar deflexões acima de 30%, a não ser, com indicação do fabricante.

A pressão exercida pelos pneus sobre o solo foi calculada dividindo-se a força peso suportado por cada eixo do veículo pela área de contato do respectivo par de rodas (pressão = força peso por unidade de área).

Para cada veículo estudado, foi estabelecido como pressão de contato dessa viatura o maior valor de pressão encontrado para uma determinada calibragem dos pneus. Pelo fato dos dados usualmente empregados pelo Exército estarem disponíveis no sistema inglês de unidades (pressões expressas em libras por polegadas quadradas - PSI), os parâmetros obtidos no Sistema Internacional de Unidades (pressões em Newtons por metro quadrado - Pascal) foram convenientemente convertidos com a finalidade de facilitar a interpretação dos usuários. Também foram utilizados valores de pressão no sistema técnico (quilogramas força por centímetros quadrados). As transformações de unidades entre os sistemas foram feitas utilizando multiplicadores apropriados ($1 \text{ kgf cm}^{-2} = 98,0665 \text{ kPa}$ e $1 \text{ PSI} = 6,894757 \text{ kPa}$).

2.3.3 Procedimentos de campo

Os experimentos de trafegabilidade foram conduzidos sobre Planossolos hidromórficos e Gleissolos da Depressão Central Gaúcha. O clima é do tipo subtropical Cfa, segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de $19,4^{\circ} \text{ C}$ e precipitação média anual de 1769 mm. Os testes de tráfego do Urutu e Cascavel foram conduzidos em dois locais, na área do NEMA no campus da UFSM (coordenadas geográficas médias de $29^{\circ}43'8'' \text{ S}$ e $53^{\circ}43'15'' \text{ W}$) sobre um Planossolo e no campo do 1º Regimento de Carros de Combate (1º RCC) do Centro de Instrução de Blindados do Exército Brasileiro (CIBLD), em Santa Maria ($29^{\circ}45'7'' \text{ S}$ e $53^{\circ}51'33'' \text{ W}$) sobre Planossolo e Gleissolo. Especificamente, a área do

NEMA/UFSM trata-se de um Planossolo Hidromórfico Eutrófico arênico, unidade Vacacáí.

Na área do NEMA/UFSM os testes foram conduzidos em duas condições de solo: uma em solo firme e consolidado, com vegetação rasteira de povoamento natural (com predomínio de gramíneas) e outra com solo mobilizado e preparado (duas sucessivas gradagens), conforme pode ser visto na Figura 5. Em ambas, o solo apresentava-se saturado, com umidade volumétrica entre 45 a 50%. Na área do 1º RCC/CIBLD, o tráfego foi conduzido sobre solo com vegetação de campo nativo sem perturbação, na condição de saturação e umidade volumétrica variando entre 45 e 60%.



Figura 5 - Área do experimento situada na várzea do NEMA/UFSM.

O tráfego era realizado em faixas paralelas não sobrepostas, inicialmente para maior pressão de pneu e posteriormente na menor pressão, até cobrir toda a área ou ocorrer imobilização do veículo. Então, eram identificados os locais considerados críticos, ou seja, aqueles em que a locomoção se dava visivelmente com dificuldade. Nestes pontos era medido o índice de cone com três repetições, tanto no rastro, como adjacente a ele. Também, em cada ponto era medida a umidade do solo com a sonda TDR. Posteriormente, estas informações pontuais foram correlacionadas com o patinamento medido pelos sensores.

Nos casos em que não ocorria imobilização no primeiro tráfego, repetia-se a passagem do veículo sobre o rastro anterior nos trajetos que continham pontos críticos pré-estabelecidos e registrava-se o número da passagem correspondente à imobilização. Se esse número ultrapassava de 10 vezes, o solo era considerado estável ao tráfego continuado, e então se repetia a avaliação do índice de cone.

Particularmente, na área do NEMA/UFSM, o patinamento do veículo Cascavel foi medido e comparado para as duas condições de solo (com vegetação e solo mobilizado) e para as duas pressões internas de pneu (alta/máxima e baixa/mínima), a fim de avaliar a influência da área de contato do pneu com o patinamento do veículo. A Figura 6 refere-se ao veículo Cascavel com a pressão interna dos pneus de 176 kPa, ajustada para tráfego.



Figura 6 - Viatura Cascavel com pneus ajustados para trafegar em baixa pressão.

2.3.4 Caracterização do solo

a) Índice de Cone do Solo

O ensaio de resistência à penetração consiste em introduzir no solo, a uma velocidade constante, uma haste metálica com ponta em forma de cone. Uma célula

de carga ou um anel dinamométrico possibilita determinar a força exercida pelo cone sobre o solo, conforme mostra a Figura 7. As leituras podem ser feitas em várias profundidades sobre o mesmo ponto, de forma a se obter a resistência à penetração em todo perfil do solo desejado. Para a determinação do Índice de Cone do Solo foi utilizado um “medidor eletrônico de compactação do solo” marca FALKER, modelo PLG1020, com cone tipo 1 (diâmetro de 20,27 mm).

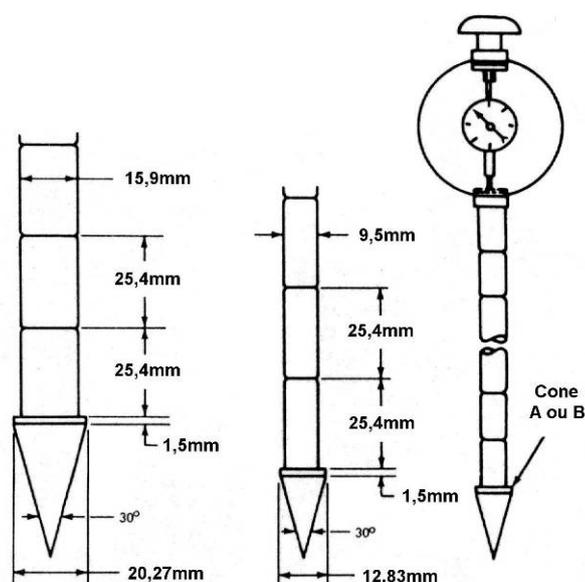


Figura 7 - Dimensões padronizadas pela ASAE para hastes e cones de penetrômetros. Fonte: ASAE S313.2 (1997).

Os valores de resistência do solo foram obtidos até a profundidade efetiva de 400 mm, descontada a lâmina de água superficial quando existente, com intervalo de leitura de 10 mm, sendo esta camada considerada como a de suporte de carga transmitida pelo rodado dos veículos. O conjunto de 40 valores, por vez, foi dividido em camada superficial (de 0 a 200 mm) e sub-superficial (de 200 a 400 mm), sendo calculada a sua média, resultando no ICS. Para repetição, em cada ponto onde se desejava conhecer o ICS eram realizadas três determinações da resistência à penetração e uma determinação da umidade do solo.

b) Umidade do Solo

A umidade do solo foi determinada de duas formas: pelo método da estufa e pela sonda TDR (*Time-Domain Reflectometer*). O método da estufa foi utilizado para

determinação da umidade gravimétrica (U_g) das amostras de solo ensaiadas em laboratório para a confecção da curva do índice de cone do solo em relação ao teor de água, no qual se utilizaram amostras coletadas em cilindro Uhland. O mesmo método também foi utilizado para calibração e controle da sonda TDR, a partir da coleta de uma amostra homogênea e representativa do solo no perfil de 0 a 300 mm. Este procedimento foi executado uma única vez para cada local onde se realizaram os experimentos, juntamente com a determinação da densidade do solo pelo método do anel.

O método da sonda TDR foi utilizado a campo para determinação da umidade volumétrica (U_v) nos pontos em que eram feitas medidas do ICS. As hastes da sonda eram introduzidas verticalmente no solo até a profundidade de 300 mm, sendo registradas e armazenadas três leituras de umidade no *Pocket*, correspondentes à umidade média do perfil. O valor médio das leituras foi, então, adotado como representativo no perfil do solo local.

Nos trabalhos, utilizou-se uma sonda TDR marca IMKO, modelo TRIME-FM (Figura 8), que permite a medição da umidade volumétrica no perfil até 300 mm de profundidade e armazena os dados no computador de mão acoplado.

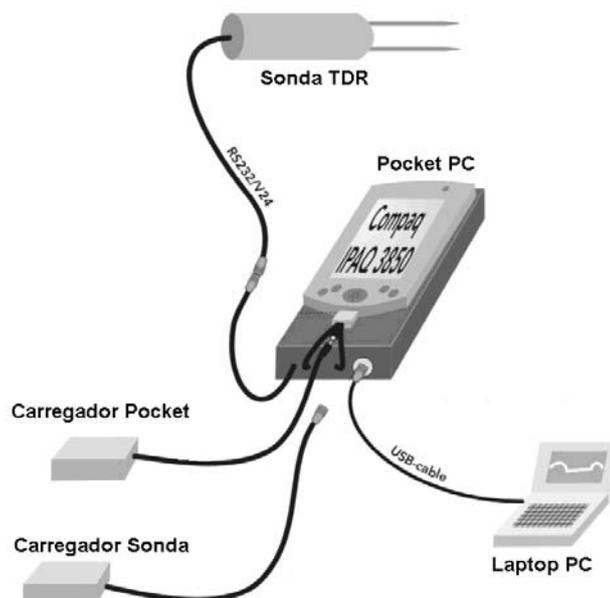


Figura 8 - Sonda TDR modelo TRIME-FM e acessórios para medição da umidade do solo. Fonte: IMKO (2006).

O medidor de umidade do solo utilizado possui uma calibração padrão de fábrica para solos minerais com densidade entre 1,1 e 1,7 Mg m⁻³ (TRANSATLANTIC, 2007), portanto, dentro da faixa de utilização dos solos abordados pelo presente trabalho. Bernardo et al. (2006) citam que a relação entre a constante dielétrica do solo e sua umidade volumétrica é virtualmente independente da textura e densidade deste, bem como da temperatura e conteúdo de sal, o que torna o método TDR preciso para a determinação da umidade do solo.

As diferentes umidades do solo podem ser convertidas com a utilização do valor da densidade do solo seco (Ds), através da Equação 13.

$$U_v (\%) = U_g \left(\frac{g_{H_2O}}{g_{Solo}} \right) \times D_s \left(\frac{Mg_{Solo}}{m^3_{Solo}} \right) \times 100 \quad (13)$$

A Figura 9 mostra o momento da determinação da resistência à penetração do solo e a medição da umidade do solo por ocasião do teste com o veículo Urutu na área da UFSM.



Figura 9 - Momento da determinação da resistência à penetração do solo e da medição da umidade do solo na área experimental do NEMA/UFSM.

c) Curva da resistência à penetração

A umidade do solo decorrente de chuvas influi sensivelmente na capacidade de suporte de carga do solo. Para comprovar a relação direta da umidade com a resistência do solo à penetração, foram realizadas duas curvas de relação para dois diferentes tipos de solo e locais de coleta. Embora essa relação sempre exista a campo, na maioria das vezes ela não apresenta percepção nítida quando determinada diretamente a campo, devido à variabilidade temporal e espacial naturalmente existente no campo quanto a sua densidade (compactação), textura, etc, e tão pouco o fator da umidade possa ser isoladamente controlado.

Uma primeira abordagem laboratorial do solo foi feita por ocasião do reconhecimento da área de tráfego, conduzido em 4 de outubro de 2006 no Campo de Instrução de Saicã. Uma segunda curva foi obtida com a coleta de solo no dia 20 de maio de 2009 na área da várzea do NEMA, na UFSM. Foram coletadas 20 amostras indeformadas de solo na camada abaixo dos 50 mm, em cilindro Uhland (76 mm de diâmetro e 76 mm de altura), observadas na Figura 10, as quais foram tratadas em laboratório, visando à obtenção de uma curva que permitisse prever a capacidade de suporte do solo em função do teor de umidade.



Figura 10 - Cilindros de solo coletados para a obtenção do ICS em umidade controlada.

Após coletadas, as amostras de solo foram saturadas em água por 48 horas e, posteriormente, postas à drenagem gravitacional. A partir da saturação, a cada dia eram escolhidas, aleatoriamente, duas amostras (cilindros) sobre o qual era realizada a penetrometria do solo dentro do cilindro, com o PLG1020. Devido as

suas dimensões, eram fornecidas 6 leituras (1 a cada 10 mm), sendo excluídas duas, as extremas. Dos demais valores foi calculada a média. Imediatamente após finalizado este procedimento, a amostra de solo era retirada do cilindro para determinação da umidade gravimétrica pelo método da estufa. Este procedimento foi repetido por 10 vezes, em 10 dias consecutivos. A umidade pontual e a média das leituras do penetrômetro forneceram os parâmetros para a obtenção da curva.

2.3.5 Determinação do patinamento

Para determinar o patinamento instantâneo do veículo, além de conhecer a velocidade real de deslocamento sobre o solo, é preciso conhecer e correlacionar com a velocidade escalar das rodas. Uma maneira de obter precisamente a velocidade escalar das rodas é medir a rotação angular da mesma, o que pode ser conseguido por meio de sensores indutivos acoplados individualmente sobre uma roda dentada solidária com a roda do eixo motriz, e esta foi a solução adotada no presente estudo. Para determinação do patinamento foi utilizada a metodologia desenvolvida por Gabriel Filho et al. (2004), que consta a seguir.

a) Velocidade de deslocamento

A velocidade de deslocamento dos veículos foi obtida com o receptor de sinal de GPS marca Trimble, modelo AgGPS EZ-Guide SL, conhecido como “barra de luzes”. Este equipamento recebe sinal da banda L1 e processa um algoritmo de cálculo para melhorar a acurácia de posição. A antena foi instalada sobre o veículo no ponto mais alto e de menor interferência de sinal. O visor da barra de luzes foi fixado acima do painel de instrumentos, para que o operador pudesse visualizar facilmente o estado de funcionamento do sistema. Um cabo de comunicação serial RS 232 – DB9 conectava o GPS com o *datalogger*, transmitindo uma informação em formato de *string*, que continha, entre outros dados, o valor da velocidade. Todo o sistema foi alimentado por uma bateria independente de 12V CC.

A vantagem de medir a velocidade por meio de posição referencial é a de não haver interferência do terreno sobre a medição e sua desvantagem é a dependência

da qualidade de sinal fornecida pela geometria espacial dos satélites em relação ao receptor. Embora o receptor de GPS apresente certa imprecisão em condições de aceleração e desaceleração, fato que teoricamente não produziu grande interferência nos dados, pois o veículo se deslocou em condições de campo com a velocidade estabilizada, ou seja, sem muita variação. Detalhes sobre configuração do equipamento estão especificados no Apêndice 1.

b) Velocidade escalar das rodas

Para medição da rotação das rodas motrizes foram utilizadas duas rodas dentadas, com 32 dentes cada, e dois sensores de pulso. As rodas dentadas foram fixadas nas rodas do eixo de tração traseiro dos blindados, através de suportes projetados e construídos por Russini (2009), conforme mostra a Figura 11. O sensor de proximidade indutivo, fixo à estrutura do veículo e estático em relação ao movimento da roda, media a frequência de pulsos de acordo com a passagem dos dentes.



Figura 11 - Medição de velocidade angular com sensor indutivo e roda dentada.

O perímetro das rodas foi determinado seguindo a metodologia da ASAE S296.4 (1999). Foi medida a distância percorrida pelo veículo no trajeto equivalente

a dez voltas das rodas, em marcha lenta (aproximadamente 5 km h^{-1}), com engrenamento da transmissão na configuração 6x6 e trafegando sobre pista plana e firme (rua calçada). Este procedimento foi repetido para cada uma das pressões de pneu utilizadas (176 e 379 kPa), obtendo-se, assim, o perímetro de todas as seis rodas do veículo.

A partir da obtenção da frequência de pulsos dos sensores e do perímetro das rodas, a velocidade escalar das rodas foi calculada através da Equação 14.

$$V_{\text{roda}} = \frac{\text{Freq} \times \text{Per} \times 3,6}{n} \quad (14)$$

Em que:

V_{roda} = velocidade da roda (km h^{-1});

Freq = frequência captada pelo sensor (Hz);

Per = perímetro da roda (m);

n = número de dentes da roda e igual a 32.

O patinamento (P) das rodas motrizes foi calculado pela Equação 15:

$$P = \frac{(V_{\text{roda}} - V_{\text{gps}}) \times 100}{V_{\text{roda}}} \quad (15)$$

Em que:

V_{roda} = velocidade média da roda (km h^{-1});

V_{gps} = velocidade média obtida pelo GPS (km h^{-1});

c) Aquisição de dados

As informações geradas simultaneamente pelo GPS e pelos sensores de roda foram registradas e armazenadas em *datalogger*. Utilizou-se um *datalogger* marca CAMPBELL modelo CR1000 (Figura 12), com 4 *Mbytes* de memória de armazenamento e o software PC400 como programador e interface com o PC. A frequência de leitura e armazenamento de dados foi de 1 Hz. A rotina de programação para aquisição de dados foi elaborada especificamente para este fim e consta no Apêndice 2.



Figura 12 - Datalogger de aquisição de dados CAMPBELL modelo CR1000 usado nos experimentos.

A Figura 13 mostra o veículo Cascavel instrumentado no NEMA com os sensores de roda, GPS e *datalogger* para aquisição de dados, momentos antes ao teste de campo.



Figura 13 - Veículo Cascavel instrumentado com sensor de roda, GPS e *datalogger*.

d) Calibração dos sensores

Após a instrumentação dos veículos, os sensores foram calibrados para o tráfego em pista seca. Nesta etapa, com o veículo em movimento, era conferido o perímetro adotado para as rodas de cada eixo e a seguir comparadas as velocidade registradas pelo GPS e as obtidas pelos sensores. A Figura 14 apresenta graficamente uma amostra de dados correspondente ao intervalo de tempo de 100 segundos de registro, obtidas locomovendo o veículo em pista seca. A sobreposição das curvas significa sincronia das velocidades.

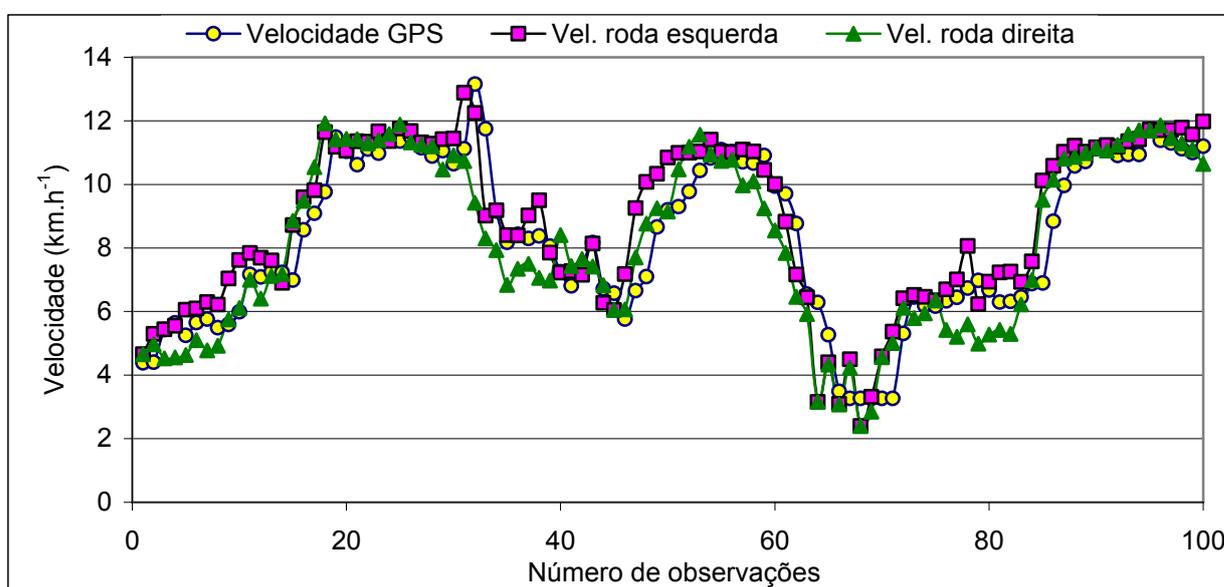


Figura 14 - Amostra do registro das velocidades no teste de calibração dos sensores em pista seca para o veículo Cascavel.

Uma análise mais criteriosa demonstra que a velocidade real registrada pelo GPS está levemente defasada no tempo em relação à velocidade das rodas. Este fenômeno é conhecido como atraso de sinal (*delay*) do GPS presente nos receptores de banda L1, porém muito pequeno no Trimble (1 a 2 segundos). Nos receptores comuns de navegação, este atraso é muito maior e pode variar de 2 a 5 segundos, inviabilizando seu uso para este fim. O desvio das curvas da velocidade das rodas esquerda e direita em relação à fornecida pelo GPS, nos casos em que um lado apresenta velocidade maior e o outro lado menor que a do GPS remete à realização de manobras.

2.3.6 Modelos de predição de trafegabilidade

A partir dos dados obtidos na caracterização dos veículos Urutu e Cascavel, determinou-se o ICV dos veículos, de acordo com as equações propostas nos dois modelos escolhidos. Posteriormente, esses valores foram comparados ao índice de cone do solo encontrado no campo como sendo o mínimo necessário para trafegar uma vez e três vezes. O modelo que fornecer o ICV mais próximo do ICS necessário será denominado o mais adequado.

a) ICV do modelo NRMM-II (AHLVIN e HALEY, 1992)

$$ICV_1 = (4,1 \times IM^{0,446}) \times \left(\frac{0,15}{\delta/h} \right)^{0,25}$$

Em que IM é o índice de mobilidade, em PSI; δ é a deflexão e h é o perfil do pneu, ambos na unidade de polegadas.

$$IM = \left(\frac{\text{f. pressão pneu} \times \text{f. peso}}{\text{f. pneu} \times \text{f. garra}} + \text{f. carga} - \text{f. altura} \right) \times \text{f. motor} \times \text{f. transm.}$$

Onde:

$$\text{Fator pressão pneu} = \frac{\text{peso bruto (lbs)}}{\text{largura do pneu (pol)} \times \text{raio externo (pol)} \times \text{núm. de rodas}}$$

Fator peso	faixa de peso (lbs)*	equação fator peso
	< 2.000	Y = 0,533.X
	2.000 a 13.500	Y = 0,033.X + 1,050
	13.500 a 20.000	Y = 0,142.X - 0,420
	> 20.000	Y = 0,278.X - 3,115

Em que: $* = \frac{\text{peso bruto (lbs)}}{\text{núm. de eixos}}$; $X = \frac{\text{peso bruto (klbs)}}{\text{núm. de eixos}}$; Y = fator peso

$$\text{Fator pneu} = \frac{10 + \text{largura do pneu (pol)}}{100}$$

Fator garra = 1,05 com corrente
= 1,00 sem corrente

Fator altura	= $\frac{\text{vão livre entre solo e eixo (pol)}}{10}$
Fator carga	= $\frac{\text{peso bruto (klbs)}}{\text{núm. de rodas}}$
Fator motor	= 1,00 se maior que 10 hp por tonelada = 1,05 se menor que 10 hp por tonelada
Fator transmissão	= 1,00 se transmissão automática = 1,05 se transmissão manual

b) ICV do modelo MMP (LARMINE, 1992)

$$\text{ICV}_1 = \text{MMP} \times 0,83$$

$$\text{MMP} = \frac{k \times W}{2 \times n \times b^{0,85} \times d^{1,15} \times (\delta/d)^{0,5}}$$

Em que o MMP é expresso em kPa, “W” é o peso do veículo, em kN; “n” é o número de eixos, “b” é a largura do pneu, em metros; “d” é o diâmetro da roda, em metros e “δ” é a deflexão do pneu, em metros. Para “k” foi adotado o valor de 1,95, de acordo com a Tabela 1.

2.4 Resultados e discussão

2.4.1 Caracterização dos veículos

a) Viatura blindada EE-11 Urutu

Na caracterização estática do blindado Urutu feita em laboratório, constatou-se que o peso total de 109,3 kN é distribuído em 38 % sobre o eixo dianteiro e 31 % sobre cada um dos eixos trucasos (mediano e traseiro), demonstrando uma divisão razoavelmente equilibrada. Os demais dados obtidos apresentam-se na Tabela 5 e foram medidos somente para as pressões de 138, 276 e 379 kPa, seguindo orientação do manual do veículo para as condições de terreno úmido, normal e seco, respectivamente.

Tabela 5 - Dados da caracterização estática do veículo blindado Urutu.

Eixo/ Roda	Deflexão do pneu %	Área de contato cm ²	Peso por eixo kN	Pressão sobre o solo kPa
Pressão dos pneus = 138 kPa				
DD	28	1080	42,0	389
DE	27	960	42,0	437
MD	23	912	33,9	372
ME	21	792	33,9	428
TD	23	888	33,9	382
TE	22	852	33,9	398
Pressão dos pneus = 276 kPa				
DD	20	804	42,0	522
DE	18	768	42,0	547
MD	18	588	33,9	577
ME	15	624	33,9	544
TD	16	504	33,9	673
TE	16	624	33,9	544
Pressão dos pneus = 379 kPa				
DD	18	631	42,0	665
DE	16	603	42,0	696
MD	16	452	33,9	750
ME	13	462	33,9	735
TD	15	500	33,9	679
TE	13	500	33,9	679

Eixo D/M/T: Dianteiro / Mediano / Traseiro; Roda D/E: lado Direito / Esquerdo.

Analisando os dados sobre deflexão e área de contato, aparecem as primeiras diferenças: curiosamente, o lado direito do veículo apresenta sempre a maior deflexão para a igual condição; no eixo dianteiro, a roda direita também apresenta área de contato superior à da roda esquerda, em todas as pressões analisadas. A área de contato dos demais pneus parece mais equilibrada. Deduz-se que esta característica se deve a posição relativa do motor, próximo ao eixo dianteiro e do lado direito. Esta diferença pode provocar desempenho assimétrico no tráfego, desigual tração e patinamento, e ainda, distribuição unilateral do movimento pelo diferencial. A consequência não desejada é manifestada na tendência de imobilizar o lado direito do veículo.

Em relação ao perímetro da roda medido, diferentemente do esperado, a circunferência medida no rodado dianteiro foi maior que nos demais, em ambas as pressões internas e em igual condição de bitola do pneu (Tabela 6). De veículos com tração dianteira auxiliar, seja 4x4 ou 6x6, é desejado um avanço cinemático do eixo dianteiro na ordem de 5%, do contrário, a tração exercida pelos eixos trucados “empurra” a dianteira, que passa a se comportar como freio, mesmo com a tração engatada.

Tabela 6 - Distância percorrida em 10 voltas das rodas do veículo blindado Urutu.

Pressão do pneu	Roda do eixo dianteiro	Roda do eixo mediano	Roda do eixo traseiro
138 kPa	34,06 m	33,75 m	33,78 m
276 kPa	34,22 m	33,87 m	33,88 m

Para o Urutu constatou-se um pequeno atraso cinemático, expressado na diferença relativa das medidas de percurso do rodado dianteiro perante os demais. Acredita-se que o avanço cinemático do veículo seja nulo e que a diferença encontrada possa ser atribuída simplesmente ao fato de o rodado dianteiro apresentar maior deflexão, o que diminui seu raio dinâmico. Na prática, quando o patinamento é bem maior que o atraso cinemático, o efeito deste atraso se anula, não impondo dificuldade adicional.

b) Viatura blindada EE-9 Cascavel

Comparando os veículos Cascavel e Urutu percebe-se que os pneus do Cascavel, caracterizado na Tabela 7, possuem uma deflexão e área de contato com solo ligeiramente maior e, conseqüentemente, uma melhor distribuição do peso sobre o solo. Atribui-se o fato ao tipo de pneu usado, por ser mais emborrachado e próprio para o tráfego em solos lamacentos, e ao seu peso global, um pouco superior ao Urutu. A tendência de a deflexão ser maior no lado direito do veículo também persiste.

Se comparadas as áreas de contato obtidas a partir da metodologia descrita no trabalho com a equação proposta por Inns e Kilgour (1978) pode-se afirmar que ela é precisa apenas para pressões internas em que o pneu apresenta maior rigidez. Por não considerar a pressão interna, a equação subestima a área de contato a baixas pressões internas. A 138 kPa, o cálculo pela equação fornece uma área de contato em torno de 669 cm², enquanto que a área medida foi de 1.124 cm².

Tabela 7 - Dados da caracterização estática do veículo blindado Cascavel.

Roda	Deflexão do pneu %	Área de contato cm ²	Peso por eixo kN	Pressão sobre solo kPa
Pressão dos pneus = 138 kPa				
DD	36	1265	42,8	338
DE	34	1188	42,8	360
MD	30	1080	39,4	365
ME	30	1066	39,4	369
TD	29	1075	38,1	355
TE	28	1068	38,1	357
Pressão dos pneus = 276 kPa				
DD	26	797	42,8	536
DE	24	728	42,8	588
MD	22	762	39,4	517
ME	21	662	39,4	595
TD	21	650	38,1	587
TE	22	694	38,1	550
Pressão dos pneus = 379 kPa				
DD	23	714	42,8	599
DE	19	641	42,8	667
MD	18	624	39,4	631
ME	15	599	39,4	657
TD	14	522	38,1	731
TE	16	614	38,1	621

Eixo D/M/T: Dianteiro / Mediano / Traseiro; Roda D/E: lado Direito / Esquerdo.

A relação pressão pneu/solo do veículo Cascavel apresenta valores médios inferiores que os obtidos para o Urutu, porém, quando calibrado em 276 kPa, a pressão de contato do pneu com o solo em ambos os veículos é similar, conforme pode ser verificada na Figura 15.

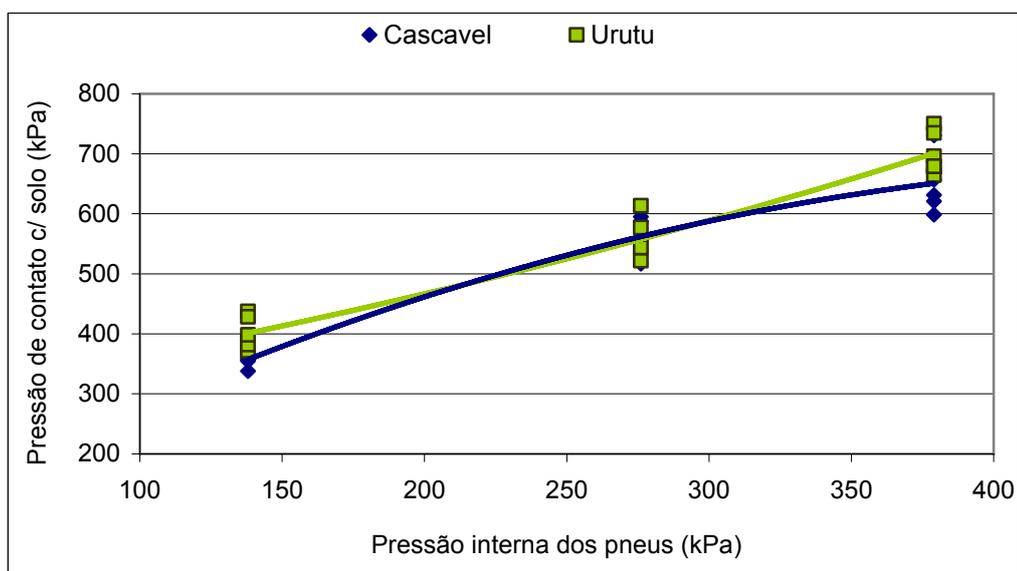


Figura 15 - Pressão de contato com o solo dos veículos Cascavel e Urutu determinadas para três diferentes pressões interna dos pneus.

Condições mais favoráveis do Cascavel em relação ao Urutu também são verificadas no quesito avanço cinemático. Como a distância percorrida pelo rodado dianteiro em dez voltas é menor (Tabela 8), aliado ao fato de que a dimensão do raio cinemático ser menor nos pneus dianteiros (maior deflexão para a mesma pressão) conclui-se haver um avanço favorável à condição de tração nos três eixos (6x6).

Tabela 8 - Distância percorrida em 10 voltas das rodas do veículo Cascavel.

Pressão do pneu	Roda do eixo dianteiro	Roda do eixo mediano	Roda do eixo traseiro
138 kPa	34,06 m	34,10 m	34,16 m
276 kPa	34,26 m	34,39 m	34,36 m

Entre os veículos mais utilizados pelo EB, entre blindados sobre esteira (M60, Leopard 1A1, M113 e M1A1) e blindados sobre rodas (Urutu e Cascavel), a literatura já mencionava o índice de cone veicular daqueles de origem estrangeira (blindados

sobre esteira), porém, não se tinha conhecimento sobre a distribuição do peso dos veículos de fabricação nacional, justamente daqueles que foram objeto deste estudo. Como resumo da caracterização estática dos veículos, apresenta-se na Tabela 9 os valores da pressão de contato sobre o solo, para que sirva de referência para outros estudos.

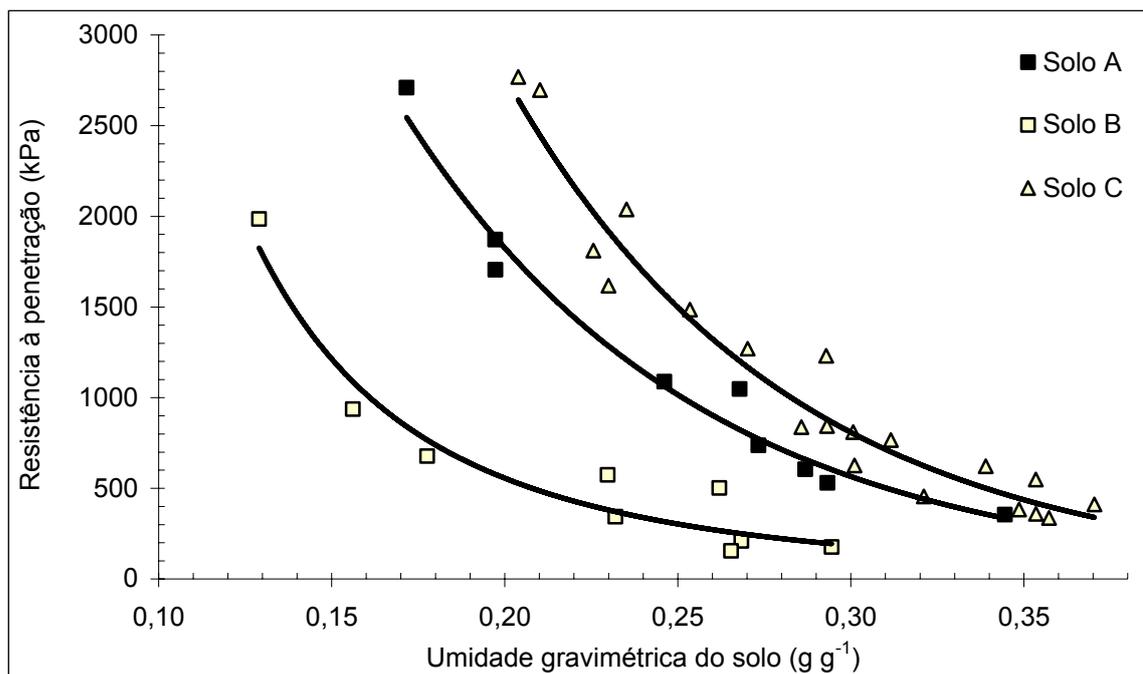
Tabela 9 - Pressão de contato sobre o solo para veículos de esteira e de rodas utilizados pelo EB.

Veículo	Peso (kN)	kPa	PSI	kgf cm ⁻²
¹ M 60	520	75	10,9	0,75
¹ Leopard 1A1	416	65	9,4	0,65
¹ M113	108	50	7,5	0,50
¹ M1A1	618	94	13,7	0,96
² Urutu	110	401	58	4,09
² Cascavel	120	357	52	3,64

¹ Fonte: BRASIL (2001); ² Dados obtidos pelo autor

2.4.2 Curvas do Índice de Cone do Solo

Na Figura 16 apresentam-se as curvas da resistência à penetração do solo obtida em laboratório a partir de amostras de Planossolos coletadas na área experimental do NEMA/UFSM, na condição solo firme e mobilizado e na área do CIBLD/EB, sobre campo nativo. As curvas comprovam a relação inversa entre o índice de cone e a umidade do solo, em acordo com Klein et al. (1998) e Machado (2008), entre outros. Para os solos analisados, também era de se esperar correlação do IC com a densidade do solo, tal como evidenciam as curvas relativas ao solo mobilizado e firme. A curva referente ao solo em campo nativo se desvia em relação à densidade porque foi obtida a partir de um solo coletado em outro local, possivelmente com textura diferente.



A - Solo firme, local: NEMA/UFSM ($D_s = 1,45 \text{ Mg m}^{-3}$)
 B - Solo mobilizado, local: NEMA/UFSM ($D_s = 1,28 \text{ Mg m}^{-3}$)
 C - Campo nativo, local: CIBLD/EB ($D_s = 1,28 \text{ Mg m}^{-3}$)

Figura 16 - Curvas da resistência à penetração do solo em função do teor de água para os Planossolos utilizados no experimento.

Em relação à trafegabilidade, fica evidente que previsões a partir da umidade do solo só podem ser feitas se conhecida a curva do comportamento do solo, IC x Umidade, que provavelmente varia de solo para solo e local para local, tornando a determinação do ICS indispensável. Considerando até 500 kPa como uma faixa crítica para a trafegabilidade de veículos militares de roda, pode-se afirmar que, para os solos estudados, esta condição representa o teor de água no solo no ponto de saturação, ou então, próximo a ele, tomando como referência os pontos de umidade extrema das curvas (solo saturado). Em umidade do solo inferior a $0,20 \text{ g g}^{-1}$ qualquer condição dos solos estudados suportaria o peso dos veículos, permitindo sua locomoção.

2.4.3 Desempenho dos veículos a campo

a) Viatura blindada EE-11 Urutu

Nos testes de campo realizados com o veículo trafegando sobre terreno em diversas condições de umidade e consistência do solo, buscou-se encontrar valores para o índice de cone que caracterizasse qualitativamente o desempenho do veículo, através do monitoramento contínuo do patinamento. Apesar de os experimentos serem desenvolvidos em duas áreas (na UFSM e no EB) e com características de solo ligeiramente diferentes, os resultados apontam para conclusões semelhantes.

No campo, as condições de mobilidade foram divididas basicamente em três situações: imobilização, quando o veículo não tinha autonomia para se deslocar de um ponto ao outro por seus próprios meios; dificuldade, quando o veículo se deslocava com elevado patinamento em pelo menos um ponto do trecho pré-estabelecido; e, seguro, quando não havia risco de imobilização para a condição do solo sobre o qual o veículo trafegava. Estas situações poderiam ser encontradas juntas numa única passada ou ocorrer no tráfego continuado com sobreposição de várias passadas.

A Figura 17 mostra momentos da realização dos testes de campo na área do NEMA/UFSM e no CIBLD/EB com o veículo Urutu, ilustrando as situações em que ocorriam as maiores dificuldades de tráfego.



Figura 17 - Testes de trafegabilidade a campo com veículo Urutu nos dois locais dos experimentos: a) NEMA/UFSM; b) CIBLD/EB.

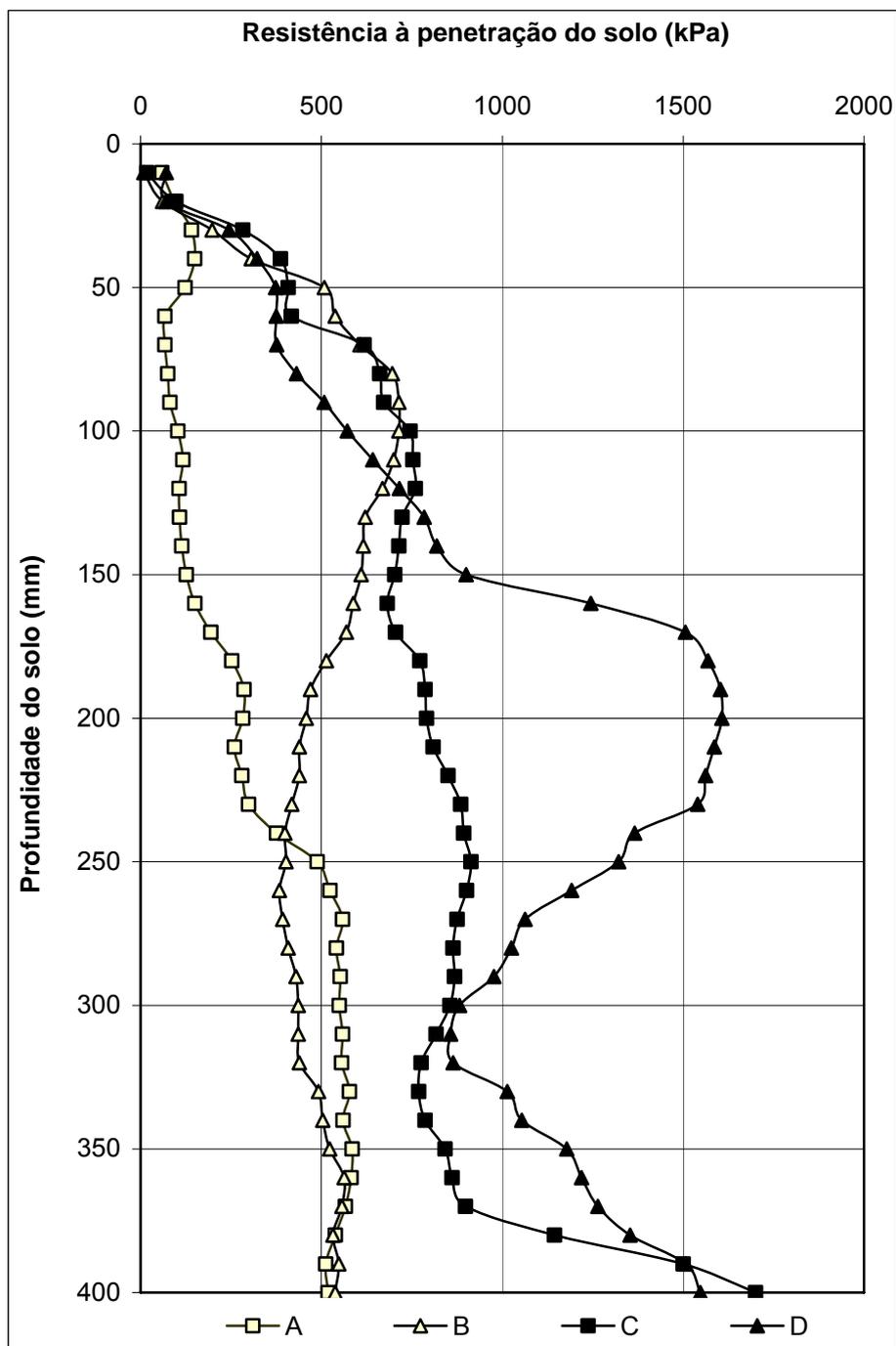
A Figura 18 mostra as curvas e o Apêndice 3 apresenta os valores médios da resistência à penetração do solo para as distintas situações de tráfego do veículo Urutu na área da UFSM. Na condição mobilizado, a umidade volumétrica do solo era

de 47,5% e a densidade $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$. Já, o solo firme apresentava umidade de 42,9% e densidade de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$.

Tanto sobre solo firme (vegetação de grama) como no solo mobilizado não houve imobilização do Urutu no tráfego singular (uma única passada) para a calibragem de 276 kPa nos pneus, o que supostamente seria a pior condição. Por se tratar de uma área destinada à produção agrícola com preparo anual do solo, este apresenta uma camada sub-superficial de maior resistência, o suficiente para permitir a locomoção do blindado. No solo mobilizado, o índice de cone de 317 kPa na camada de 0 a 400 mm e de 499 kPa na camada de 200 a 400 mm foram suficientes para permitir uma única passada do veículo.

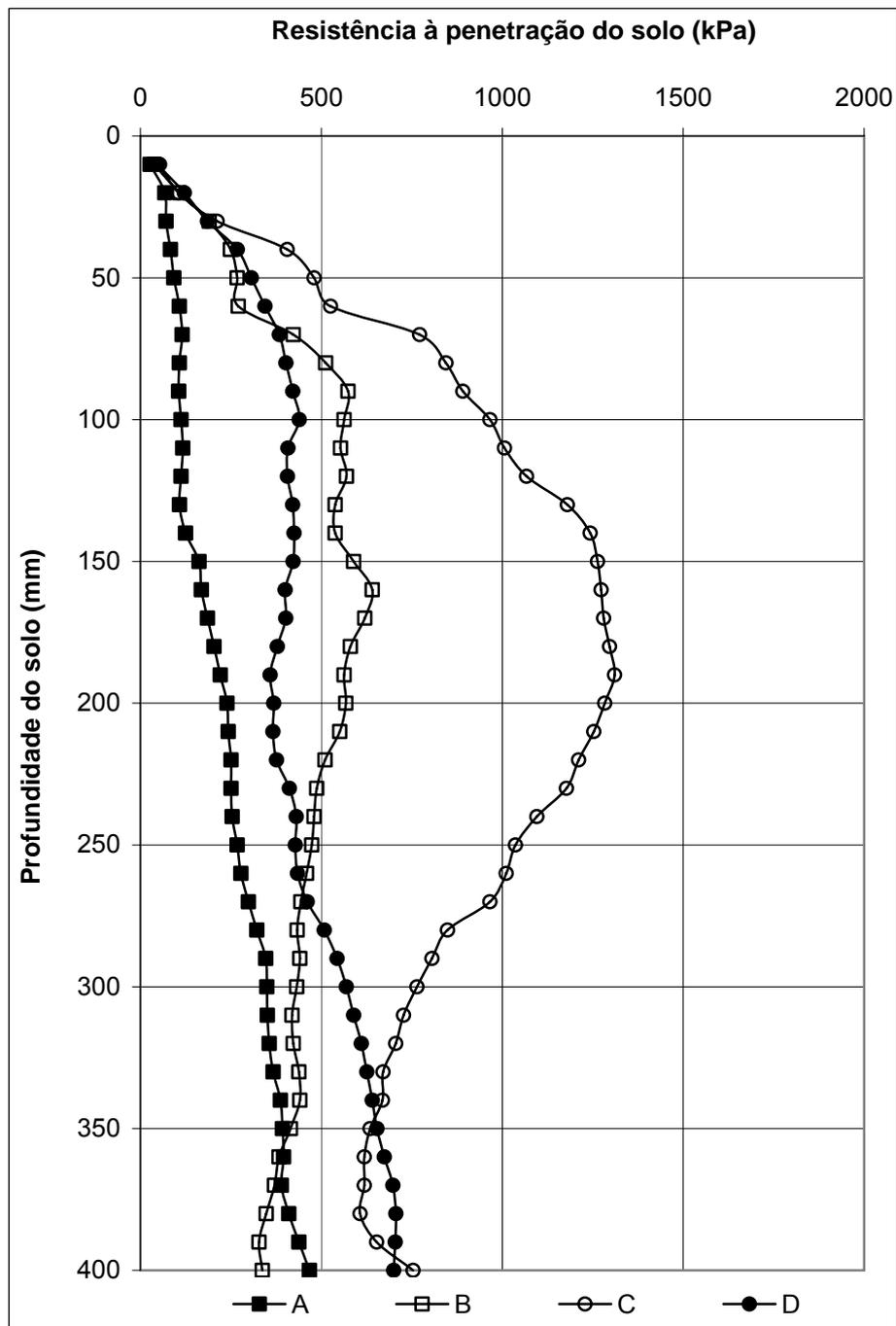
Ainda na área com solo mobilizado, o tráfego continuado sobre pontos com índice de cone médio de 486 kPa entre 0 e 400 mm e máximo de 700 kPa a 100 mm, o recalque provocado pelas rodas atingiu níveis críticos, correspondente à medida do vão livre entre o eixo e o solo, o que provocou a imobilização do veículo na 4ª passada. Na área com solo firme, onde o ICS era superior a 750 kPa na maior parte da camada de 0 a 400 mm, houve uma consolidação do solo e o tráfego continuado melhorou sua condição, formando uma pista relativamente sólida.

Para o tráfego realizado na área do CIBLD, pode-se afirmar que a resistência média do solo de 341 kPa na profundidade de 200 a 400 mm não foi suficiente para permitir uma única passada do Urutu, e que ICS de 439 kPa no perfil do solo de 0 a 400 mm propiciaram o tráfego difícil, com alto patinamento. Para o tráfego contínuo, mesmo com ICS de 451 kPa de 0 a 400 mm e 557 kPa na camada de 200 a 400 mm, a imobilização ocorreu na 3ª passada. A resistência à penetração do solo para diversas situações de trafegabilidade é apresentada na Figura 19 e a tabela de valores encontra-se no Apêndice 3



- A- solo mobilizado, suporta tráfego singular com dificuldade; (Uv: 45,8%)
 B- solo mobilizado, com imobilização na 4ª passada do veículo; (Uv: 48,3%)
 C- solo firme, tráfego singular e seguro; (Uv: 48,4%)
 D- solo firme, tráfego seguro após 5 passadas do veículo. (Uv: 42,9%)

Figura 18 - Resistência à penetração do Planossolo Hidromórfico saturado na área do NEMA/UFSM, medido adjacente ao tráfego em diferentes desempenhos do veículo Urutu.



- A- solo de campo nativo, com imobilização do veículo na 1ª passada; (Uv: 51,5%)
 B- solo de campo nativo, veículo com dificuldade de trafegar; (Uv: 58,4%)
 C- solo de campo nativo, veículo trafegando em segurança; (Uv: 50,5%)
 D- solo de campo nativo, com imobilização na 3ª passada do veículo; (Uv: 61,4%)

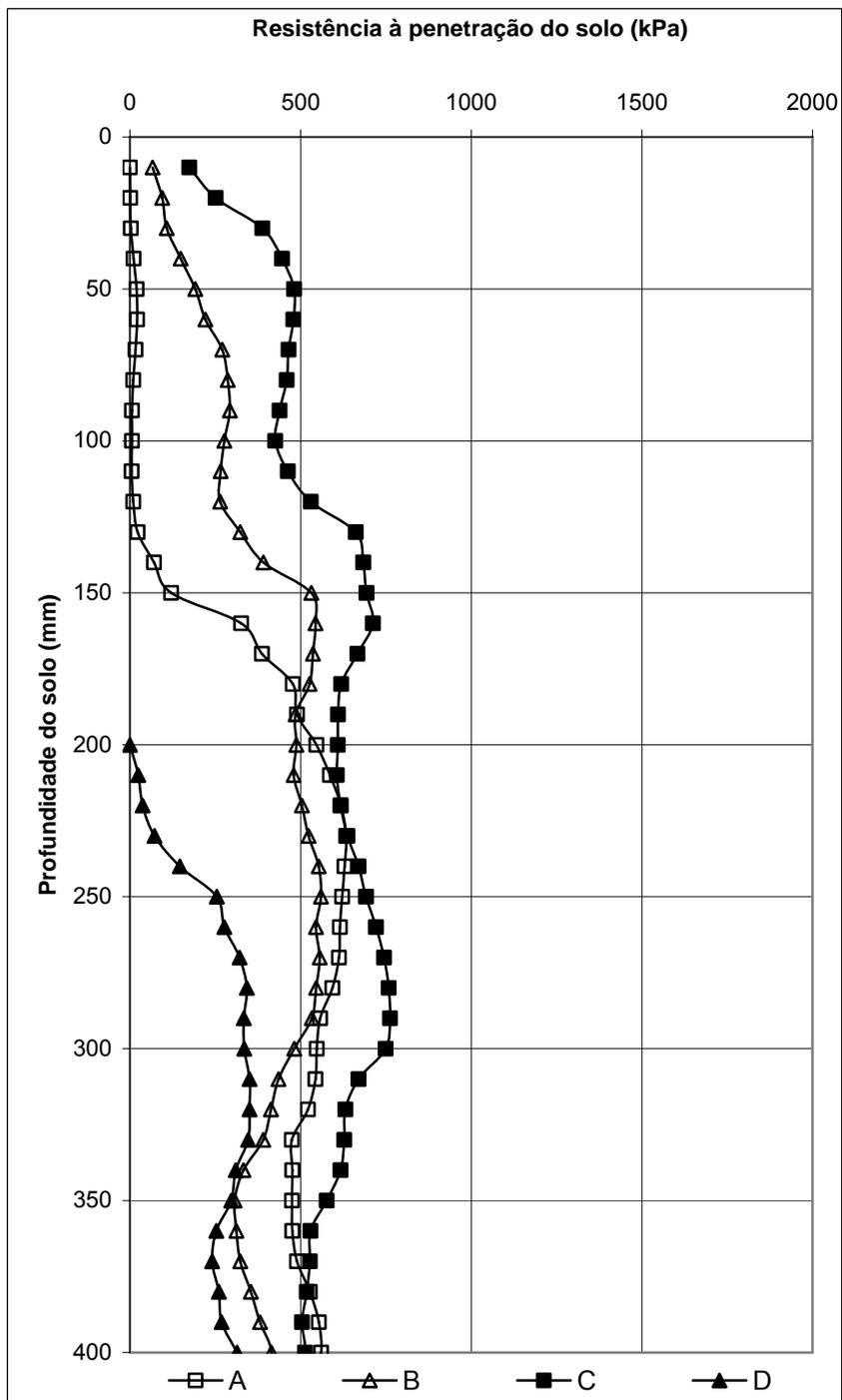
Figura 19 - Resistência à penetração do Planossolo Hidromórfico saturado na área do CIBLD/EB, medido adjacente ao tráfego em diferentes desempenhos do veículo Urutu.

b) Viatura blindada EE-9 Cascavel

A Figura 20 e o Apêndice 4 apresentam a resistência à penetração do solo, obtidas a partir da média das leituras nos pontos de maior interesse para o estudo da trafegabilidade do veículo Cascavel, na ocasião dos testes a campo na área do NEMA/UFSM.

De acordo com as curvas A e B da Figura 20 e Apêndice 4 verifica-se que 556 kPa de resistência do solo na camada de 200 a 400 mm são suficientes para sustentar a mobilidade do veículo Cascavel em pelo menos uma passada. Sobre condição similar do solo, após quatro passadas do veículo, o IC do solo baixou para 448 kPa na mesma camada, provocando sua imobilização.

Locais de solo com resistência à penetração maior e índice de cone entre 500 e 750 kPa na maior parte do perfil (curva C da Figura 20) garantem o tráfego continuado em, pelo menos, 10 passadas, a partir do qual a resistência do solo piora (curva D da Figura 20) e dificulta cada vez mais o tráfego. Nota-se que nesta condição as deformações do solo (recalque) ultrapassam 200 mm e o IC do solo decresce para 257 kPa na camada 200 a 400 mm, provocando a imobilização do veículo.



- | | |
|--|-------------|
| A- solo mobilizado, veículo com dificuldade de trafegar; | (Uv: 45,4%) |
| B- solo mobilizado, com imobilização na 4ª passada do veículo; | (Uv: 49,6%) |
| C- solo firme, veículo trafegando em segurança 10 vezes; | (Uv: 46,0%) |
| D- solo firme, medido após 10 passadas do veículo. | (Uv: 46,0%) |

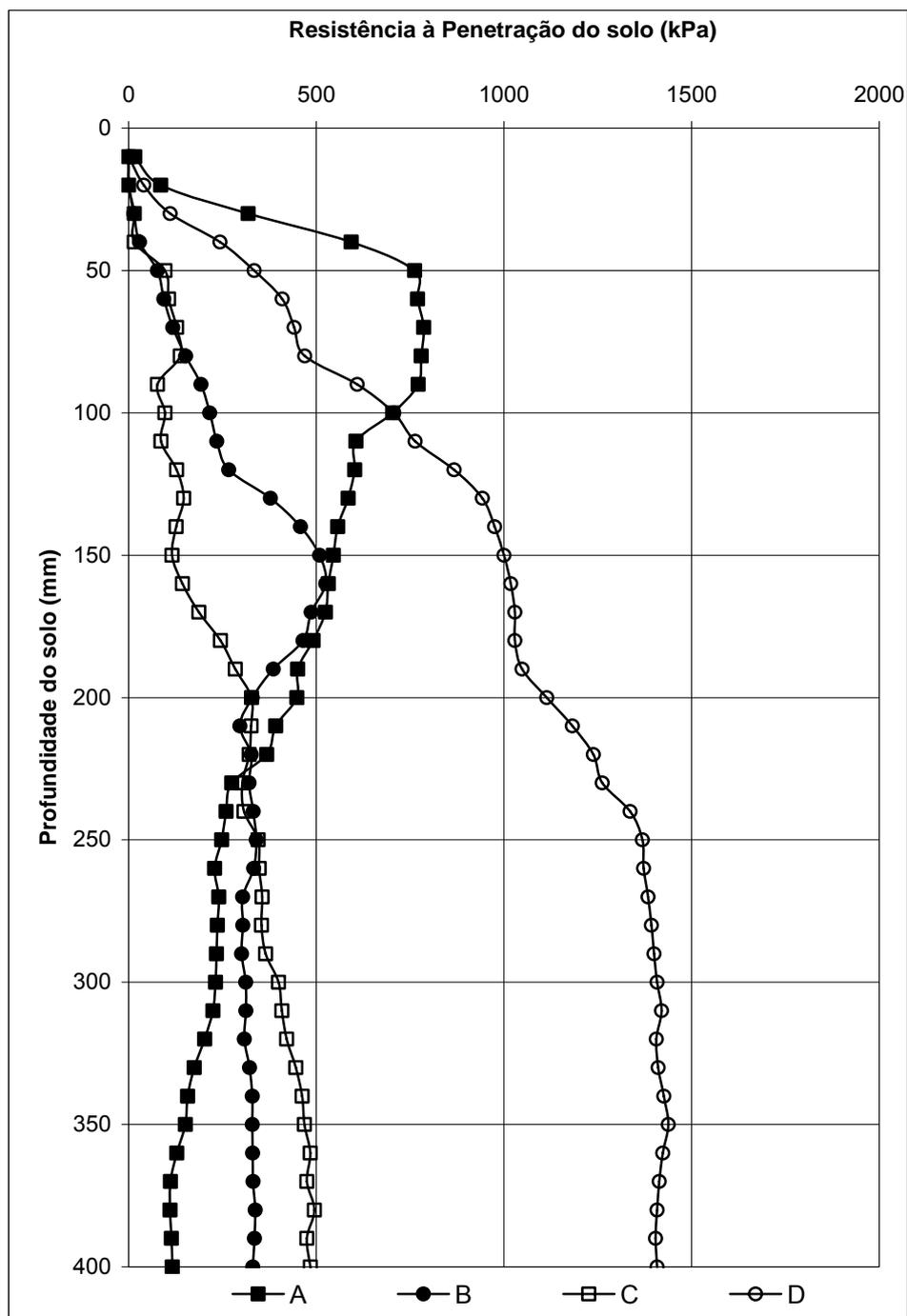
Figura 20 - Resistência à penetração do Planossolo Hidromórfico saturado na área do NEMA/UFSM, medido adjacente (A, B e C) e na linha do tráfego (D) com diferentes desempenhos do veículo Cascavel.

Nos testes realizados no campo de instrução do CIBLD/EB, a primeira tentativa foi feita trafegando sobre uma área inundada, com lâmina de água de 500 mm. Nesta condição, não houve indícios de imobilização e o ICS medido foi de 658 kPa nos primeiros 200 mm de solo.

Trafegando sobre campo nativo, com solo na condição de saturação, o veículo Cascavel demonstrava maior dificuldade, chegando a imobilizar na 3ª passada subsequente. O índice de cone neste ponto indicava uma camada sub-superficial resistente (curva A da Figura 21), com 547 kPa na camada de 0 a 200 mm, porém, apenas com de 210 kPa de 200 a 400 mm. Porém, esta camada, ao ser rompida, expunha o rodado a um solo sem capacidade de suportar a carga do veículo, levando-o à imobilização após recalcar o solo em 380 mm.

A confirmação da condição limite de trafegabilidade para o Cascavel pôde ser obtida a partir das curvas B e C da Figura 21 e no Apêndice 4. Nelas verificou-se a sutil diferença da resistência do solo que imobiliza ou não o veículo, atribuído à pequena diferença de umidade do solo, de 75% para 78,1%. A locomoção foi possível com valores ligeiramente inferiores a 500 kPa, com uma média de 402 kPa na camada de 200 a 400 mm. Por outro lado, o solo com uma resistência média de 284 kPa de 0 a 400 mm e 322 kPa a partir de 200 mm de profundidade não foi suficiente o que ocasionou a imobilização imediata do veículo.

Apêndice



- A- solo campo nativo, com imobilização na 3ª passada; (Uv: 55,7 %)
 B- solo campo nativo, com imobilização na 1ª passada; (Uv: 78,1 %)
 C- solo campo nativo, na condição limite ao tráfego; (Uv: 75,0 %)
 D- solo submerso, impondo dificuldade ao trafegar;

Figura 21 - Resistência à penetração do Planossolo Hidromórfico em campo nativo saturado na área do CIBLD/EB, medido adjacente ao tráfego em diferentes desempenhos do veículo Cascavel.

A Figura 22 registra o momento da imobilização do veículo Cascavel nos testes de campo na área do NEMA/UFSM e a medição do ICS e umidade do solo na área de tráfego do CIBLD/EB.



Figura 22 - Trabalhos de campo realizados: a) tráfego do veículo Cascavel na área do NEMA/UFSM; b) momento da medição da penetrometria e umidade do solo na área do CIBLD/EB.

2.4.4 Avaliação do patinamento

Na avaliação comparativa do patinamento do veículo Cascavel nos testes realizados na área da UFSM, para duas pressões de calibragem dos pneus 138 kPa (20 PSI) e 276 kPa (40 PSI), com o veículo trafegando em solo firme (Figura 23) e solo mobilizado (Figura 24), comprovou-se que a pressão interna dos pneus tem influência sobre o patinamento.

A análise estatística dos dados mostrou diferença significativa (teste de Tukey a 5%) entre os patinamentos registrados para pneus com 138 kPa e 276 kPa. Quando comparados os patinamentos entre as condições do solo, para a mesma pressão interna dos pneus, não houve diferença significativa. Os dados permitem afirmar que a 276 kPa o patinamento medido foi 17% maior no solo firme e 15% maior no solo mobilizado do que na condição de 138 kPa. Porém, não se obteve comprovação da influência direta da pressão interna dos pneus sobre o índice de cone do solo necessário para a locomoção, pois em ambas as situações não houve imobilização do veículo.

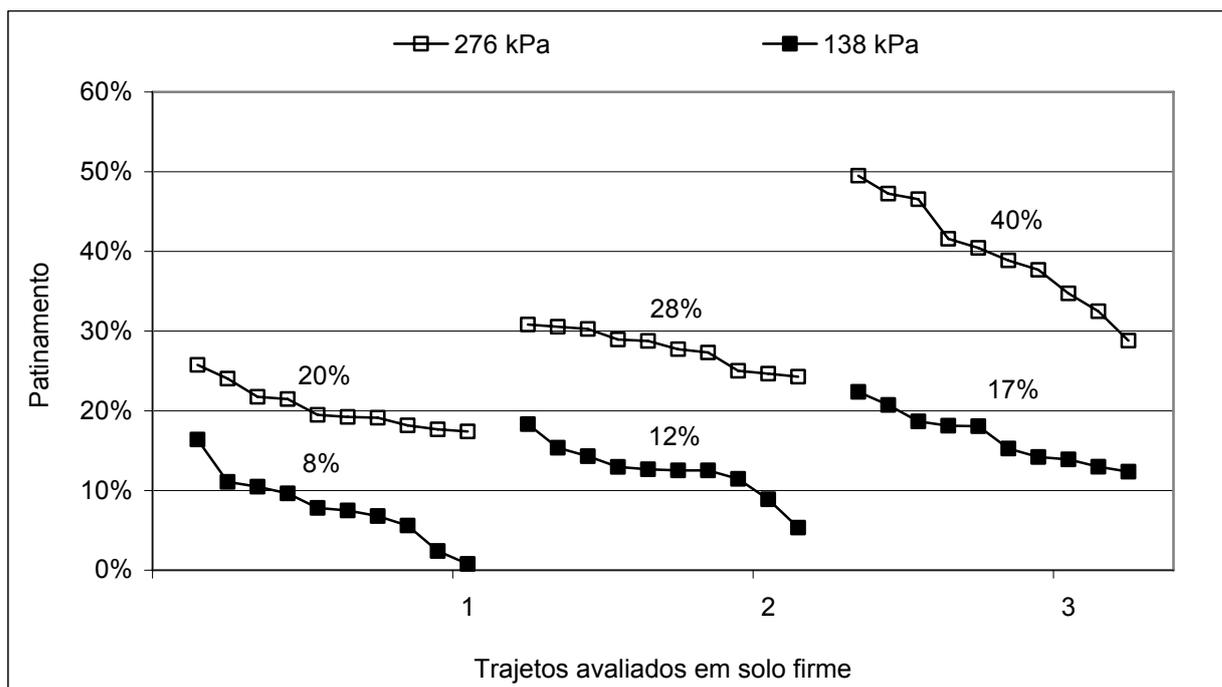


Figura 23 - Patinamento medido no veículo Cascavel na área do NEMA/UFSM, trafegando em solo firme e com duas pressões internas dos pneus.

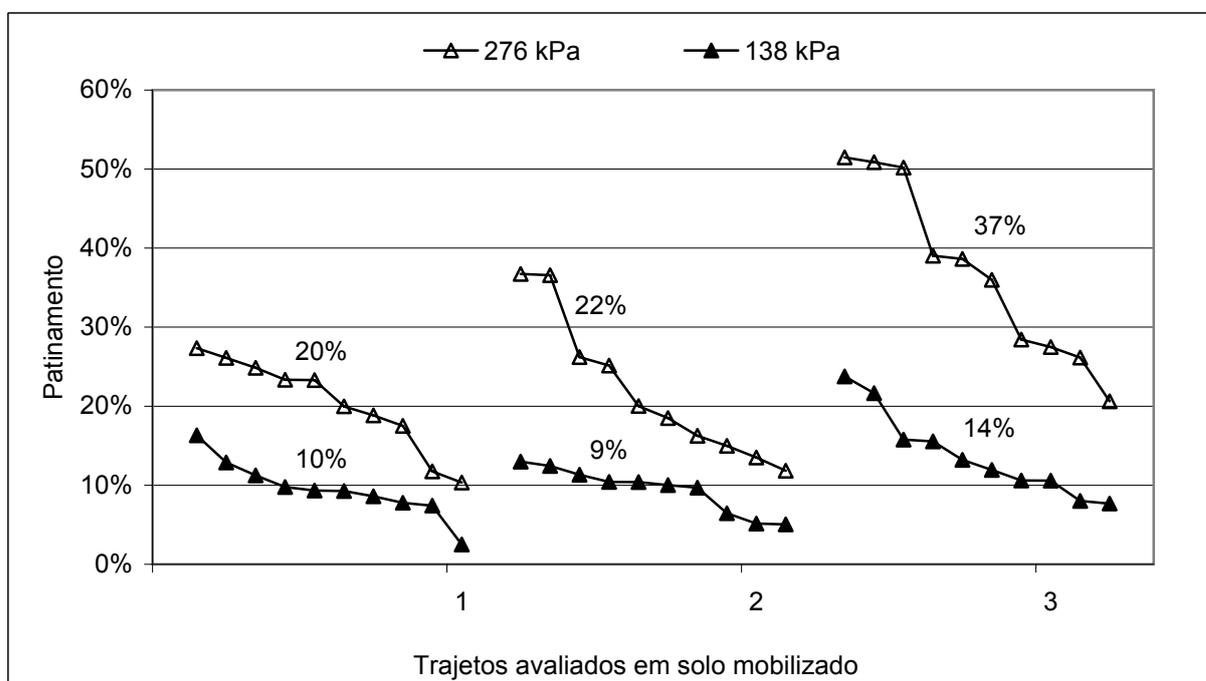


Figura 24 - Patinamento medido no veículo Cascavel na área do NEMA/UFSM, trafegando em solo mobilizado e com duas pressões internas dos pneus.

Efeito similar da variação da pressão dos pneus foi encontrado por Pytka et al. (2006), que ao diminuir a pressão de 390 kPa para 200 kPa num veículo militar 6x6 obteve incremento na força de tração e decréscimo nas tensões medidas no solo. Para Pytka et al. (2006) a pressão dos pneus afeta diretamente a deformação horizontal do solo, o que provavelmente ocorre devido ao aumento na área de contato.

2.4.5 Resultados e análise dos modelos

Aplicando os dados para as viaturas Urutu e Cascavel no modelo de trafegabilidade *Nato Reference Mobility Model edition II* (AHLVIN e HALEY, 1992), que também é mencionado no Manual de Trafegabilidade dos Solos do Exército Brasileiro (BRASIL, 2001), encontrou-se o valor para ICV_1 de 230 kPa para ambos os veículos e um ICV_{50} de 551 kPa para Urutu e 623 kPa para Cascavel. As planilhas referentes ao cálculo do modelo NRMM-II encontram-se no Apêndice 5.

Por outro lado, aplicando o modelo de trafegabilidade *Mean Maximum Pressure* (MMP), elaborado por Rowland (1972) e modificado por Larmine (1992) obteve-se valores para ICV_1 de 368 e 378 kPa, respectivamente para o veículo Urutu e Cascavel. Adotando o fator multiplicador para diversas passadas do veículo, obteve-se ICV para três passadas de 466 e 478 kPa, respectivamente para os veículos Urutu e Cascavel, valores próximos aos obtidos em campo para similar condição.

Os valores obtidos se aproximam ao mencionado por Larmine (1988), citado por Linares (1995), que, se referindo ao MMP para o Urutu EE-11, indica o ICV de 366 kPa. Conforme já havia sido mencionado por Maclaurin (2007), o modelo MMP resulta em ICV maior que o NRMM, que de fato foi confirmado. Porém, a diferença encontrada foi superior (mais de 30%) do que a mencionada pelo autor.

Comparando os resultados fornecidos pelos modelos com os dados obtidos em campo, resumidos na Tabela 10, pode-se afirmar que o modelo MMP fornece valores de ICV mais próximos ao índice de cone do solo necessário ao tráfego das viaturas estudadas, nas condições de solo locais, uma vez que o NRMM subestima o ICV . Talvez seja por esta razão que o EB tenha encontrado dificuldades na

mobilidade de seus veículos em solos argilosos, tais como os Planossolos e Gleissolos, já que o NRMM foi adotado e serve, até hoje, de referência para os parâmetros de solo necessários à trafegabilidade.

Em não havendo consenso sobre qual de fato seria a camada crítica dos solos de textura argilosa, de 150 a 300 mm, 230 a 380 mm ou 0 a 400 mm, ficam incertezas sobre qual o ICS que deverá ser adotado para determinado veículo, uma vez que é comum encontrar consideráveis variações do IC no perfil, por vezes, bruscas, e nem haver padrão sobre a localização da camada do solo mais resistente. Associado ao ICS, acredita-se que o desvio padrão da amostra de valores pudesse ajudar a explicar o comportamento do veículo em função do IC medido. Desta forma, é razoável deduzir que se um veículo necessita de determinado IC para trafegar num solo com perfil relativamente homogêneo (baixo desvio padrão), então, este mesmo veículo poderá requisitar IC maiores em perfis de solo heterogêneo (alto desvio padrão da amostra), principalmente, quando as maiores resistências estão localizadas na camada sub-superficial.

Tabela 10 - Índice de cone do solo (ICS) na camada de 230 a 380 mm e desvio padrão (DP) da resistência à penetração no perfil, relativo às condições de tráfego para os veículos Urutu e Cascavel em dois locais de teste, CIBLD/EB e NEMA/UFSM.

Veículo	Local	Não trafega		Trafega difícil		Trafega até 4x	
		ICS (kPa)	DP	ICS (kPa)	DP	ICS (kPa)	DP
Urutu	CIBLD	339	(124)	431	(137)	562	(156)
Urutu	NEMA			526	(204)	457	(153)
Cascavel	CIBLD	322	(135)	402	(161)	201*	(233)
Cascavel	NEMA			550	(259)	448	(144)

* inversão da camada de maior resistência.

Baseado nestas suposições e analisando a Tabela 10 pode-se afirmar que o veículo Urutu não trafegava em solos com ICS inferior a 339 kPa na camada crítica, trafegava com dificuldade em solo com 431 kPa na mesma camada e a 457 kPa a imobilização ocorreu na 4ª passada. Estes resultados práticos permitem concluir que o modelo NRMM-II subestima a resistência do solo necessária ao tráfego, pois indica 230 kPa para uma passada e foi verificado que a 339 kPa o veículo não trafegava. Na mesma circunstância, o modelo MMP também indica valores de ICV abaixo dos

encontrados nos testes, porém, se for considerado apenas o valor obtido para o *mean maximum pressure* (Equação 10), que fornece 443 kPa, seria plausível de ser adotado como valor limite para permitir uma passada do veículo.

A campo, o comportamento do veículo Cascavel apresentou condições mais favoráveis em relação ao Urutu, exigindo um índice de cone do solo menor para trafegar em condições similares, verificado nas situações de imobilização (322 kPa), tráfego singular (402 kPa) e subsequente (448 kPa). Apesar desta diferença não ser comprovada estatisticamente, porque não foram conduzidos testes comparativos entre os veículos, em função da dificuldade de se conseguir repetir iguais condições de solo para ambos, acredita-se que o fato se deva à menor pressão de contato do pneu/solo aplicada (357 kPa do Cascavel e 401 kPa do Urutu) e ao avanço cinemático do rodado dianteiro, que foi maior no Cascavel. Ambos são elementos determinantes do desempenho a campo, porém, não são diretamente considerados pelos modelos de predição de trafegabilidade. O fato do NRMM, assim como MMP, estabelecerem ICV maior para o Cascavel era esperado porque as equações de cálculo utilizam o peso total do veículo, o número de rodas e dimensões dos pneus. Neste quesito, o Urutu obteve vantagem porque seu peso avaliado era menor.

2.5 Conclusões

A pressão de contato dos pneus com o solo tem relação direta com o ICV, varia em função da pressão interna do pneu e respectivo peso aplicado e influencia no patinamento do veículo. Sua magnitude é sempre menor que o ICV mínimo requerido para o tráfego singular.

Para o veículo EE-11 Urutu foram encontradas pressões médias de 401 e 701 kPa, respectivamente para 138 kPa e 379 kPa de pressão interna nos pneus. Para o veículo EE-9 Cascavel foram encontradas pressões médias de 357 e 651 kPa, respectivamente para 138 e 379 kPa de pressão interna nos pneus. O fato de o Cascavel apresentar menor pressão de contato pneu-solo em relação ao Urutu credita-se ao tipo e modelo de pneu utilizado.

O veículo Urutu requer índice de cone do solo mínimo de 431 kPa na camada crítica e 439 kPa no perfil do solo para se locomover numa única passada e necessita ICS de 457 kPa na camada crítica e 486 kPa no perfil do solo para trafegar em segurança em, pelo menos, três passadas subseqüentes. O veículo Cascavel requer índice de cone do solo mínimo de 402 kPa na camada crítica e 342 kPa no perfil do solo para se locomover numa única passada e necessita ICS de 448 kPa na camada crítica e 382 kPa no perfil do solo para trafegar em segurança em, pelo menos, três passadas subseqüentes.

Os dois modelos de predição de trafegabilidade NRMM-II e MMP subestimam o valor de ICS necessário para a locomoção dos blindados testados. O modelo NRMM-II indica ICS de 230 kPa para uma passada e foi verificado que a 339 kPa o veículo não trafegava. O modelo que forneceu o ICV mais próximo do ICS necessário para o tráfego dos blindados testados foi o MMP. O referido modelo forneceu ICV_1 de 368 kPa e ICV_3 de 466 kPa para o Urutu e ICV_1 de 378 kPa e ICV_3 de 478 kPa para o veículo Cascavel.

Para os Planossolos estudados o teor de água ao ponto de saturação oferece resistências na camada de 50 a 150 mm inferiores a 500 kPa, valor considerado crítico para a mobilidade dos veículos. Para o solo firme, o teor de água crítico é na ordem de 30 g g^{-1} e para o solo em campo nativo é de 35 g g^{-1} . Porém, sobre o solo mobilizado o teor de água crítico que oferece ICS de 500 kPa é de 23 g g^{-1} , portanto, abaixo do seu nível de saturação.

CAPÍTULO 3:

DESEMPENHO DE UM TRATOR AGRÍCOLA EM ENSAIOS DE TRAÇÃO E TRAFEGABILIDADE SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE LASTRAGEM E PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS

3.1 Introdução

A intensificação do uso de máquinas agrícolas no Brasil começou a partir da década de 60, fruto do processo de modernização da agricultura, sendo o trator agrícola considerado o eixo da mecanização da agricultura moderna. Em relação ao trabalho manual, o uso do trator agrícola reduziu, de forma significativa, o esforço físico à qual o trabalhador era submetido, tornando-se responsável por uma parcela significativa do aumento da capacidade de produção agrícola e, por outro lado, pelo aumento do consumo de energia nas atividades de campo.

Uma das principais funções dos tratores agrícolas é transformar a energia potencial química contida nos combustíveis e fornecê-la na forma de energia mecânica, através da força produzida na barra de tração, utilizada para tracionar máquinas e equipamentos agrícolas. Embora o trator também possa ser utilizado para prover energia através da tomada de potência ou por meio do sistema hidráulico.

Os pneus agrícolas são os componentes responsáveis pela transferência da potência gerada pelo motor dos tratores e da maioria das máquinas agrícolas autopropelidas ao solo, na forma de tração ou simplesmente locomoção, tendo relevante importância nos custos operacionais de campo e, principalmente, nos custos finais relacionados à eficiência. Os rodados pneumáticos de um trator agrícola possuem diversas funções importantes tais como: garantir a flutuação, o equilíbrio, o deslocamento, o direcionamento, o desempenho operacional e o amortecimento entre as irregularidades do solo e o trator. Esses rodados influenciam nos resultados de desempenho operacional do trator em relação ao tipo de construção, pressão interna, carga aplicada, tipo de dispositivo de tração e do seu desgaste.

O atual estágio evolutivo na escolha de tecnologias avançadas em rodados e pneus para tratores pressupõe conhecimento, prática e aplicação do uso adequado de pressões internas e lastro. Não é consenso que no Brasil, de um modo geral, se utilize pressão interna e quantidade de lastro adequada, especialmente os agricultores da metade sul do Rio Grande do Sul que cultivam arroz em solos de várzea, pois são inúmeros os agricultores que não dispõem sequer de um calibrador adequado em suas oficinas, o que significa que não controlam a pressão interna dos pneus dos seus tratores, usando-a invariável ao longo do ano e nas diferentes operações agrícolas. Também é do conhecimento geral que uma grande parcela destes usuários não tem noção clara da quantidade de lastro que deve ser colocado nas suas máquinas, o que causa invariavelmente perdas de rendimento técnico e econômico.

O peso ou carga sobre os pneus é a força vertical que está incidindo sobre seu eixo. Existe uma distribuição estática do peso do trator sobre os eixos dianteiros e traseiros que em trabalho se modifica, pela transferência de peso, passando a denominar-se carga dinâmica ou peso dinâmico. Segundo Schlosser (1996a) para que se utilize a máxima potência do motor de um trator tentando obter a sua máxima eficiência de tração (em uma operação de preparo do solo, por exemplo, dentro da faixa dos 5 a 6 km h⁻¹) é necessário que se estabeleça uma relação peso-potência adequada, que pode ser aproximadamente 80 kg kW⁻¹.

A pressão interna dos pneus pode ser variada dentro de limites que são fixados pela pressão mínima, para que o pneu não gire em relação ao aro e/ou não provoque deflexão excessiva, e pela pressão máxima, que pode ser função de dois fatores: a máxima pressão que a carcaça do pneu pode suportar e a que resulta numa pressão aplicada ao solo não superior a sua pressão de pré-consolidação, evitando compactação adicional do solo. A pressão máxima sempre deve estar fixada em função do peso dinâmico máximo que o pneu pode suportar e a pressão mínima varia em função da carga, velocidade e das condições de superfície do terreno.

Para as condições de trabalho a qual são submetidos os tratores em serviços de preparo do solo, colheita e transporte de grãos na produção de arroz irrigado por inundação espera-se um bom desempenho mecânico destas máquinas, por isso, é fundamental que o trator se desloque pelo campo sem atolar, a força de tração produzida pelo trator deve condizer com a potência do motor ao nível de

patinamento razoável (inferior a 30 ou 40%) e os efeitos do tráfego das máquinas não devem provocar danos apreciáveis ao solo. Enfim, o serviço do conjunto mecanizado deve satisfazer à necessidade imposta.

A operação de transporte de grãos no momento da colheita é uma atividade agrícola essencial e necessária que requer condições mínimas de trafegabilidade na lavoura e quase sempre ocorre com dificuldades extras, que lhe são impostas devido à alta umidade do solo proveniente da água de irrigação. Neste caso, o produtor não tem muita escolha em relação ao momento em que esta operação vai ser realizada, restando como opção, configurar o trator de forma a proporcionar a mobilidade necessária para o conjunto trator e reboque de carga.

É também comum o produtor não realizar ajustes no trator enquanto alterna as atividades de preparo do solo, plantio, tratos culturais e transporte de grãos, o que pode prejudicá-lo em questão de eficiência do aproveitamento do seu parque de máquinas. Sob esta ótica da realidade os resultados da investigação proposta pelo presente trabalho podem servir para convencimento da importância que os parâmetros lastro e pressão interna dos pneus exercem sobre o desempenho da mobilidade nas condições mencionadas.

Os resultados de trabalhos comparando o efeito de diferentes tipos e tamanhos de pneus em diversas combinações de pressões internas e de diferentes níveis de lastragem sobre o rendimento tratorial em condições de solo seco e úmido, trazem incertezas a respeito da generalização dos resultados destas pesquisas para as situações em que as máquinas operam sobre solos saturados ou mal drenados.

Diante desta realidade, tornam-se necessárias investigações adicionais e comprobatórias sobre a eficiência de tração, patinamento, consumo de combustível e rendimento operacional de tratores e máquinas agrícolas, especificamente em solos de várzea, que na maioria dos casos, são Planossolos Hidromórficos.

Partindo do pressuposto que o desempenho dos tratores agrícolas de roda é função da adequação de suas características (dimensão, peso, rodado, pressão dos pneus, potência do motor, etc.) e das condições dos solos sobre os quais operam (umidade e índice de cone) realizaram-se experimentos de tração e de trafegabilidade.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho de um trator agrícola, em tração e transporte, sob diferentes condições de um Planossolo Hidromórfico.

Os objetivos específicos foram:

- a) determinar a área de contato dos pneus do trator com o solo para dois níveis de lastro e pressão interna dos pneus;
- b) determinar o desempenho de tração de um trator agrícola em solo firme e mobilizado com diferentes teores de água no solo através da medição da capacidade de tração, patinamento e consumo de combustível em função da variação da pressão interna dos pneus e da quantidade de lastro;
- c) determinar a configuração de pressão de pneu e quantidade de lastro mais eficiente a ser utilizado para o tráfego em transporte sob condições de solo alagado, avaliando o patinamento e velocidade de deslocamento;
- d) determinar a influência da tração dianteira auxiliar na mobilidade do conjunto trator e reboque sobre solo de várzea alagado;
- e) avaliar o índice de cone do solo sob as condições de condução dos experimentos, visando correlacionar a resistência do solo com os parâmetros que definem o desempenho do trator.

3.2 Revisão bibliográfica

A capacidade suporte ou de sustentação das camadas superficiais de um solo de várzea inundado, segundo Klamt (1985), é de aproximadamente 17 kPa. Isto quer dizer que toda a máquina que aplicar pressão de contato maior que esta terá problemas para se manter na superfície. Um homem de estatura média exerce aproximadamente 30 kPa de pressão sobre o solo e as rodas de um trator podem aplicar 70 kPa, sendo por isto que em um solo de várzea sem drenagem ocorrem consideráveis deformações.

Partindo-se de uma várzea em pousio, as operações mecanizadas iniciais de drenagem e sistematização são, normalmente, realizadas em condições de solo bastante úmido, e requerem das máquinas mecanismos de sustentação apropriados. Nesta etapa é comum a utilização de tratores de esteiras. A partir da drenagem da área o teor de água no solo diminui de maneira a possibilitar a utilização dos tratores de rodas para as operações seguintes, entre elas, o preparo do solo, semeadura e aplicações de defensivos. É pertinente lembrar que na operação de colheita se retorna a condições de solo bastante desfavoráveis, exigindo outra vez que os dispositivos de tração sejam adaptados e o uso de esteiras equipando as máquinas de colheita na cultura do arroz é freqüente. Aliado à colheita, necessita-se o transporte de retirada dos grãos da lavoura, normalmente realizada por tratores e reboques sob condições muito difíceis de locomoção.

Para Schlosser (1996a), na fase de preparo do solo, talvez a mais importante dentro do âmbito das operações, os tratores podem trabalhar dentro de limites de resistência do solo entre 30 e 40 kPa, e adaptados com pneus de maior tamanho (largura e diâmetro), como os arroteiros, com aproximadamente 25 kPa de pressão sobre o solo. Para que os tratores consigam desempenhar suas tarefas satisfatoriamente não bastam escolher o tamanho do trator e o tipo de pneu mais adequado, é preciso ajustá-los às condições de trabalho, principalmente em relação à pressão interna dos pneus e lastragem do trator.

Para que a potência do motor do trator possa ser utilizada com eficiência, desenvolvendo uma alta força de tração na barra deve ser colocado sobre o eixo do trator um peso compatível que mantenha o coeficiente dinâmico de tração ao redor dos 0,4 a 0,6. Isto é, a força exercida na barra deve ser aproximadamente a metade

do peso do trator. Por isto, mais peso poderá possibilitar um incremento na capacidade de tracionar implementos com altas demandas de esforço. Este acréscimo de massa ao trator terá que ser acompanhado pelo correspondente ajuste da pressão interna dos pneus.

3.2.1 Desempenho de um trator

Os tratores usam motores a combustão interna para se mover, tracionar implementos e máquinas agrícolas. As perdas de potência aparecem ao desenvolver tração pelas rodas, no eixo da TDP (tomada direta de potência) e no sistema hidráulico. A maneira mais comum de utilização da potência desenvolvida pelo motor é através da barra de tração devido a sua versatilidade, porém, é a menos eficiente, quando comparada a TDP e ao sistema hidráulico (SERRANO, 2007).

O desempenho de um trator agrícola pode ser avaliado pela força e potência desenvolvida na barra de tração, potência e torque na tomada de potência, eficiência de tração, patinamento das rodas motrizes e consumo de combustível (SILVA; BENEZ, 1997). Segundo Gabriel Filho et al. (2004), o baixo desempenho na barra de tração ocorre devido a alguns fatores como: tipo de solo, distribuição de peso sobre os rodados, características do rodado, transferência de peso durante operação, cobertura vegetal, entre outros. Estes mesmos autores, avaliando o desempenho de um trator, concluíram que em função da cobertura de matéria seca sobre o solo há um aumento nos índices de patinamento, o que faz diminuir a eficiência de tração. Assim, os autores reafirmam que a tração é o resultado da interação entre o rodado e a superfície.

Uma preocupação dos pesquisadores diz respeito à eficiência no consumo de combustível, pois representa um custo elevado no processo produtivo, além de ser de origem fóssil e não renovável. O consumo de combustível é influenciado por fatores como lastro, carga demandada na barra de tração, tipo de pneu e velocidade de deslocamento (LOPES et al., 2002). Outro problema que afeta o desempenho do trator é o patinamento das rodas motrizes, ao qual estão diretamente relacionados à diminuição da força de tração e o aumento no consumo de combustível. O valor do patinamento para se obter a máxima eficiência de tração deve ser entre 8 a 10%

para solos sem mobilização, 11 a 13% em solos mobilizados e de 14 a 16% em solos arenosos segundo a ASAE EP496.2 (2003).

3.2.2 Força de Tração

A tração pode ser definida como a força, na direção do deslocamento, produzida por um trator através da barra de tração (ASAE S296.4, 1996). Segundo a ASAE D497.4 (2003) o desempenho na barra de tração de um trator depende, primariamente, da potência do motor, da distribuição de peso sobre os rodados, da altura e posição dos engates da barra e da superfície do solo. A eficiência no uso dessa força é limitada pela ação dos dispositivos de tração, que nos tratores agrícolas, geralmente, são rodas pneumáticas (SRIVASTAVA et al., 1996).

A capacidade de tração e o fornecimento de potência suficiente para desempenhar a maioria das operações necessárias na agricultura dependem, em parte, do tipo de dispositivo de tração. Nos casos em que esses dispositivos são pneumáticos, o tamanho, a pressão interna, a carga aplicada sobre o eixo motriz, a transferência de peso, entre outros, interferem na capacidade de tração do trator (ZOZ; GRISSE, 2003).

Como ocorre em todo sistema de transmissão de energia, no sistema de transmissão de potência do motor para a barra de tração existem perdas que, dependendo das condições de operação do trator, podem atingir níveis bastante comprometedores de seu desempenho. Nas avaliações de perda de potência efetuadas por Zoz (1987), nos diferentes mecanismos do trator e diferentes condições de solo, para tratores 4x2, estas variaram de 20% em pistas de concreto até 53 % em solo solto.

Várias são as situações e condições que podem influenciar na tração, e uma das principais é o solo, em função das suas propriedades e condição da superfície, as quais são textura, o teor de água e o tipo de cobertura existente sobre o mesmo (YANAI et al., 1999).

Outro fator importante na avaliação do desempenho do trator e que está relacionado com o desempenho na barra de tração, é o consumo horário de combustível. Conforme Jenane et al. (1996), dependendo da superfície do solo, o

menor consumo de combustível é obtido quando o patinamento está entre 10 e 30%. Entretanto, a ASAE EP496.2 (2003) apresenta que, em solos firmes, o melhor desempenho de trator ocorre quando o patinamento está entre 8 e 10%.

Devido ao complexo conjunto de fatores que envolvem a interação do rodado com o solo, vários estudos e modelos foram propostos visando avaliar a eficiência de tração desses mecanismos de interação rodado/solo. Em seus estudos, Wismer e Luth (1974) desenvolveram uma equação largamente utilizada para avaliar a eficiência de tração, em condições de campo, para pneus de constituição diagonal. Visando aperfeiçoar essa equação, várias alterações foram propostas ao longo dos anos, por diversos autores. A equação de Brixius (1987) tem sido a mais utilizada e adotada pela ASAE.

Uma roda em movimento pode ser considerada de três maneiras distintas: movida, quando há somente uma força externa para seu deslocamento, não existindo torque em seu eixo; autopropelida, quando seu eixo possui torque suficiente apenas para o seu deslocamento; e motriz, quando, além de gerar torque para seu movimento, tem capacidade de desenvolver tração (WISMER; LUTH, 1974). Segundo esses autores, a passagem de uma situação para outra ocorre em função do aumento do patinamento, que será positivo quando houver torque na roda e o desenvolvimento de tração.

A capacidade de tração na roda motriz aumenta conforme aumenta o patinamento até um valor máximo. De acordo com Zoz e Grisso (2003) são três as possíveis condições teóricas em que uma roda age sobre o solo: roda sólida sobre superfície sólida, roda deformável em superfície sólida e roda deformável em superfície não sólida, sendo esta última a condição real de trabalho de máquinas no campo.

Ainda segundo Zoz et al. (2002) e Zoz e Grisso (2003), para se entender a mecânica de tração, é fundamental entender a diferença entre desempenho de tração e o desempenho do trator. O desempenho do trator é proporcional ao desempenho dos mecanismos de tração, mas não igual a ele; portanto, para se obter o desempenho de tração é necessário conhecer a potência disponível no dispositivo de tração.

3.2.3 Avaliação do desempenho do trator

O objetivo da avaliação do desempenho de tratores agrícolas, em experimentos de campo, tem sido gerar informações que possibilitem dimensionar e racionalizar o uso de conjuntos moto mecanizados na agricultura (SILVA et al., 1997).

De acordo com Cordeiro (2000), as avaliações diretas do desempenho de tratores em condições de campo são obtidas através da instrumentação e monitoramento dos mesmos, permitindo assim a determinação de fatores diretamente relacionados com a eficiência de trabalho do trator. O autor realizou um estudo de desempenho de um trator agrícola em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de deslocamento e concluiu que estes fatores alteraram significativamente a conversão energética, o patinamento e a força de tração do trator.

Jenane e Bashford (2000) instrumentaram um trator para investigar os efeitos da velocidade de deslocamento e das condições da superfície do solo no rendimento de tração e na relação da carga sobre a árvore motriz e a potência disponível, concluindo que a máxima eficiência tratória foi de 90% para solo firme e 70% para solo solto. Na velocidade normal de trabalho, a relação da carga sobre a árvore motriz e a potência disponível para o rendimento máximo de tração foi de 105 e 145 kg kW⁻¹ para o solo arado e solo firme, respectivamente.

Entre os fatores que podem influenciar o desempenho de tração do trator agrícola, destacam-se a pressão interna e a carga sobre o rodado motriz (YANAY et al., 1999). Os autores realizaram um trabalho com o objetivo de avaliar, em condições normais de campo, a influência dos fatores da pressão interna e da carga sobre o rodado motriz (sob quatro níveis), nas duas condições de tração dianteira auxiliar (acionada ou não). Os resultados evidenciaram a influência significativa da lastragem nos parâmetros patinamento e coeficiente de tração, que aumentaram com a redução da carga sobre o rodado.

Os mesmos autores concluíram que a pressão interna influenciou significativamente nos parâmetros de patinamento, velocidade de deslocamento e potência na barra. O uso TDA, mostrou vantagens significativas em relação aos mesmos parâmetros anteriores. A interação entre os fatores pressão interna e carga sobre o rodado mostrou que determinadas combinações de pressão foram mais

favoráveis para o desenvolvimento de maior velocidade e menor patinamento. As características relacionadas ao desempenho do motor (consumo horário de combustível e rotação do motor) não foram afetadas por nenhum dos fatores ou suas interações.

Correa et al. (2000) analisaram quatro condições de peso total do trator Agrale Deutz BX 4150, com tração dianteira auxiliar, (73,7; 74,9; 75,7 e 79,5 kN) e a distribuição desses pesos em ensaios em pista de concreto e concluíram que o trator ensaiado pode ser utilizado com peso total entre 73,7 e 75,7 kN, o que representou uma redução de 5,9 kN em relação ao máximo lastro permissível. Além disso, segundo os autores, a configuração que proporcionou o melhor desempenho de tração foi uma distribuição percentual em torno de 40% do peso total no eixo dianteiro.

Evidências significativas da carga no rodado sobre os parâmetros patinamento e coeficiente de tração foram observadas por Yanai (1994), que utilizou um trator com tração dianteira auxiliar e pneus diagonais em testes realizados em condição de campo com solo não mobilizado, aplicando quatro quantidades distintas de carga sobre o rodado, que este foi ajustado com quatro níveis de pressão. Os resultados mostraram que a pressão interna teve influência significativa na velocidade de deslocamento, patinamento e potência na barra de tração, sem, no entanto, apresentar uma tendência de comportamento. A interação entre pressão interna e carga sobre o rodado mostrou que determinadas combinações desses dois fatores foram mais favoráveis para o desenvolvimento de maior velocidade de deslocamento e menor patinamento.

O desempenho de tração também é afetado pelas forças de reação normal e tensão de cisalhamento do solo, pois elas interferem na resistência ao movimento e na redução de deslocamento (ZOZ; GRISSO, 2003). Os autores relatam que, descrever o solo talvez seja a parte mais difícil para avaliar a tração, pois o solo apresenta grandes variações de propriedades e características, que pode facilmente influenciar a sua caracterização. Medir essas variáveis leva tempo e as avaliações dos parâmetros de tração não pode ser reproduzido ou repetido para condições diferentes do solo. Por esta razão, muito dos testes da tração são de natureza comparativa, isto é, um dispositivo de tração comparado a outro dispositivo, quando operados sob as mesmas condições do solo. Para avaliar as forças do solo que afetam o desempenho da tração, a forma mais comum, utilizada nas equações de

simulação é o índice de cone, obtido no campo através dos penetrômetros (WISMER e LUTH, 1974; AL-HAMED et al., 1990; ZOZ e GRISSE, 2003).

No estudo do desempenho de tração de um trator além das condições do solo, também as características dos rodados e variáveis como carga dinâmica, força na barra de tração, torque e patinamento afetam a eficiência de tração. Wismer e Luth (1974) desenvolveram uma série de equações que, relacionado às condições do solo e as características dos rodados, simula a eficiência trativa. Conforme Al-Hamed et al., (1990) as equações propostas por Wismer e Luth (1974) foram desenvolvidas para pneumáticos operando em solos coesivos, com pressão interna normal dos rodados e que produz uma deflexão de aproximadamente 20% quando submetido à carga.

A simplicidade desse método, que necessita apenas de um parâmetro de força do solo, faz dele um instrumento eficaz para o uso na predição da tração e é útil para comparar o desempenho de diferentes tratores (UPADHYAYA; WULSFON, 1990). Contudo, os autores alertam que os resultados obtidos com essas equações seguem uma curva finita de simulação e essa deve ser considerada na hora de se fazer a estimativa da tração.

3.2.4 Pneus agrícolas

Segundo Mialhe (1980), os pneus utilizados em tratores e máquinas agrícolas devem suportar, com segurança, o peso do trator ou da máquina em condição estática e dinâmica, agir como um sistema de amortecimento dos impactos provocados pelas irregularidades do solo, além de garantir, com eficiência, a transmissão das forças motrizes e frenantes do trator ao solo e vice-versa.

De acordo com Correa (1999), o rodado é a última parte da ligação do motor do trator com o solo e seu estudo é de fundamental importância para um melhor desempenho do trator, havendo, portanto, a necessidade de conhecê-lo com detalhes, utilizando a pressão interna indicada pelo fabricante e tomando os devidos cuidados com a sua manutenção. Segundo a autora, todo pneu é projetado para suportar determinadas cargas com uma pressão de ar especificada, sendo que o correto ajuste da pressão interna dos pneus lhe garante maior vida útil.

Os pneus utilizados na agricultura podem ser classificados de acordo com seu uso em: motrizes e diretrizes (para tratores e máquinas); e, transportadores (para implementos e máquinas). Quanto à pressão interna, os pneus podem ser classificados como: baixa pressão (50 a 150 kPa) e pressões normais (100 a 200 kPa). Em relação ao processo de fabricação, os pneus agrícolas podem ser de construção diagonal ou radial, de acordo com a disposição geométrica das fibras.

Segundo Schlosser (1996b), quatro distintas situações podem ser encontradas quando se retrata a relação de pneus e solos: roda indeformável sobre uma superfície indeformável (ex.: pneu com alta pressão sobre estrada ou caminho pavimentado); roda indeformável sobre solo uma superfície deformável (ex.: pneu com alta pressão sobre solo agrícola lavrado ou gradeado); roda deformável sobre superfície indeformável (ex.: pneu de baixa pressão sobre estrada ou caminho pavimentado); e, roda deformável sobre superfície deformável (ex.: pneu baixa pressão sobre solo lavrado ou gradeado).

A pressão interna tem papel fundamental na área de contato entre o pneu e o solo, além da distribuição de pressão na sua superfície (LEE; KIM, 1997). Esses autores analisaram o efeito da pressão interna no desempenho da capacidade tratora de um trator usando pneus diagonais e concluíram que a máxima eficiência de tração foi verificada na velocidade de deslocamento de $5,5 \text{ km.h}^{-1}$; entretanto, os autores não puderam afirmar que, com o aumento da velocidade de deslocamento, houve aumento da eficiência de tração. O melhor desempenho dos rodados do trator foi obtido pelo ajuste da pressão interna dos pneus de acordo com o tipo de solo e com as condições superficiais deste solo.

Cordeiro (2000), ao avaliar o desempenho operacional de um trator John Deere modelo 6600, 4x2 TDA, utilizando três modelos de pneus: diagonal, radial e BPAF (Baixa Pressão e Alta Flutuação), observaram que o pneu diagonal apresentou maiores capacidades de tração do que os pneus radiais e BPAF, com menor patinamento nas condições de maior força na barra de tração e maiores níveis de lastro.

Contraopondo os resultados de Cordeiro (2000), em trabalho realizado com trator 4x2 TDA, com pneus radiais de baixa pressão e diagonais trabalhando com a TDA desligada, Correa et al. (1997) mostraram que o pneu radial de baixa pressão melhorou significativamente o rendimento do trator quando comparando aos pneus diagonais. Os resultados indicaram uma redução, em média de 28,4% no

patinamento das rodas motrizes com pneus radiais e o uso de pneus de construção diagonal proporcionou menores valores de esforço na barra de tração.

Pneus com baixa pressão interna tendem a oferecer maior área de contato com o solo, fornecendo ao trator maior capacidade tratória. Correa et al. (2000) observaram uma tendência de melhoria na capacidade tratória, quando os pneus estavam com pressão interna recomendada pelo fabricante. Os resultados obtidos pelos autores evidenciaram diferenças expressivas do uso da pressão correta em relação às altas pressões internas, com redução de 11,5% no patinamento e de 3,2% no consumo de combustível do trator. Os autores obtiveram ainda um aumento de 3,7% na potência na barra de tração e de 4,4% na capacidade operacional, com o uso da pressão recomendada pelo fabricante de pneus, comparado com a pressão baixa em pneus diagonais.

3.2.5 Patinamento dos rodados

Nos tratores agrícolas, o patinamento dos rodados ocorre devido a diversos fatores, entre eles o esforço de tração necessário para deslocar determinado equipamento e o tipo de superfície em contato com a banda de rodagem dos pneus motrizes, conforme relatado por Herzog et al. (2002). A Figura 25 ilustra os segmentos parciais de deslizamentos entre as garras do pneu e o solo durante o fenômeno do patinamento.

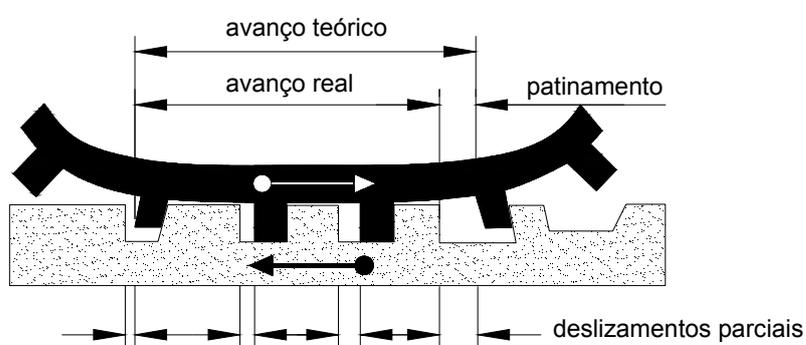


Figura 25 - Ilustração do patinamento através dos deslizamentos parciais entre pneu e solo. Fonte: adaptado de Schlosser (2006).

Lanças e Upadhyaya (1997) concluíram que, além dos fatores já citados (tipo de pneu, a pressão interna, carga sobre o rodado, tipo da banda de rodagem e condições do solo) a declividade e teor de água do solo também afetam o patinamento das rodas motrizes do trator.

Segundo Mialhe (1996), o patinamento das rodas motrizes dos tratores pode ser obtido através da diferença entre as suas rotações com e sem carga no trator, representando os percursos do trator tracionando um equipamento e aquele que seria obtido nas mesmas condições depois de desacoplado o equipamento. De acordo com Lanças e Upadhyaya (1997), para que ocorra tração é necessário que exista patinamento, entretanto, caso esta ultrapasse determinados limites, pode ocorrer perda da aderência e redução da tração dos rodados.

Ao avaliar o patinamento do trator na operação de semeadura, em duas profundidades de deposição de adubo (6 e 12 cm) Herzog et al. (2002) observaram que o patinamento das rodas motrizes do trator foi 56% maior na profundidade de 12 cm em relação à profundidade de 6 cm, com uso de haste sulcadora. Durante os trabalhos de análise da exigência de tração e do patinamento do trator na operação de semeadura, com semeadora-adubadora de precisão, trabalhando com duas velocidades de deslocamento e duas profundidades de deposição de adubo, Cepik et al. (2001) concluíram que o aumento da profundidade de trabalho demandou uma força de tração maior por parte do trator resultando em maior patinamento das rodas motrizes.

De acordo com Gu e Kushwara (1994), a distribuição de carga dinâmica e desempenho tratório de um trator 4x2 TDA, operando com pressão interna dos pneus de 124 kPa, em 7 (sete) condições de patinamento (0 – 25%) obtidas de acordo com sete marchas do trator lastrado, concluíram que para patinamento maior que 7%, a disponibilidade de potência foi afetada somente pela distribuição da carga dinâmica, que deveria ser cerca de 48% para solo cultivado e 54% para solo sem preparo, para reduzir o esforço de tração e manter uniforme a distribuição de peso sobre os rodados.

Para se obter a máxima eficiência de tração com um menor consumo específico de combustível, em um trator Massey Ferguson 3080, Jenane et al. (1996) recomendaram que o trator deveria trabalhar com um coeficiente de tração dinâmico mínimo de 0,4. Ainda, avaliando o patinamento de um trator agrícola, Jenane et al. (1996) concluíram que o trator, quando trabalhava com patinamento

fora do ideal, havia uma redução considerável na potência disponível na barra de tração.

Segundo Schlosser et al. (2004), na condição de solo mobilizado, os menores patinamentos ocorreram nas condições dos tratamentos com menor peso nas rodas dianteiras e maiores raios estáticos destes pneus. Porém, o consumo mínimo de combustível foi obtido quando o patinamento oscilava na faixa de 10 a 15%.

3.2.6 Consumo de combustível

A quantidade de combustível utilizada para a implantação de culturas agrícolas é função de vários fatores tais como a adequação e condição do conjunto trator-equipamento, profundidade da operação, tipo e condição de solo, tempo de manobras e, principalmente, do número de operações agrícolas adotadas no processo de produção (CORREA et al. 1999).

O consumo específico de combustível é um indicador consistente para a avaliação do desempenho do trator (CORDEIRO, 2000). O autor analisou o consumo de combustível de um trator em função do tipo de pneu e observou que este, quando equipado com pneu radial em comparação com o pneu diagonal apresentou melhor conversão energética do combustível.

Nos ensaios de um trator tracionando um escarificador, em solo com e sem preparo inicial, Acuña et al. (1995), concluíram que o consumo específico de combustível decresceu à medida que a potência na barra aumentou. Os dados obtidos pelos mesmos autores evidenciaram ainda que, sob uma força de tração de 35 kN na barra de tração, o consumo específico de combustível foi menor em relação ao trator operando com força de tração de aproximadamente 38 kN, o que pode ser explicado, segundo os autores, pela maior demanda de potência do trator na condição de maior força de tração.

Ao realizarem ensaios de campo na barra de tração de um trator agrícola, medindo o consumo de combustível em diversas condições de esforço trativo e potência na barra para a determinação das curvas de iso-consumo de combustível, Bernardes e Balastreire (1999) observaram que o consumo de combustível poderia ser reduzido de maneira considerável quando o trator trabalhasse nas faixas de

velocidades mais econômicas, o que podia ser conseguido através do escalonamento de velocidades apropriadas.

Ao avaliar o consumo de combustível e a capacidade de campo operacional de um trator na semeadura de aveia, em três manejos do solo (plantio direto, plantio convencional e escarificação), Nagaoka et al. (2002) concluíram que o consumo de combustível e o patinamento do trator foram maiores onde a operação de semeadura foi realizada em sistema convencional e com escarificação, que exigiu maior força de tração do trator, uma vez que nestes manejos havia maior mobilização do solo, quando comparado ao sistema de plantio direto.

3.2.7 Transferência de peso

A caracterização ponderodimensional, segundo Mialhe (1996), é aquela que fornece os efeitos resultantes da interação entre as dimensões e a distribuição de massas do trator, resultando em duas situações bem definidas. Uma, quando o trator está parado, conhecida como distribuição estática do peso sobre os eixos do trator. Outra, quando o trator entra em movimento ocorrem transferências de pesos entre os eixos, resultando numa distribuição de pesos dinâmica sobre os eixos, a qual é distinta da estática e que deve ser considerada no momento da avaliação de desempenho de um trator.

Conforme Schlosser (1997), o peso estático de um trator é a força total normal ao plano da superfície, portanto, não alterada, exercida sobre o elemento de tração ou transporte em posição estacionária, sobre um solo horizontal e com tração líquida zero ou torque motor nulo. O peso dinâmico do trator é a força total normal ao plano da superfície, portanto, não alterada, exercida sobre o elemento de tração ou transporte em condições de trabalho. Na condição dinâmica, outras forças interferem sobre a distribuição de pesos do trator, que são o esforço de tração desenvolvido na barra de tração ou engate tripontual, a resistência ao rolamento das rodas e o torque de rotação de roda. Também influencia na distribuição o ângulo de inclinação do terreno e ângulo de inclinação da força de tração na barra.

Um trator pode operar com uma combinação de dispositivos de tração diferentes, ou seja, pneus de tamanho diferentes nas árvores dianteiras e traseiras. Devido à transferência de peso durante a operação de campo, mesmo um trator com

a mesma configuração de pneus na frente e na parte traseira (tratores 4x4), o peso dinâmico nos pneus será, provavelmente, diferente entre as árvores dianteiras e traseiras, requerendo pressões diferentes nos pneus.

Linares (1996), ao analisar a condição de equilíbrio de tração, afirmou que o peso dinâmico sobre os eixos se modifica continuamente em função das condições de trabalho. Como a capacidade de tração depende da resistência do terreno para suportar forças tangenciais, e esta é em função da carga axial (peso), interessa ter peso aderente suficiente nas rodas motrizes para a força que se deseja produzir. Nos tratores de tração simples o peso sobre o eixo dianteiro não ajuda na tração, antes disso, oferece uma resistência ao avanço, tanto maior quanto mais pesado. Desta forma, Linares (1996) denomina a transferência de peso como sendo a diminuição do peso de um eixo em benefício do outro. Quando o terreno é inclinado, o peso dinâmico se soma à componente vertical da força de tração.

Porém, mesmo em condição dinâmica, fisicamente é possível determinar as condições de distribuição de peso por meio das equações de equilíbrio das forças e dos momentos. Matematicamente, basta igualar a somatória das forças e dos momentos à zero. O esquema da Figura 26, proposto por Linares (1996), ilustra os componentes de forças envolvidas na condição dinâmica de um trator exercendo tração na barra. As equações permitem a quantificação destas forças dinâmicas.

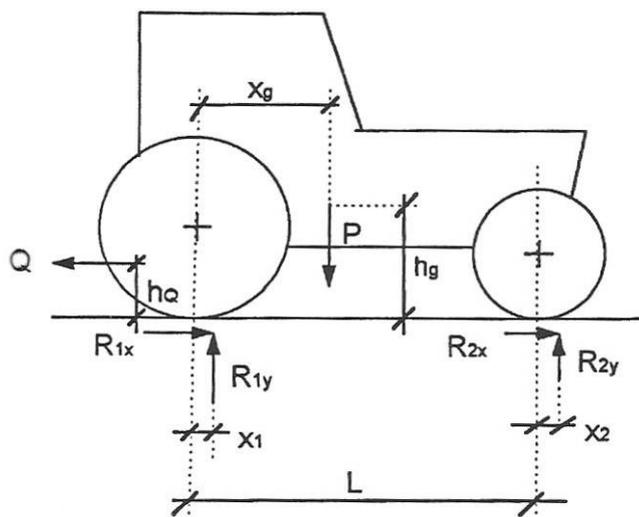


Figura 26 - Forças envolvidas no equilíbrio de tração em solo horizontal.

Fonte: Linares (1996)

A seguir, são apresentadas as equações para o cálculo da transferência de peso entre os eixos na condição dinâmica e em tração, propostas por Linares (1996).

$$\sum F = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} P = R_{1y} + R_{2y} \\ Q = R_{1x} + R_{2x} \end{array} \right. ; \quad \text{Equilíbrio de forças} \quad (16)$$

$$\sum Mo = 0$$

$$P \cdot X_g - R_{1y} \cdot X_1 - R_{2y} \cdot (L + X_2) - Q \cdot h_Q = 0; \text{Equilíbrio de momentos} \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{2y} = \frac{P \cdot X_g}{L} - \frac{M_k}{L} - \frac{Q \cdot h_Q}{L} \\ R_{1x} = \frac{P \cdot (L - X_g)}{L} + \frac{M_k}{L} + \frac{Q \cdot h_Q}{L} \end{array} \right. ; \quad \text{Reação das forças verticais} \quad (18)$$

$$M_k = R_{1y} \cdot X_1 + R_{2y} \cdot X_2; \quad \text{Resistência ao rolamento} \quad (19)$$

Em que:

P	= peso do trator	h_g	= altura do centro de gravidade
Q	= força horizontal de tração	X_g	= abscissa do centro de gravidade
L	= distância entre eixos	h_Q	= altura do ponto de engate
R_{1x} e R_{2x}	= reações horizontais do solo	M_k	= resistência ao rolamento
R_{1y} e R_{2y}	= reações verticais do solo	$\sum F$	= resultante das forças
		$\sum Mo$	= resultante dos momentos

3.2.8 Influência do solo sobre o desempenho de tratores

Conforme visto até o momento, a avaliação de desempenho de um trator agrícola recai sobre uma série de parâmetros que se relacionam entre si e também com o meio (no caso, o solo) e na maioria das vezes, os estudos têm analisado os efeitos isolados entre si, o que traz uma confiabilidade limitada. Talvez, porque o parâmetro solo seja o de comportamento mais imprevisível e inconstante, e por isso merece especial cuidado.

Para Balastreire (2007), nas considerações que envolvem o solo como meio de tração, deve-se levar em conta que: i) os solos apresentam geralmente certo grau de comportamento plástico, isto é, tendem a se deformar permanentemente sem fratura; ii) os solos agrícolas variam de textura, sendo que os arenosos possuem baixa coesão, não influenciando o seu teor de umidade, mas dispõem de atrito interno relativamente elevado; e os argilosos são bastante coesivos e suas propriedades de coesão e atrito interno são afetados seriamente pelo teor de umidade; enfim, iii) os solos não são homogêneos, verticalmente ou horizontalmente.

Considerando os diversos tipos e condições de solo, Witney (1988 *apud* MIALHE, 1996) propôs uma classificação qualitativa do solo a partir do “índice de cone” e previu o desempenho de um trator em tração segundo a condição do solo:

- Ótima: a melhor condição de tração que pode ocorrer, na qual os pneus têm boa aderência sem visível recalque do pneu após a passagem do trator; equivale a terreno de pastagem, duro e seco. A resistência oferecida ao penetrômetro de cone é de 1500 kPa.
- Boa: corresponde a terreno de palhada pós-colheita, seco, no qual se podem notar sulcos rasos no rastro dos pneus, mas não sendo esperados problemas de aderência. Resistência medida pelo penetrômetro de cone é de 1000 kPa.
- Média: corresponde a terreno de palhada pós-colheita, úmido, no qual se formam sulcos no rastro dos pneus, sendo esperados problemas de aderência. Índice de cone igual a 500 kPa.
- Pobre: correspondente a terreno solto seco, após mobilização mecânica do solo, no qual ocorre recalque pronunciado no rastro dos pneus do trator; cuidado deve ser tomado para evitar patinamento excessivo. Resistência pelo penetrômetro de cone de 400 kPa.
- Ruim: representa a pior condição de tração, com solo solto e muito úmido, presença de sulcos profundos no rastro dos pneus. Índice de cone menor que 200 kPa.

Para um dado momento, as diversas condições do solo acima mencionadas podem ser encontradas para o mesmo solo e na mesma área, haja vista a dependência direta do valor da resistência à penetração com o teor de água do solo. Diversos trabalhos, entre eles, Machado (2008) confirmam esta relação por meio de equações, o que significa que o estado do solo que responde por um determinado desempenho de tração de um trator de rodas pode também ser estimado pela sua

umidade. Indo mais além, Machado (2008) propôs uma metodologia simplificada para obter indiretamente a capacidade de suporte de carga de um solo, o seu teor de água e a resistência à penetração através da determinação do estado do solo em plástico, friável ou seco a partir do tato.

De uma maneira geral, a caracterização do solo para predição do comportamento da trafegabilidade e tração pode ser resumida pela resistência à penetração, por ser ele um parâmetro que congrega informações sobre consistência, grau de compactação, atrito e coesão das partículas do solo (LINARES; JEVENOIS, 1992). Porém, a reação do solo sobre dispositivos de tração (rodas) está fundamentada no estudo da ruptura do solo por cisalhamento, cuja teoria foi proposta originalmente por Mohr, por meio da sua conhecida Lei de Coulomb, e citado por Wismer e Luth (1974):

$$T = c + \sigma \times \tan \phi \quad (20)$$

Em que:

T = tensão de cisalhamento;

c = coesão do solo;

σ = tensão normal de compressão;

ϕ = ângulo de atrito interno.

A adaptação desta teoria para a mecanização agrícola é citada por Balastreire (2007), que multiplicou a equação pela área de contato do elemento de tração com o solo e obteve uma forma de quantificar o potencial de tração:

$$F_t = A \times c + P \times \tan \phi \quad (21)$$

Em que:

F_t = força de tração exercida pelo trator;

A = área de contato do pneu;

P = peso aderente sobre o solo.

De acordo com o modelo matemático proposto, Balastreire (2007) afirma que para a areia, que não possui força coesiva, a tração não pode ser aumentada pelo acréscimo nas dimensões dos pneus, supondo-se desprezível a penetração no solo. Do contrário, se o solo não possui atrito interno, como o caso de uma argila muito

úmida, o acréscimo de carga não aumentará a tração. Sobre um solo sem atrito, a ação de um componente de tração só pode ser aumentada pelo acréscimo da área de contato do pneu com o solo.

3.3 Material e métodos

3.3.1 Procedimento e delineamento experimental

a) Experimento de tração

A determinação da tração foi realizada em uma área de 6.000 m² pertencente ao Núcleo de Ensaio de Máquina Agrícolas da UFSM, em Santa Maria, RS, com coordenadas globais medianas de 29°43'8" Sul e 53°43'14" Oeste, em relevo plano e o solo classificado como Planossolo Hidromórfico Eutrófico arênico. A referida área foi dividida em duas parcelas de 25 metros de largura e 120 metros de comprimento, sendo que em uma o solo foi mantido em estado firme e consolidado, estando em repouso por mais de um ano e apresentando cobertura vegetal natural, com predomínio de gramíneas, e foi roçado dois meses antes dos ensaios. A outra parcela do solo foi intensamente mobilizada, preparado por uma aração, uma gradagem (300 mm de profundidade) e superficialmente nivelada com duas gradagens leves (150 mm de profundidade), em completa ausência de vegetação (Figura 27).



Figura 27 - Área dos experimentos de tração na UFSM com solo firme e mobilizado.

O experimento de tração foi realizado com o trator na 5ª e 6ª marcha (3ª RB e 3ª RA) tracionando o trator freio por meio de uma corrente metálica de 5 metros (Figura 28). Acelerando-se ao máximo (2.200 rpm) e obtida a estabilização da carga no transcurso da parcela o *datalogger* era ligado para iniciar a gravação dos dados, sendo cronometrado e anotado a hora de início e final do trajeto. Ao final da parcela, desligavam-se os sensores por meio de uma chave no *datalogger*. Desta forma, gravava-se, simultaneamente, em intervalos de 1 segundo, a hora, o número do registro, a tensão da bateria, a força de tração, o consumo horário de combustível, os pulsos de rotação das 4 rodas e a velocidade de deslocamento. Cada tratamento correspondeu a um transcurso na parcela, sendo a distância percorrida de aproximadamente 70 metros.



Figura 28 - Arranjo do trator teste instrumentado acoplado ao trator freio.

As marchas utilizadas nos testes foram as que mais se aproximaram da velocidade crítica para o trator, calculada para um coeficiente de aderência de 0,55. Para o trator freio, as marchas foram escolhidas de forma a apresentar a máxima resistência sem provocar arraste contínuo.

Foram avaliados a velocidade de deslocamento real, patinamento nas quatro rodas, força de tração na barra de tração e, consumo horário de combustível para as variantes marcha de trabalho, pressão interna dos pneus, peso total do trator,

condição de preparo do solo e, teor de água no solo. Juntamente com os ensaios, também foram avaliados outros parâmetros, como área de contato do pneu com o solo, circunferência de rolamento das rodas, distribuição estática do peso do trator, distribuição dinâmica do peso do trator, índice de cone e teor de água no solo.

O experimento foi conduzido pela combinação completa e casualizada do delineamento fatorial com 4 fatores e 2 níveis, totalizando 16 tratamentos, compostos pela condição do solo (firme e mobilizado), lastro (com e sem), pressão dos pneus (máxima e mínima) e velocidade (baixa e alta). Para repetição, foram consideradas as leituras de dados obtidas no percurso, na frequência de um registro por segundo, em todos os tratamentos. A Tabela 11 relaciona os tratamentos experimentais realizados no experimento de tração.

Tabela 11 - Tratamentos executados no experimento de tração.

Trat.	Condição do solo	Lastro	Pressão do pneu	Velocidade
T1	firme	com	máxima	baixa
T2	firme	com	máxima	alta
T3	firme	com	mínima	baixa
T4	firme	com	mínima	alta
T5	firme	sem	máxima	baixa
T6	firme	sem	máxima	alta
T7	firme	sem	mínima	baixa
T8	firme	sem	mínima	alta
T9	mobilizado	com	máxima	baixa
T10	mobilizado	com	máxima	alta
T11	mobilizado	com	mínima	baixa
T12	mobilizado	com	mínima	alta
T13	mobilizado	sem	máxima	baixa
T14	mobilizado	sem	máxima	alta
T15	mobilizado	sem	mínima	baixa
T16	mobilizado	sem	mínima	alta

As pressões utilizadas nos pneus foram: máxima de 165 e 234 kPa nos rodados traseiro e dianteiro, respectivamente; mínima de 41 e 48 kPa nos rodados traseiro e dianteiro, respectivamente, na condição com lastro, e 34 kPa na condição sem lastro. A velocidade de trabalho obedeceu à seguinte combinação de marchas: baixa, 3ª Reduzida Baixa no trator tração e B1 no trator freio; média, 3ª Reduzida Alta no trator tração e B2 no trator freio.

O experimento de tração foi repetido sobre a mesma área para duas condições de teor de água do solo: sobre solo seco e solo úmido. Na condição de solo úmido o fator trator sem lastro foi suprimido.

b) Experimento de trafegabilidade

O experimento de trafegabilidade com conjunto trator e reboque foi realizado em solo Planossolo Hidromórfico (unidade Vacacaí) da Fazenda Escola do Instituto Federal Farroupilha, campus de São Vicente do Sul (IFF/SVS), com coordenadas globais médias de 29°44'44" Sul e 54°44'23" Oeste. A área consistia de uma lavoura com relevo sistematizado em nível, cultivado com arroz irrigado por inundação, em sistema de preparo convencional. No momento da determinação havia resteva da planta e cobertura de palha, haja vista que a lavoura havia sido recentemente colhida (Figura 29). O solo encontrava-se saturado, preservando uma lâmina de água variando de 50 a 200 mm de profundidade.



Figura 29 - Área do experimento de trafegabilidade no IFF/SVS, sob solo saturado.

A área experimental era estabelecida por três quadros de formato retangular, com área aproximada de 0,5 hectares cada, foram conduzidos trajetos de avaliação da trafegabilidade em circuito no interior dos mesmos. A instrumentação e o

procedimento de aquisição de dados foram idênticos ao experimento de tração, contudo, ao invés de trator freio, utilizou-se um reboque com plena carga acoplado à barra de tração do trator teste. As marchas selecionadas foram as de maior velocidade possível para a potência do motor, que no caso variavam entre 1ª simples baixa (1ª SB) e 1ª simples alta (1ª SA). A Figura 30 mostra o arranjo do trator e reboque do teste.



Figura 30 - Arranjo do trator teste instrumentado acoplado ao reboque.

No início de cada trajeto eram anotadas a hora de partida e as observações de percurso, como troca de marcha, eventual imobilização, assim como uma breve análise qualitativa da locomoção no trajeto. Posteriormente, os dados foram copiados do *datalogger* para uma planilha eletrônica.

Foi montado um experimento fatorial 3x2x2 e o delineamento experimental adotado para o teste de trafegabilidade foi blocos ao acaso, com 3 blocos, combinados a 3 fatores e 2 níveis, totalizando 8 tratamentos e 3 repetições. O tamanho da parcela correspondia ao percurso do trajeto para completar uma volta no interior de cada quadro, percorrendo distâncias entre 200 e 300 metros, de acordo com o tamanho do quadro. As causas de variação do desempenho impostas ao conjunto foram: fator lastro (com lastro e sem lastro), fator pressão interna dos pneus (máxima e mínima) e tração dianteira auxiliar (ligada e desligada).

A marcha preferencial de operação do trator foi 1ª Simples Alta, e nos casos de sobrecarga no motor, a marcha era reduzida para 1ª Simples Baixa. As pressões utilizadas máximas nos pneus do trator foram 138 e 207 kPa, no rodado traseiro e dianteiro, respectivamente, e as mínimas foram de 34 kPa, em ambos os rodados. Os tratamentos executados no experimento de trafegabilidade com trator e reboque estão relacionados na Tabela 12.

Tabela 12 - Tratamentos executados no experimento de trafegabilidade.

Tratamentos	Blocos	Lastro	Pressão do pneu	Tração dianteira
T1	1	com	máxima	ligada
T2	1	com	máxima	desligada
T3	1	com	mínima	ligada
T4	1	com	mínima	desligada
T5	1	sem	máxima	ligada
T6	1	sem	máxima	desligada
T7	1	sem	mínima	ligada
T8	1	sem	mínima	desligada
T1	2	com	máxima	ligada
T2	2	com	máxima	desligada
T3	2	com	mínima	ligada
T4	2	com	mínima	desligada
T5	2	sem	máxima	ligada
T6	2	sem	máxima	desligada
T7	2	sem	mínima	ligada
T8	2	sem	mínima	desligada
T1	3	com	máxima	ligada
T2	3	com	máxima	desligada
T3	3	com	mínima	ligada
T4	3	com	mínima	desligada
T5	3	sem	máxima	ligada
T6	3	sem	máxima	desligada
T7	3	sem	mínima	ligada
T8	3	sem	mínima	desligada

3.3.2 Caracterização dos veículos

a) Trator tração

O trator de tração foi o Massey Ferguson, modelo 292 *Advanced*, com aproximadamente 40 horas de uso, equipado com motor Perkins P4.000T de 4 cilindros turbo alimentados, fornecendo 77,3 kW (105 CV) de potência nominal (ISO

14396) a 2.200 rpm e 402 Nm (41 mkgf) de torque e com tração dianteira auxiliar. Admite peso máximo de 65,9 kN (6.720 kgf) distribuídos entre os eixos cuja distância é de 2.450 mm. Seu vão livre total é de 400 mm.

A transmissão do trator era composto por 12 marchas à frente e 4 marchas à ré, com engrenamento não sincronizado feito por 3 alavancas seletoras (alto e baixo; reduzida e simples; ré, 1ª, 2ª e 3ª). O escalonamento consta na Tabela 13 e as marchas destacadas em negrito foram utilizadas nos testes.

Tabela 13 - Escalonamento de marchas do trator teste MF 292 Advanced.

Sentido	Marcha	Velocidade (km h ⁻¹)
F 1	1ª RB	2,4
F 2	1ª RA	3,1
F 3	2ª RB	3,9
F 4	2ª RA	5,2
F 5	3ª RB	6,6
F 6	3ª RA	8,6
F 7	1ª SB	9,6
F 8	1ª SA	12,6
F 9	2ª SB	16,1
F 10	2ª SA	21,1
F 11	3ª SB	26,8
F 12	3ª SA	35,1
Ré 1	Ré RB	3,4
Ré 2	Ré RA	4,4
Ré 3	Ré SB	13,8
Ré 4	Ré SA	18,0

F: frente; R: reduzida; S: simples; B: baixa; A: alta

O trator tração era equipado com pneus R1 de construção diagonal, sendo os dianteiros de medida 14.9-26 Pirelli TM95 e os traseiros 23.1-30 Firestone F151 *Traction Field & Road* e suas características constam na Tabela 14.

Tabela 14 - Medidas dos pneus utilizados no trator teste MF 292 Advanced.

Rodado	Bitola	Carga máxima (kN)	Pressão máxima (kPa)	Largura da banda (mm)	Raio estático (mm)	Circunf. externa (mm)
Dianteiro	14.9-26	20,9	234	378	597	3.974
Traseiro	23.1-30	37,7	165	587	757	5.156

Fonte: Pirelli e Firestone (2009).

b) Trator freio

Como fonte geradora de tração foi utilizado um trator freio marca John Deere modelo 6415 de 78 kW (106 CV), 423 Nm (43,2 mkgf) de torque e 58,8 kN (6.000 kgf) de peso total. Estava equipado com pneus dianteiros de bitola 14.9-26 e pneus traseiros 23.1-30.

c) Reboque de carga

Nos testes de desempenho de trafegabilidade do trator MF 292 *Advanced* trafegando em áreas inundadas cultivadas com arroz e simulando o transporte de carga, foi utilizado um reboque graneleiro de um eixo marca Masal, modelo CG-ML 4500, de peso vazio de 12,26 kN e com capacidade de carga para 44,13 kN. O reboque era equipado com pneus 18.4-30 e a bitola era de 2.260 mm.

3.3.3 Determinações no trator tração

a) Área de contato dos pneus

A determinação da área de contato foi obtida pelo método direto, a partir da impressão do pneu sobre o solo. É de consenso que a área de contato é influenciada pelas dimensões do pneu, pressão interna, peso axial aplicado à roda e pela deformação e recalque da superfície de apoio. Optou-se pela determinação da área para quatro situações: trator sem lastro e pressão interna alta, sem lastro e pressão baixa, trator com lastro e pressão alta e com lastro e pressão baixa, medido para as quatro rodas do trator sobre um solo mobilizado e nivelado.

Uma vez posicionado sobre o terreno o contorno das rodas do trator eram pulverizadas com cal branca a fim de delimitar a impressão sobre o solo, conforme mostra a (Figura 31). A área interna não atingida pela cal correspondia à área efetiva de contato. Posteriormente, o trator era deslocado em marcha ré para fora da área e o local era fotografado, formando uma projeção cônica do local. Como referência para escala, eram dispostas duas trenas graduadas na posição do menor e maior eixo, formando um sistema de coordenadas ortogonais.

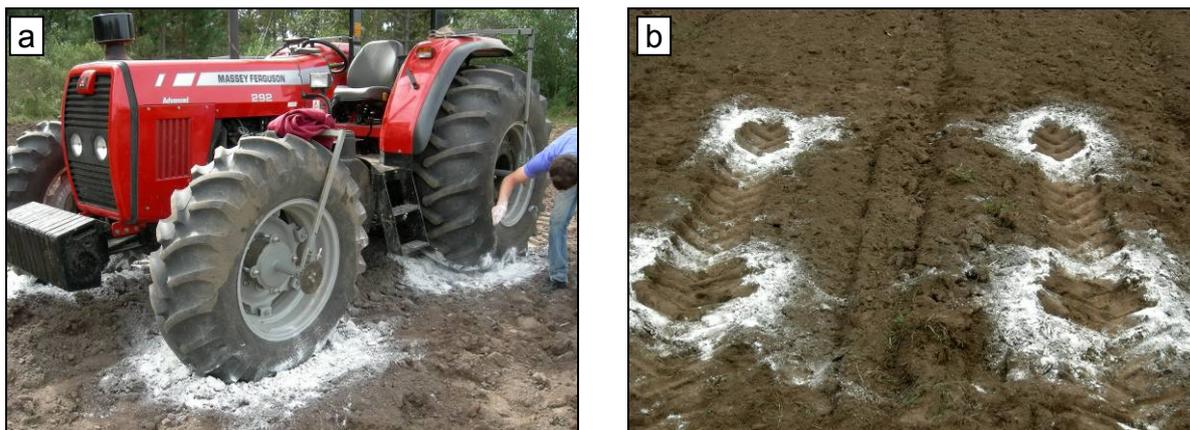


Figura 31 - Determinação da área de contato dos pneus do trator com o solo: a) delimitação da área com cal; b) área de contato deixada sobre o solo.

A partir das fotografias digitais, a área de contato foi mensurada de duas formas: primeiramente, foi desenhado o contorno do rastro sobre a imagem em AutoCad e determinada a área gráfica, posteriormente convertida através da escala. O segundo método consistiu na visualização do contraste entre as cores (cal e solo), descontado a área sombreada pela fita métrica, no qual era obtido com o auxílio do programa informático Fito-Área (PINHEIRO et al., 2003), concebido para medição de área foliar de plantas a partir de fotografias. Na Figura 32 pode ser visualizada a imagem da superfície de contato do pneu dianteiro sobre o solo e sua respectiva área contrastada pelo *software*. A área final obtida corresponde à média dos dois métodos para cada variante.

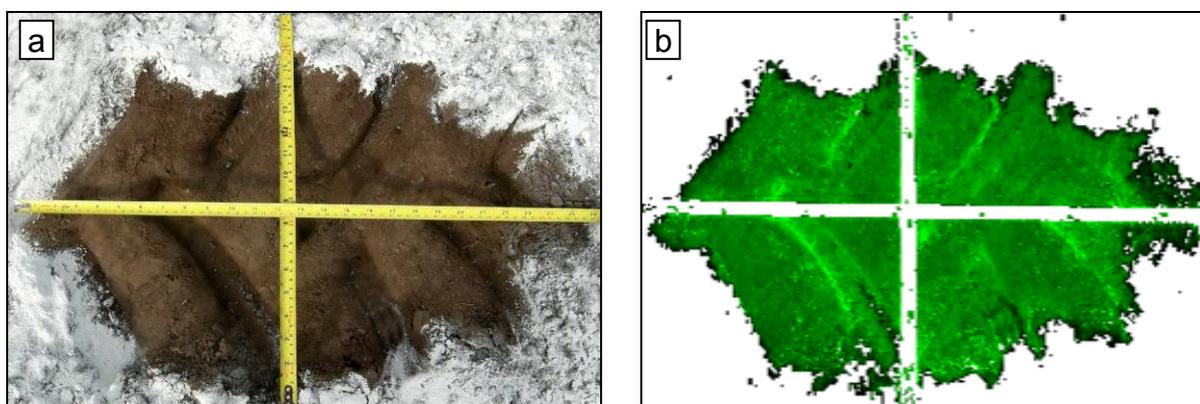


Figura 32 - Imagens da superfície de contato do pneu dianteiro sobre o solo: a) área fotografada; b) contraste da imagem obtida pelo programa informático Fito-Área.

b) Pesagem do trator

A pesagem do trator tração procedeu-se em balança plataforma, marca Toledo, com capacidade para 500 kN e precisão de 0,1 kN, pertencente a uma unidade de recebimento de arroz, situada no Bairro Camobi, em Santa Maria, no qual foi obtido o peso total e por eixo, na condição trator vazio e na configuração com peso de lastro máximo. O peso vazio corresponde ao trator com tanque de combustível cheio (180 litros), acrescido do peso da água restante nos pneus ao nível mais baixo do ventil, considerado como resíduo de lastro, pela dificuldade da água ser retirada em sua totalidade. A pesagem por eixo foi obtido posicionando apenas um rodado sobre a balança, primeiramente o rodado dianteiro e posteriormente, o rodado traseiro. Os referidos valores de peso e sua distribuição proporcional por eixo encontram-se Tabela 15.

Tabela 15 - Pesagens do trator MF 292 *Advanced* e distribuição por eixo.

Pesagem	Peso vazio kN (kgf)	Percentual %	Peso com lastro kN (kgf)	Percentual %
Peso total	41,7 (4250)	100	58,5 (5970)	100
Rodado dianteiro	16,7 (1700)	40	23,8 (2430)	41
Rodado traseiro	25,0 (2550)	60	34,7 (3540)	59

c) Lastragem do trator

Foram utilizados dois tipos de lastros: metálicos e água. Sobre a dianteira do trator foram dispostas 12 placas de metal com 343 N de massa individual e no rodado traseiro, quatro aros de 706 N, sendo duas em cada roda. Como lastro adicional foi utilizada água em todos os pneus até o nível do ventil quando na sua posição mais elevada, ou seja, aproximadamente $\frac{3}{4}$ do volume interno, correspondendo a 370 litros em cada pneu traseiro e 140 litros em cada pneu dianteiro do trator. O total de lastro somou 16,95 kN, distribuídos em 6,87 kN na dianteira e 10,08 kN sobre o rodado traseiro do trator.

d) Ajuste da pressão dos pneus

Para aferição da pressão interna dos pneus foi utilizado um calibrador analógico de ponteiro, marca PRIMAX, com sensibilidade de 7 kPa e pressão máxima de 345 kPa. O ajuste da pressão interna dos pneus foi sempre realizado com o ventil na posição inferior e o trator apoiado sobre solo, formando um plano horizontal nivelado.

e) Consumo de combustível

Para medida do consumo de combustível foi utilizado um fluxômetro eletromecânico marca OVAL M-III, modelo LSF41, com precisão de +/- 1%, frequência máxima de resposta de 1 Hz, alimentação de 12~24 Vdc, apresentado na Figura 33. Esse sistema de medição é composto por duas engrenagens ovais que convertem o volume de combustível deslocado em uma frequência de pulsos. No caso, uma delas possui um ímã que sensibiliza um sensor indutivo, gerando uma frequência de pulsos elétricos que são armazenados no *data logger*. Segundo o fabricante, o “volume deslocado por unidade de pulso” é um parâmetro invariável e igual a um centímetro cúbico, tornando sua calibração desnecessária.

O fluxômetro foi instalado no circuito de alimentação de combustível, entre a bomba alimentadora e a bomba injetora, no qual uma adaptação desviava o retorno de combustível dos bicos injetores para a tubulação localizada depois do medidor, impedindo que o mesmo combustível fosse medido repetidas vezes. O deslocamento positivo foi garantido pela imposição de uma válvula de sentido de fluxo.

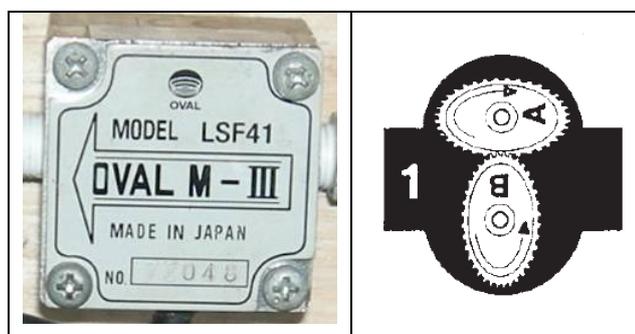


Figura 33 - Vista externa do fluxômetro e seu sistema de engrenagens ovais.

O consumo horário combustível do trator foi calculado pela Equação 22, para uma frequência de aquisição de dados de 1 Hz e adotando 1 pulso = 1 cm³.

$$Ch = Pul \times 3,6 \quad (22)$$

Em que:

Ch = consumo horário (L h⁻¹)

Pul = pulsos gerados pelo fluxômetro (Hz)

f) Força de tração

Para medição da força de tração foram utilizadas duas célula de carga marca Alfa modelo Q (*Multi Shear Beam*), uma com capacidade nominal de 50 kN e outra 100 kN, ambas com sensibilidade de 2 mV/V +/- 0,1%, precisão de 0,01 kN e ligação com 6 fios. A célula de maior capacidade foi utilizada no experimento de tração e a outra no experimento de trafegabilidade.

A célula de carga foi disposta numa estrutura que substituiu a barra de tração do trator. Este sistema foi desenvolvido por Russini (2009) que trata de uma barra de tração retrátil ligando o implemento ao trator, tendo no seu centro a célula de carga, conforme mostra a Figura 34. A força desenvolvida pelo trator é transmitida em igual magnitude para a célula de carga, que a mede através de sinais elétricos de acordo com a intensidade. Os sinais elétricos gerados em mV são convertidos em força e armazenados no *data logger*.

A força de tração (FT) foi calculada em kN pela Equação 23:

$$FT = C \times FBr6W \times FC \quad (23)$$

Em que:

C = constante de conversão (4,8581 kN mV⁻¹)

FBr6W = sinal elétrico emitido pela célula (mV)

FC = fator de calibração da célula, adimensional.



Figura 34 - Sistema de engate da célula de carga para medição força de tração, desenvolvido por Russini (2009).

A aferição foi feita no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro de Tecnologia da UFSM, utilizando-se para tal uma prensa hidráulica aferida pelo INMETRO, com controle e registro de aplicação de carga. A célula foi instalada na prensa e ligada no *data logger*, e este ao computador portátil, de maneira a permitir que fossem visualizadas, simultaneamente, a magnitude real da carga aplicada e a leitura fornecida pela célula.

O procedimento de aferição consistiu em aplicação de sucessivos incrementos de carga da prensa, às quais eram relacionadas com as leituras da célula, até atingir 80% da capacidade nominal da célula. Adotando como referência os valores de carga aplicada pela prensa hidráulica, obtiveram-se os parâmetros da equação de ajuste, que para ambos, foi linear, de acordo com a Figura 35.

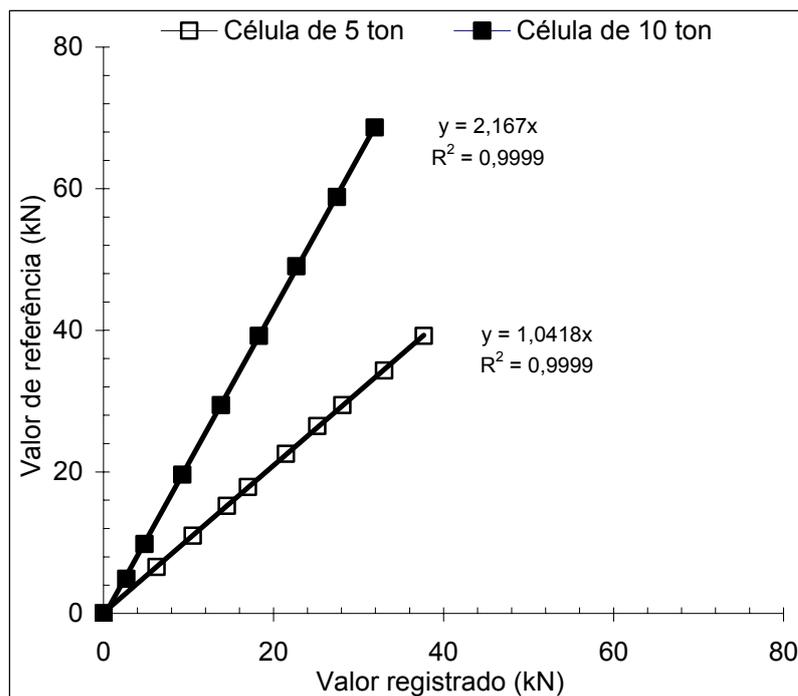


Figura 35 - Relação entre as leituras de aferição e equação de regressão linear.

g) Patinamento

O patinamento foi determinado nas quatro rodas do trator tração, adotando o mesmo procedimento descrito no Capítulo 2, a partir das medições da circunferência de rolamento, velocidade real de deslocamento (idem 2.3.5.a) e velocidade escalar das rodas (idem 2.3.5.b).

A circunferência de rolamento para a finalidade de cálculo do patinamento foi determinado seguindo a metodologia contada em ASAE S 296.4 (1996). Foi medida a distância percorrida pelo trator equivalente a dez voltas das rodas, na marcha 1ª simples alta, em pista plana de calçamento, sem exercer esforço na barra de tração, o que pressupõe ausência de patinamento. Este procedimento foi repetido para cada pressão de pneu utilizado (duas) e com a tração dianteira ligada e desligada.

Para a aquisição e armazenamento dos dados foi utilizado o mesmo *datalogger* citado no item 2.3.5.c do Capítulo 2. A rotina de programação para aquisição de dados foi adaptada em função da instrumentação utilizada (4 sensores de pulsos, 1 célula de carga, 1 fluxômetro e 1 receptor de sinal de GPS) e consta no Apêndice 6.

A Figura 36 mostra o trator instrumentado para aquisição eletrônica de dados e registra o momento da lastragem do pneu dianteiro com água.

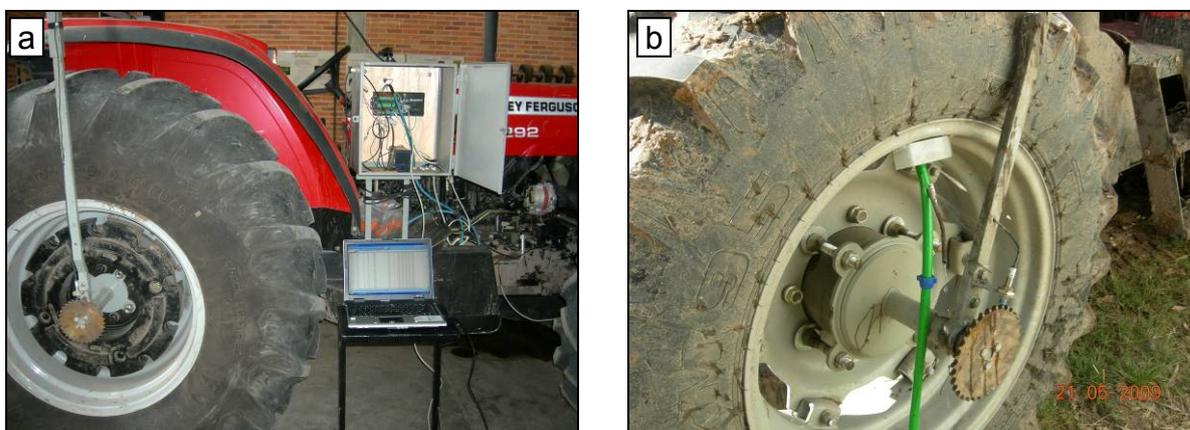


Figura 36 - Preparação do trator para os experimentos de tração e de trafegabilidade: a) instrumentação eletrônica; b) lastragem do pneu com água.

3.3.4 Determinações do solo

O solo da área do experimento de tração foi caracterizado do ponto de vista físico através de análises realizadas no Laboratório de Física do Solo do Centro de Ciências Rurais da UFSM para amostras coletadas na profundidade de 0 a 200 mm, utilizando os seguintes métodos para determinação:

- Densidade do solo: método do anel
- Análise granulométrica: método da pipeta (USDA, 1972)
- Consistência: limites de Atterberg (SOWERS, 1965)

Os dados referentes aos parâmetros físicos para caracterização Planossolo Hidromórfico Eutrófico arênico (EMBRAPA, 1999) encontram-se na Tabela 16. Com base nos dados referentes à textura e utilizando o diagrama de repartições de Classes Texturais para classificação granulométrica, o referido solo encontra-se no limite da classificação entre franco e franco-siltoso, considerando o solo firme como franco e o solo mobilizado como sendo franco-siltoso.

Tabela 16 - Parâmetros físicos para caracterização do Planossolo estudado.

Parâmetro	Solo firme	Solo mobilizado
Textura	(%)	(%)
Areia	35,0	27,5
Silte	41,0	52,5
Argila	24,0	20,0
Densidade	(MG m⁻³)	(MG m⁻³)
Ds	1,45	1,28
Limites de Atterberg	(kg kg⁻¹)	(kg kg⁻¹)
Limite Superior de Plasticidade	28,5	26,6
Limite Inferior de Plasticidade	21,1	18,5
Índice de Plasticidade	7,4	8,1

a) Umidade do solo

A umidade do solo foi obtida na área do experimento de tração (NEMA/UFMS) em quatro locais, sendo dois na parcela com solo firme e dois no solo mobilizado. A determinação da umidade do solo foi realizada pelo método da estufa, a partir da coleta de três amostras de solo na profundidade de 0 a 200 mm em cada local. A média dos três valores foi adotada como umidade pontual do local.

b) Índice de cone

O Índice de Cone do Solo na área do experimento de tração (NEMA/UFMS) foi obtido a partir da medição da resistência à penetração do solo no perfil de 0 a 400 mm, com leituras de 10 em 10 mm, a partir da superfície. A forma de amostragem foi idêntica à da umidade do solo, ou seja, medida em quatro locais, dois para cada condição do solo, com 3 sub-amostragens. Foi utilizado o “medidor eletrônico de compactação do solo” marca FALKER, modelo PLG1020, com cone tipo 2 (diâmetro de 12,83 mm). Na área do experimento de trafegabilidade (IFF/SVS) foram realizadas 15 medições por bloco, em locais aleatoriamente definidos, sendo 10 medições no solo não perturbado e 5 medições no rastro do trator. Em se tratando de um solo saturado, foi utilizado o cone tipo 1 (diâmetro de 20,27 mm).

A Figura 37 ilustra os momentos da coleta de solo na área do experimento de tração para determinação da umidade e medição da resistência à penetração do solo.



Figura 37 - Determinação dos parâmetros de solo: a) coleta para obtenção da umidade; b) medição do índice de cone do solo.

3.4 Resultados e discussão

3.4.1 Determinações do trator tração

a) Circunferência de rolamento

Os dados apresentados na Tabela 17 referem-se à circunferência de rolamento das rodas do trator tração para os fatores experimentais delineados neste trabalho.

Tabela 17 - Circunferência das rodas do trator MF 292 *Advanced* obtidos com e sem lastro, tração dianteira auxiliar ligada e desligada e para pressão interna alta e baixa.

Peso do trator	Tração dianteira	Pressão dos pneus		Circunferência	
		ET (kPa)	ED (kPa)	Roda traseira (mm)	Roda dianteira (mm)
Com lastro	ligada	165	234	5.207	3.840
	desligada	165	234	5.102	4.060
	ligada	41	48	4.999	3.690
	desligada	41	48	4.910	3.844
Sem lastro	ligada	165	234	5.212	3.875
	desligada	165	234	5.143	4.087
	ligada	34	34	4.968	3.695
	desligada	34	34	4.896	3.835

ET: eixo traseiro; ED: eixo dianteiro.

Analisando a Tabela 17, percebe-se que os fatores lastro, TDA e pressão interferem no comprimento da circunferência de rolamento, porém apenas o fator pressão dos pneus resulta em diferença significativa (Tukey 5%). A adição de peso ao trator provoca maior deformação nos pneus e diminui o diâmetro externo da roda, mas reduzindo pouco sua circunferência. O efeito da tração dianteira também provoca alterações na circunferência; como o eixo dianteiro que auxilia na tração do conjunto é mais leve a circunferência das rodas traseiras praticamente não altera e o avanço cinemático se encarrega de diminuir a distância linear percorrida por volta em 5%, porém, não estatisticamente significativa. Diferentemente, a pressão interna interfere na deformação dos pneumáticos. As distâncias percorridas pelas rodas com alta pressão são estatisticamente maiores que as percorridas com os pneus em

baixa pressão. A condição que mais aproxima das dimensões obtidas com as apresentadas pelo fabricante é o trator com lastro, com pneus à pressão alta e TDA desligada.

b) Área de contato dos pneus com o solo

De acordo com a Tabela 18, a diminuição da pressão interna dos pneus aumentou em 48% a área de contato nos pneus dianteiros e em 36% nas rodas traseiras; enquanto que a adição de lastro provocou um aumento na área de contato nas rodas dianteira em 19% e não alterou sua relação nas rodas traseiras. Nos pneus traseiros a área de contato se mantém praticamente inalterada quando adicionados os lastros. O fato pode ser entendido porque a pressão dos pneus na condição do trator lastrado era ligeiramente maior, e este efeito praticamente anulou o aumento de área previsto nos pneus traseiros quando da adição de lastro.

Tabela 18 - Área de contato dos pneus do trator MF 292 *Advanced* obtidas em solo macio para diferentes pesos e pressões internas dos pneus.

Peso do trator	Pressão dos pneus		Área de contato	
	ET (kPa)	ED (kPa)	Pneu dianteiro (cm ²)	Pneu traseiro (cm ²)
Com lastro	165	234	1550	2785
	41	48	2305	3785
Sem lastro	165	234	1306	2800
	34	34	1936	3802

ET: eixo traseiro; ED: eixo dianteiro.

Conforme era esperado, a pressão interna dos pneus influencia na área de contato pneu-solo. É possível afirmar que quanto menor a pressão interna do pneu maior é a área impressa sobre o solo, independente da lastragem. O peso do trator também interfere na área e esta pode ser verificada com maior clareza sobre os rodados dianteiros, no qual a lastragem tem maior efeito. Resumindo, a área de contato, assim como a circunferência de rolamento, são mais influenciadas pela pressão interna dos pneus do que pelo peso aplicado sobre a roda.

c) Aferição dos sensores

No gráfico da Figura 38 apresentam-se as velocidades das rodas dianteiras e traseiras calculadas a partir da rotação angular obtida pelo registro da frequência de pulsos dos sensores, considerando a circunferência de roda apropriada; e a velocidade real de deslocamento medido com receptor de sinal de GPS. Entende-se que a sobreposição das curvas corresponde à sincronia de ambas as velocidades e ocorre na maior parte do tempo, o que é desejado. Porém, para grandes variações no módulo da velocidade, como em paradas e acelerações bruscas, percebe-se que a curva da velocidade medida com GPS desloca-se à frente em relação às demais, caracterizando um atraso de sinal, na ordem de 1 a 2 segundos. Este fenômeno fica mais evidente nas paradas, quando as rodas já não apresentam mais movimento e a velocidade medida pelo GPS apresenta valores residuais. Aparentemente, o fato não deve ser preocupante, pois nos ensaios a campo a velocidade é mantida praticamente constante, minimizando desta forma, o erro intrínseco. Outro fenômeno verificado cujo efeito não aparece neste gráfico ocorre a velocidades muito baixas, inferiores a 4 km h^{-1} , quando o GPS não consegue fornecer leituras, mesmo com o trator em movimento. Por esse motivo, foram adotadas marchas de trabalho que propiciassem velocidades de deslocamento acima de 4 km h^{-1} .

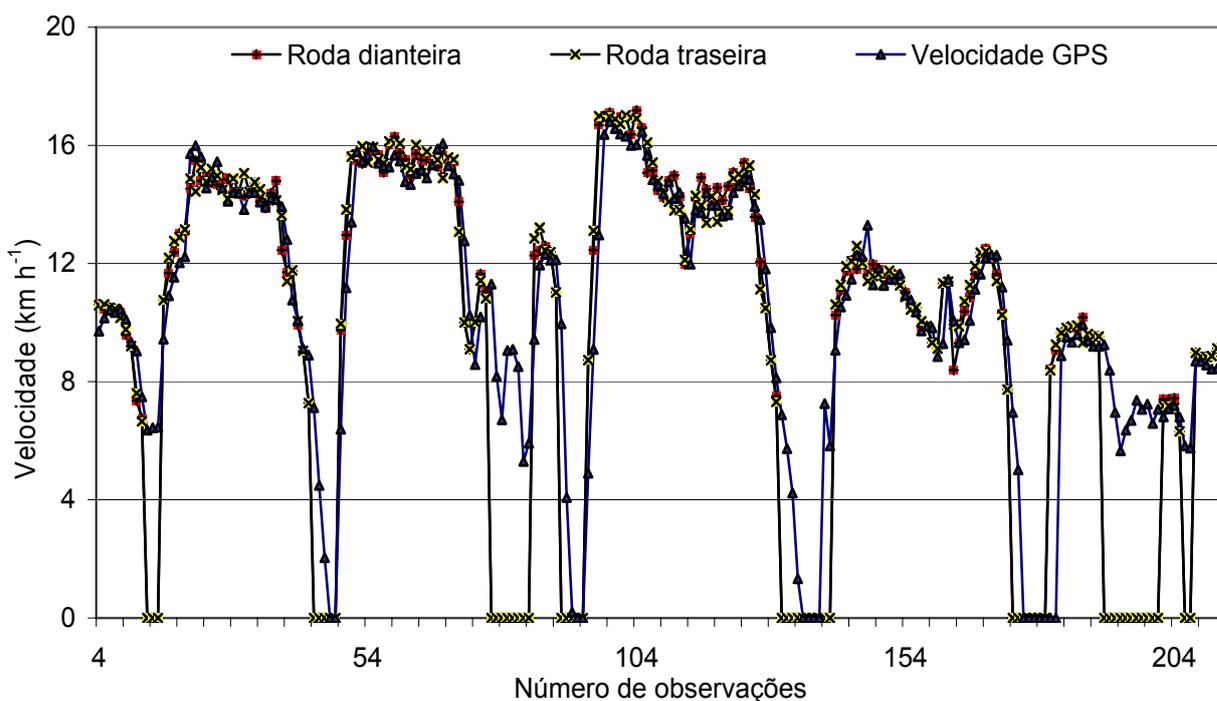


Figura 38 - Velocidade obtida pelos sensores de roda e registrada pelo GPS.

3.4.2 Experimento de tração

a) Ensaio preliminar

O gráfico da Figura 39 representa uma amostra de 30 segundos com informações relativas à força de tração exercida na barra de tração (BT), velocidade escalar das rodas dianteiras e traseiras e a velocidade de deslocamento real obtido no experimento de tração sob diferentes combinações de marcha do trator tração (MF292) e trator freio (JD6415).

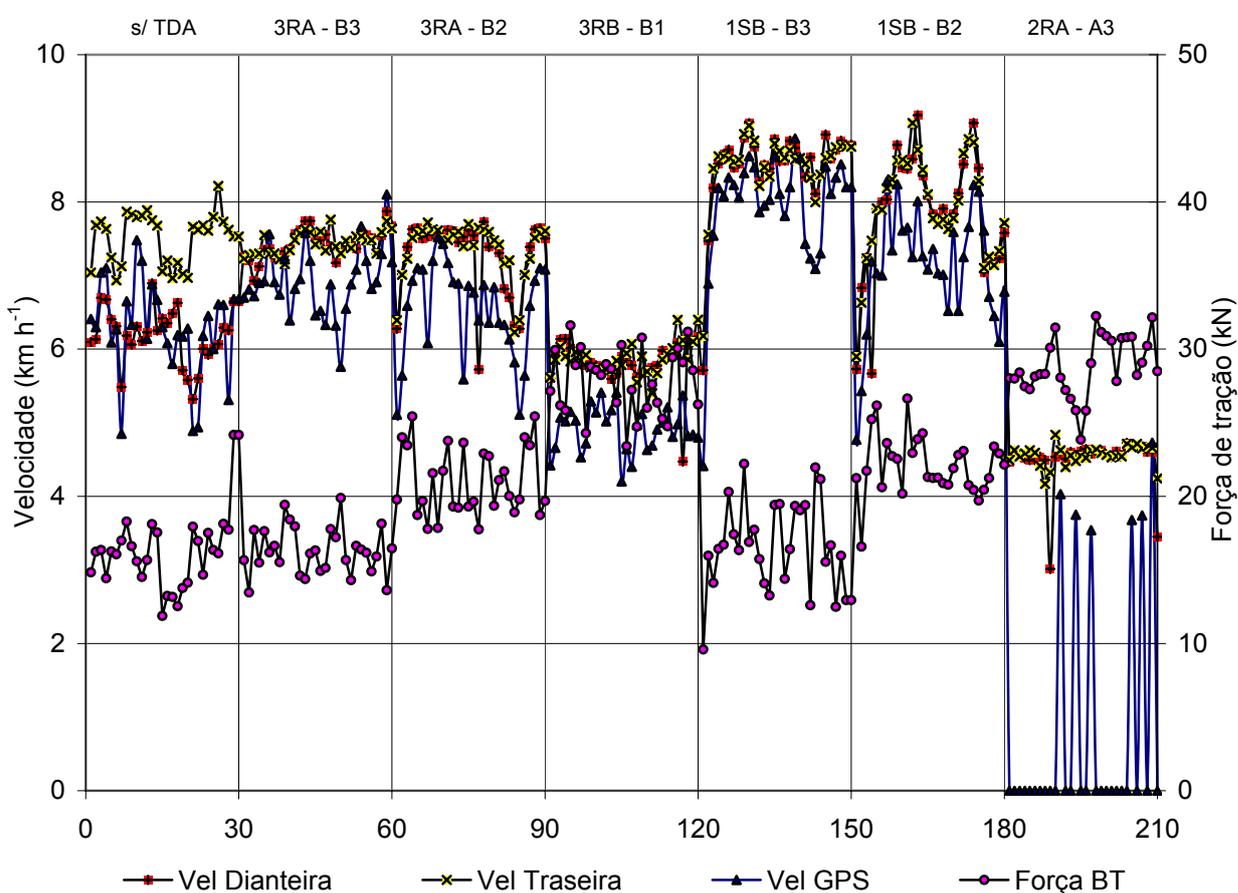


Figura 39 - Força de tração e velocidade escalar das rodas do trator e do GPS, relativas a uma fração de 30 segundos de teste sob diferentes combinações de marcha.

A observação a destacar refere-se ao distanciamento das curvas das velocidades dianteira e traseira em relação à velocidade do GPS, no qual a última é sempre inferior às demais. Trata-se do patinamento, ou deslizamento, das rodas

motrizes. A partir deste gráfico, foram selecionadas as duas combinações de marcha 3RB-B1 e 3RA-B2 por apresentarem velocidades em duas faixas, de 4 a 6 km h⁻¹ e acima de 6 km h⁻¹ e esforços de tração na ordem de 20 a 30 kN. Uma marcha acima (1SB) no trator tração proporcionou queda na rotação do motor, fato que não era desejado. Uma marcha mais lenta (A3) no trator freio fez o conjunto deslocar-se abaixo de 4 km h⁻¹, um limitante para os registros do GPS.

b) Tração em solo seco

A Tabela 19 resume os principais resultados medidos e registrados no *datalogger* durante o experimento de tração com trator freio. O patinamento e o consumo específico foram posteriormente calculados. Os valores referentes a cada tratamento correspondem à média das informações de um trajeto no campo e o teste de médias compara os níveis de cada variável para cada fator individualmente, pelo teste de Tukey, ao nível de 1% de diferença significativa.

Tabela 19 - Resumo dos resultados estatísticos do experimento de tração com trator freio em solo seco, expressos pelos valores médios de força, consumo específico, velocidade de deslocamento e patinamento por tratamento.

Fatores	Níveis	Variáveis			
		Força (kN)	Cons. Esp. (L kW ⁻¹ h ⁻¹)	Velocidade (km h ⁻¹)	Patinamento (%)
Solo	firme	26,14 a	0,49 b	5,59 a*	16,8 a
	mobilizado	25,05 b	0,51 a	5,51 a*	17,7 a
Lastro	com	26,23 a	0,53 a	5,50 b	13,8 b
	sem	24,84 b	0,48 b	5,61 a	20,9 a
Pressão	máxima	24,77 b	0,52 a	5,44 b	19,4 a
	mínima	26,37 a	0,49 b	5,66 a	15,0 b
Marcha	baixa	28,42 a	0,54 a	4,68 b	22,1 a
	alta	22,52 b	0,46 b	6,47 a	12,0 b

* diferem significativamente ao nível de 5%.

Conseguiu-se obter maiores forças de tração na BT no solo firme (4% maior) com menor consumo específico de combustível, quando comparado ao solo mobilizado. Por sua vez, o patinamento e a velocidade não sofreram influência da condição do solo.

A simples adição de lastro aumentou significativamente a força de tração na BT, diminuiu o patinamento e aumentou o consumo específico nas operações de tração conduzidas no experimento.

A utilização de baixa pressão interna dos pneus propiciou maiores forças de tração na BT, menores índices de patinamento, maior velocidade de deslocamento e menor consumo específico de combustível. A influência da pressão nos pneus sobre o patinamento foi mais notável no solo mobilizado.

Na marcha de baixa velocidade (4 a 5 km h⁻¹) a força de tração na BT foi sempre maior comparada à marcha alta (6 km h⁻¹); já o patinamento normalmente é reduzido pela metade na marcha de maior velocidade.

Em relação às variáveis, pode-se resumir que as maiores forças na BT foram obtidos com baixa velocidade de deslocamento, pressão interna baixa dos pneus, com trator lastrado operando em solo firme. O menor consumo específico foi obtido em solo mobilizado, com trator sem lastro, baixa pressão nos pneus e operando em marcha alta. Os menores índices de patinamento foram obtidos com o trator operando em marcha alta, na condição de lastro máximo e baixa pressão nos pneus.

A Tabela 20 foi elaborada a partir dos dados de experimento a fim de facilitar a interpretação de informações indiretas relativas aos resultados apresentados anteriormente. Considerando que a eficiência de tração é a proporção da potência fornecida na BT em relação à potência bruta do motor e que o coeficiente dinâmico de tração (Cdt) é a relação entre a força de tração na barra e o peso aderente do trator sobre o solo, pode-se afirmar que as maiores eficiências de tração (acima de 50%) foram conseguidas para patinamentos entre 7 e 15%. Nesta condição foi obtido o menor consumo específico de combustível, em média igual a 0,46 L kW⁻¹h⁻¹. Neujahr e Schlosser (2001) já haviam verificado que patinagens compreendidas entre 5 e 20% propiciavam as maiores eficiências de tração.

As causas de variação dos tratamentos não alteraram de forma discrepante a eficiência de tração, que ficou entre 43 e 55%. O maior valor para o coeficiente dinâmico de tração (Cdt) foi obtido em solo firme, na configuração do trator sem lastro e com pneus em baixa pressão, na ordem de 0,76.

Em relação à transferência dinâmica do peso calculada entre eixos do trator em tração observou-se que cerca de 10% do peso total do trator foi transferido do eixo dianteiro (ED) para o eixo traseiro (ET), modificando a relação de distribuição estática ED/ET de 40/60% para 30/70%, na condição dinâmica.

Tabela 20 - Velocidade, patinamento, consumo horário, distribuição dinâmica de peso, coeficiente dinâmico de tração, eficiência de tração do trator MF 292 para diferentes tratamentos do experimento de tração em solo seco.

	peso trator (kN)	pressão pneu	vel. de operação (km h ⁻¹)	patina- mento (%)	consumo horário (L h ⁻¹)	distrib. dinâmica ED % ET	Cdt	eficiência de tração (%)
firme	58,55	alta	4,30	21	17,7	31 69	0,55	45
	58,55	alta	6,45	9	17,8	33 67	0,44	54
	58,55	baixa	5,13	14	19,9	31 69	0,55	54
	58,55	baixa	6,75	7	18,7	33 67	0,42	54
	41,68	alta	4,33	32	20,3	28 72	0,73	43
	41,68	alta	6,52	15	18,8	30 70	0,60	53
	41,68	baixa	4,90	22	21,0	28 72	0,76	50
	41,68	baixa	6,75	12	19,6	30 70	0,60	55
mobilizado	58,55	alta	4,51	22	18,7	31 69	0,52	45
	58,55	alta	6,29	11	17,7	32 68	0,40	48
	58,55	baixa	4,77	15	19,2	30 70	0,57	52
	58,55	baixa	6,41	9	18,2	32 68	0,43	53
	41,68	alta	4,95	27	20,3	29 71	0,64	43
	41,68	alta	6,14	19	18,7	30 70	0,57	47
	41,68	baixa	4,24	32	20,8	27 73	0,74	43
	41,68	baixa	6,59	12	19,3	29 71	0,60	53

Cdt: coeficiente dinâmico de tração; ED: eixo dianteiro; ET: eixo traseiro.

Resultados similares em experimentos de tração têm sido relatados por diversos pesquisadores, além dos já mencionado na revisão bibliográfica. Machado et al. (2005) também obtiveram maiores esforços de tração em solo sem preparo, assim como os menores índices de patinamento (50% menor no solo sem preparo) em um ensaio de tração sob duas condições de um Planossolo, com e sem preparo. Ainda, a eficiência de tração encontrada pelos autores foi de 40% para o solo preparado e 60% para solo firme, que em parte se deve ao fato de que a maior resistência ao rolamento foi medida no solo com preparo.

Analisando o efeito da influência da pressão dos pneus sobre a força de tração obtida na BT, Ferreira et al. (2000a) observaram que, em solos firmes, as maiores capacidades de tração eram obtidas com as menores pressões internas dos pneus; porém, em solo mobilizado, esta tendência não foi confirmada pelos autores. Em relação ao patinamento, Ferreira et al. (2000b) verificaram que os menores índices de patinamento estavam relacionados a baixas pressões dos pneus, confirmando os resultados obtidos pelo presente trabalho.

Analisando os fatores individualmente, não se observou desvios em relação ao que os autores encontraram em experimentos similares. Porém, a análise estatística demonstrou que ocorrem interações duplas, triplas e quádruplas significativas entre os diversos fatores. A exemplificar, encontrou-se que o consumo horário interage com a quantidade de lastro e a velocidade de trabalho; a força de tração pode ser explicada pela interação entre condição do solo, pressão dos pneus e marcha; e a velocidade alcançada depende do solo, lastro e pressão; e o patinamento é influenciado pela combinação de solo, lastro, pressão e marcha de trabalho.

c) Tração em solo úmido

Na repetição do experimento de tração sobre a mesma área na condição de solo úmido, em que foi suprimido o fator trator sem lastro, podem ser verificados algumas semelhanças, conforme mostram os resultados nas Tabela 21 e Tabela 22.

Tabela 21 - Resumo dos resultados estatísticos do experimento de tração com trator freio em solo úmido, expressos pelos valores médios de força, consumo específico, velocidade de deslocamento e patinamento por tratamento.

Fatores	Níveis	Variáveis			
		Força (kN)	Cons. Esp. (L kW ⁻¹ h ⁻¹)	Velocidade (km h ⁻¹)	Patinamento (%)
Solo	firme	19,83 a	0,55 b	6,12 a	13,5 b
	mobilizado	16,30 b	0,87 a	5,04 b	30,5 a
Pressão	máxima	17,08 b	0,78 a	5,48 a	26,1 a
	mínima	18,54 a	0,69 b	5,58 a	20,2 b
Marcha	baixa	19,69 a	0,66 b	5,07 b	17,5 a
	alta	16,15 b	0,79 a	6,00 a	22,0 a

Para a condição de solo apresentada, certamente com umidade inadequada para o preparo de solo, porém comum de ser utilizada por agricultores, percebe-se a grande perda de tração em relação ao experimento em solo seco, 25% a menos no firme e 35% no solo mobilizado.

Tabela 22 - Velocidade, patinamento, consumo horário, coeficiente dinâmico de tração, eficiência de tração do trator MF 292 para diferentes tratamentos do experimento de tração em solo úmido.

solo	peso trator (kN)	pressão pneu	vel. de operação (km h ⁻¹)	patinamento (%)	consumo horário (L h ⁻¹)	Cdt	eficiência de tração (%)
firme	58,55	alta	5,20	18	17,3	0,34	0,37
	58,55	alta	6,88	14	18,5	0,30	0,44
	58,55	baixa	5,58	11	18,1	0,38	0,44
	58,55	baixa	7,21	8	18,7	0,31	0,47
mobilizado	58,55	alta	5,23	16	17,7	0,33	0,36
	58,55	alta	5,00	37	18,7	0,24	0,25
	58,55	baixa	4,53	24	17,2	0,30	0,29
	58,55	baixa	5,68	29	19,7	0,28	0,33

Cdt = coeficiente dinâmico de tração

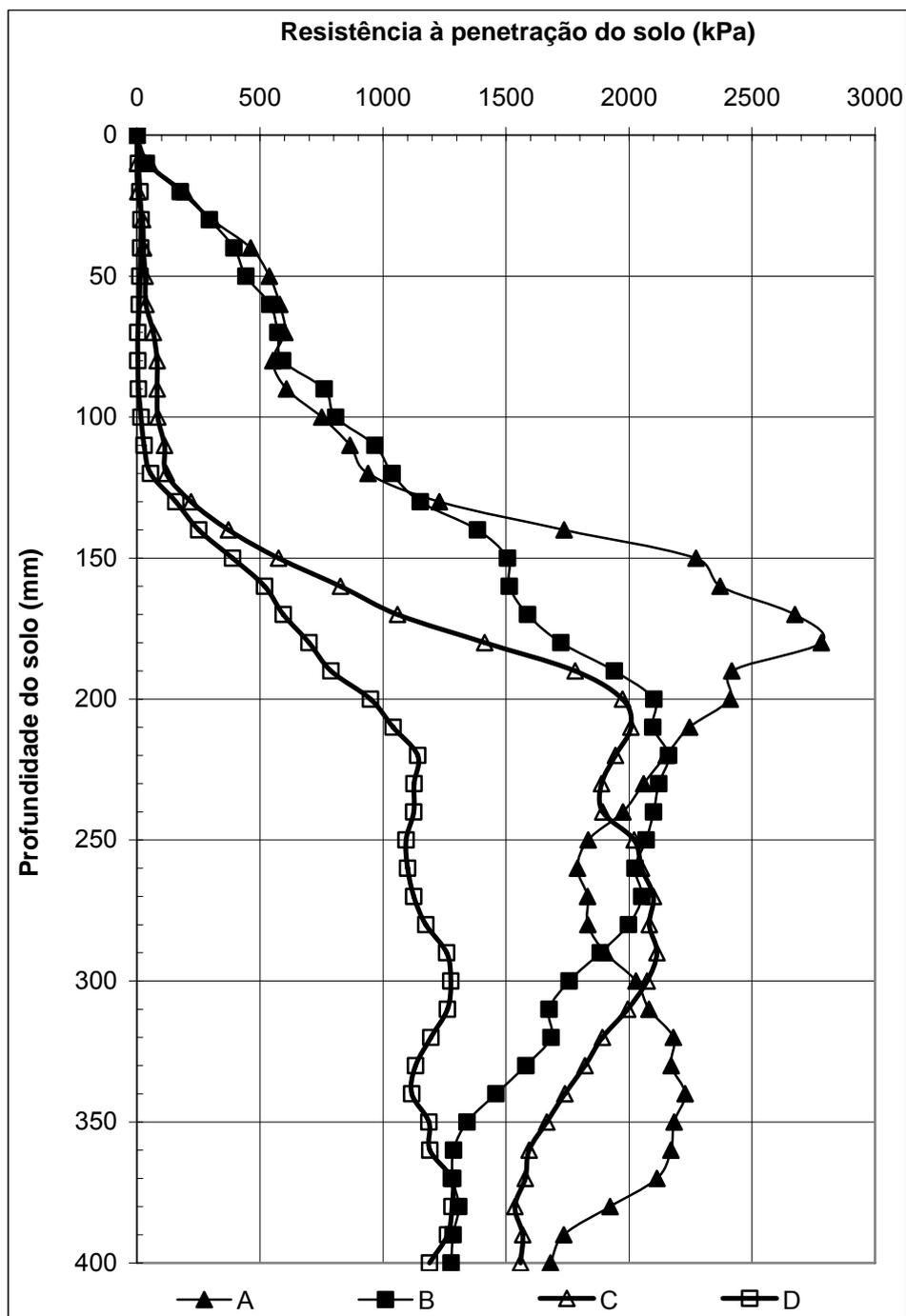
O ponto forte da análise comparativa dos dados recai sobre a força obtida na BT em função da velocidade e o patinamento dos rodados em função da pressão interna dos pneus. Em ambas as situações, maiores trações são conseguidas com velocidades mais baixas, embora possa se observar também um leve acréscimo da força em função da pressão dos pneus, mais notavelmente sob solo firme.

Diferentemente do observado no experimento em solo seco, percebeu-se que, no solo mobilizado, o patinamento foi maior na marcha de maior velocidade, conseqüência da baixa aderência dos pneus no solo. Neste caso, foi obtido o menor coeficiente dinâmico de tração e a menor eficiência de tração. No geral, o coeficiente dinâmico de tração diminuiu de 0,57 para 0,31 e a eficiência de tração de 50 para 37%, respectivamente do solo seco para solo úmido.

d) Avaliação do índice de cone do solo

As determinações do índice de cone do solo referem-se à área do experimento de tração do NEMA/UFMS, em quatro condições: solo firme, de densidade 1,45 Mg m⁻³ e com umidade gravimétrica de 0,179 kg kg⁻¹ e 0,246 kg kg⁻¹; e solo mobilizado, de densidade 1,28 Mg m⁻³ e com umidade de 0,202 kg kg⁻¹ e 0,358 kg kg⁻¹.

O gráfico da Figura 40 mostra as curvas e o Apêndice 7 os valores da resistência à penetração do solo na área sobre o qual foram realizados os experimentos de tração.



A = solo firme "seco" ($0,179 \text{ kg kg}^{-1}$) C = solo mobilizado "seco" ($0,202 \text{ kg kg}^{-1}$)
 B = solo firme "úmido" ($0,246 \text{ kg kg}^{-1}$) D = solo mobilizado "úmido" ($0,358 \text{ kg kg}^{-1}$)

Figura 40 - Resistência à penetração do solo firme e mobilizado no perfil 0 a 400 mm em duas condições de umidade gravimétrica do solo, seco e úmido, sobre o qual foram realizados os experimentos de tração na área do NEMA/UFSM.

A maior perda de resistência do solo em função da umidade foi observada no perfil do solo mobilizado, que passou de 1140 kPa a 0,202 kg kg⁻¹ de umidade do solo para 697 kPa a 0,358 kg kg⁻¹ de umidade; enquanto que no solo firme a diferença foi menor, de 1583 kPa a 0,179 kg kg⁻¹ de umidade para 1326 kPa a 0,246 kg kg⁻¹ de umidade.

A comparação entre as curvas da resistência à penetração para diferentes umidades do solo pode explicar a redução da força obtida na BT nos dois experimentos, em média de 25,5 kN no solo mais seco para 17,9 kN sobre solo mais úmido, o que representa uma diferença de 30%, sendo sua diferença mais acentuada no solo mobilizado (35%). Diante dos dados, pode-se afirmar que falta de aderência necessária para que as garras dos pneus produzam maiores valores de tração é consequência da baixa resistência do solo.

3.4.3 Experimento de trafegabilidade

Considerando a operação com a carga de grãos de 41,2 kN (4.200 kgf), e sendo a distância do centro da carga ao ponto de engate de 2.620 mm e a distância do centro do eixo ao engate no trator de 3.100 mm, conforme mostrado na Figura 41, foi calculado que 6,4 kN (650 kgf) oriundos da carga do reboque foram transferidos ao ponto de engate da barra de tração do trator.

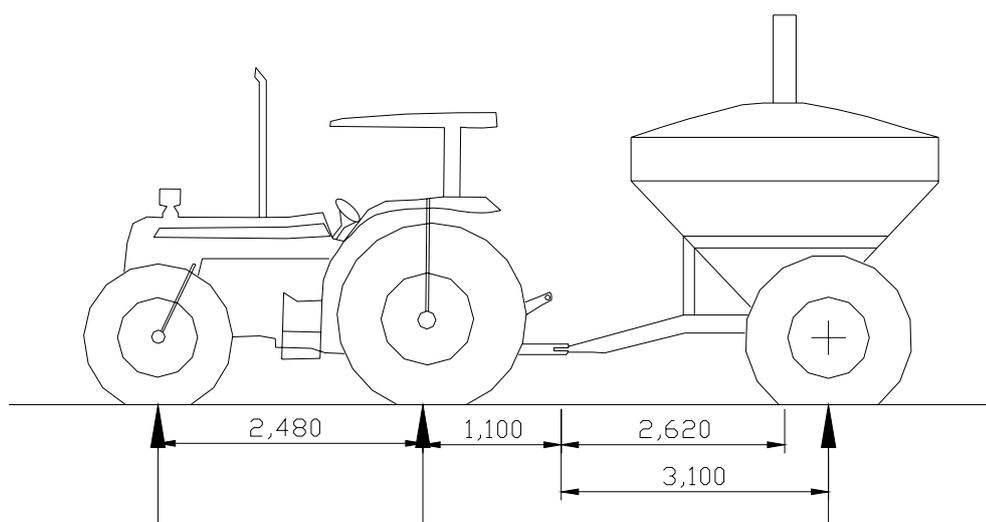


Figura 41 - Informação do conjunto trator e reboque para o cálculo da transferência de peso.

Em síntese, a trafegabilidade de um veículo sobre o solo pode ser avaliada em termos do sucesso ou não da mobilidade, da velocidade alcançada pelo conjunto e também pelo índice de patinamento, que responde pela dificuldade encontrada e pelo consumo energético para a realização da tarefa. A Figura 42 mostra as condições de solo enfrentadas no momento do experimento de trafegabilidade na área do IFF/SVS.



Figura 42 - Condições de solo enfrentadas na trafegabilidade na área do IFF/SVS.

A Tabela 23 apresenta a média dos valores para velocidade, consumo horário de combustível e patinamento do trator tração para cada bloco e tratamento do experimento de trafegabilidade. A força de tração média obtida pela célula de carga foi de 8,2 kN (835 kgf), que corresponde à resistência ao rolamento do reboque de carga.

Tabela 23 - Valores médios para velocidade, consumo horário de combustível e patinamento do trator MF292 obtidos em função do lastro, pressão de pneu e utilização de TDA em trafegabilidade.

	Lastro	Pressão	TDA	Velocidade (km h ⁻¹)	Consumo (L h ⁻¹)	Patinamento (%)
bloco 1	sem	baixa	ligada	7,9	16,9	25
	sem	baixa	desligada	4,9	19,3	55
	sem	alta	ligada	6,8	18,2	37
	sem	alta	desligada		não trafegou	
	com	baixa	ligada	6,4	17,5	28
	com	baixa	desligada		dados perdidos	
	com	alta	ligada	5,7	18,4	37
	com	alta	desligada		não trafegou	
bloco 2	sem	baixa	ligada	6,5	17,9	35
	sem	baixa	desligada	4,4	18,6	58
	sem	alta	ligada	6,3	18,1	40
	sem	alta	desligada		não trafegou	
	com	baixa	ligada	6,4	18,3	27
	com	baixa	desligada	4,8	17,2	46
	com	alta	ligada	5,8	17,8	35
	com	alta	desligada		não trafegou	
bloco 3	sem	baixa	ligada	7,2	18,3	31
	sem	baixa	desligada	5,5	18,5	49
	sem	alta	ligada	7,7	18,8	33
	sem	alta	desligada		não trafegou	
	com	baixa	ligada	6,5	17,8	27
	com	baixa	desligada	3,2	17,0	62
	com	alta	ligada	5,8	17,6	35
	com	alta	desligada		não trafegou	

De forma análoga aos resultados anteriores, os valores para as variáveis velocidade, consumo horário e patinamento apresentadas na Tabela 24 foram comparadas para cada nível dos fatores lastro, pressão dos pneus e TDA pelo teste de Tukey ao nível de 1%. Valores seguidos da mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Como o experimento foi conduzido em blocos, houve interação significativa entre blocos para a variável patinamento. Para a variável velocidade não houve interação entre os blocos 1 e 2 e para o consumo, não houve interação entre blocos.

Tabela 24 - Comparação de médias entre velocidade de locomoção, consumo horário de combustível e patinamento do trator MF292 obtidos em função do lastro, pressão de pneu e utilização de TDA.

Fatores	Níveis	Variáveis		
		Velocidade (km h ⁻¹)	Consumo (L h ⁻¹)	Patinamento (%)
Lastro	com	4,71 b	17,9 b	42,9 a
	sem	5,14 a	18,2 a	42,6 a
Pressão	baixa	5,76 a	18,0 a	27,7 b
	alta	3,99 b	18,0 a	59,2 a
TDA	ligada	6,43 a	18,0 b	33,0 b
	desligada	2,87 b	18,1 a	55,8 a

A utilização de lastro no trator para trafegabilidade em condições de solo saturado tem pouco efeito prático. O peso adicionado pelo lastro demanda maior potência, reduzindo a velocidade de operação, provavelmente porque aumenta o recalque do solo e a resistência do rolamento das rodas. A adição de lastro reduziu a velocidade de locomoção do conjunto o equivalente a uma marcha do trator (de 1ªSA para 1ªSB).

Por outro lado, reduzir a pressão interna dos pneus tem efeitos positivos na trafegabilidade, reduzindo significativamente o patinamento e aumentando a velocidade de deslocamento. Este fato reforça que trafegar em solos com baixa capacidade de suporte de carga requer flutuação do veículo, que pode ser conseguido pelo aumento na área de contato dos pneus. Contudo, a maior segurança da mobilidade do conjunto se deu com os pneus do trator em baixa pressão e com a utilização de lastro (menor patinamento), porém, similar desempenho foi obtido quando retirados os lastros, onde obteve-se o segundo menor índice de patinamento.

A influência positiva da utilização de baixa pressão nos pneus e a ausência de lastro proporciona maior flutuação do trator, melhorando seu desempenho sobre o aspecto patinamento. Neujahr (1999), utilizando os pneus de alta flutuação, em comparação com os pneus diagonais convencionais, em reboques graneleiros e tratores, concluiu que os primeiros provocam menores níveis de deformação e recalque do solo, traduzidos na forma de rugosidade superficial do solo. Para um mesmo tipo de pneu, efeito similar pode ser obtido quando inflados à baixa pressão e reduzindo a carga aplicada sobre eles.

Os índices de patinagem variam, provavelmente de acordo com a melhor adequação da pressão específica determinada pela variação da carga e dimensões

dos pneus e conseqüente resistência do solo. Porém, existe uma relação ideal que proporciona melhor aderência. No caso do transporte de 29,42 kN de carga em solo alagado, Neujhar (1999) encontrou índices de patinagem maiores em pneus de alta flutuação comparados a pneus diagonais convencionais. Mas, aumentando a carga para 49,03 kN o trator equipado com pneus de alta flutuação proporcionou índices de patinagem 44,9% menor que o promovido pelos pneus diagonais. Neste caso provavelmente houve melhor adequação da pressão específica exercida com o uso do pneu sobre o solo

Em relação ao uso da tração dianteira pode-se afirmar que a TDA foi determinante para o sucesso mobilidade, especialmente quando os pneus estavam com a máxima pressão interna. Contudo, nos demais tratamentos, o uso da TDA propiciou significativa redução do índice de patinamento, aproximadamente em 50%.

A variável que não apresentou variação significativa nos tratamentos para a trafegabilidade foi o consumo horário de combustível. A explicação para o fato reside na concepção de como o governador da bomba injetora reage diante de sobrecargas momentâneas. Quando o motor é solicitado para superar uma sobrecarga de potência e os rodados possuem aderência suficiente no solo a bomba injetora automaticamente fornece uma maior quantidade de combustível, garantindo uma reserva de torque ao motor à custa de um aumento de consumo. Este fato foi perceptível no experimento de tração. Porém, quando a aderência dos pneus no solo é deficiente, a sobrecarga imposta transfere-se em aumento do patinamento, diminuindo a velocidade de deslocamento do conjunto. Neste caso, o aumento do consumo horário torna-se praticamente imperceptível.

Para compreender o efeito da interação dos blocos, apresenta-se na Figura 43 e no Apêndice 7 os valores da resistência à penetração no perfil do solo na área onde foram conduzidos os testes de trafegabilidade. As leituras iniciais com valor zero se devem à presença de lâmina de água de aproximadamente 100 mm.

O efeito bloco manifestou-se porque as características de solo não foram homogêneas para as repetições e a variável mais sensível que detectou essa diferença foi o patinamento. Para efeito na velocidade, o solo dos blocos 2 e 3 não apresentam diferença significativa, como pode ser verificado no gráfico.

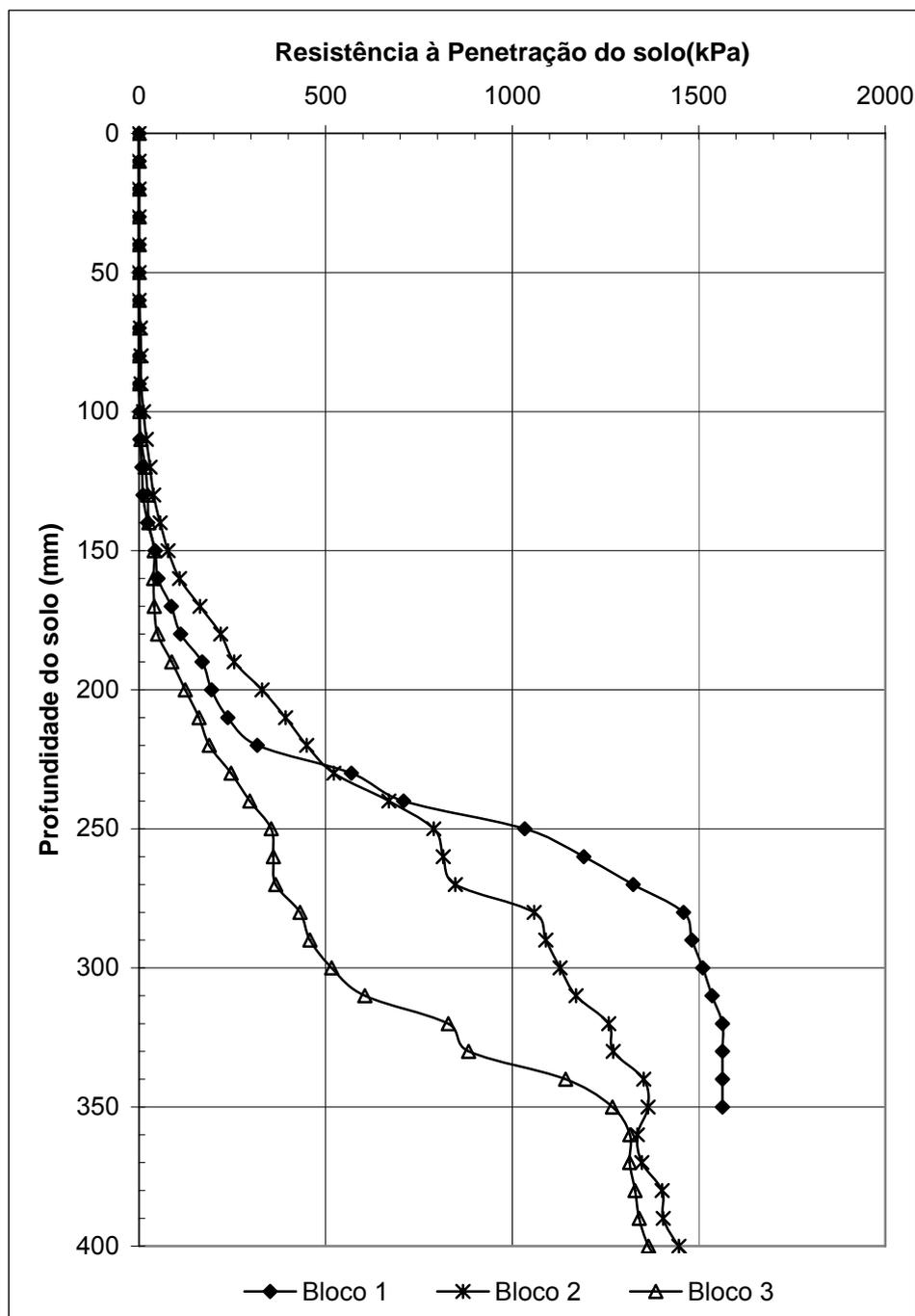


Figura 43 - Curvas da resistência à penetração no perfil do solo na área de tráfego do conjunto trator e reboque, na área do IFF-SVS, medido adjacente ao rastro.

A Figura 44 apresenta a resistência à penetração do solo antes e depois do tráfego. As leituras de IC = 0 no solo não perturbado correspondem à lâmina de água (100 mm) e a medição do IC no rastro inicia na profundidade de 210 mm devido ao recalque do solo provocado pelos rodados do conjunto. Comparando as

curvas verifica-se que o solo é perturbado pela passagem do conjunto até a camada de solo correspondente a IC de 500 kPa, pressupondo que esta seria a resistência necessária e suficiente para o tráfego.

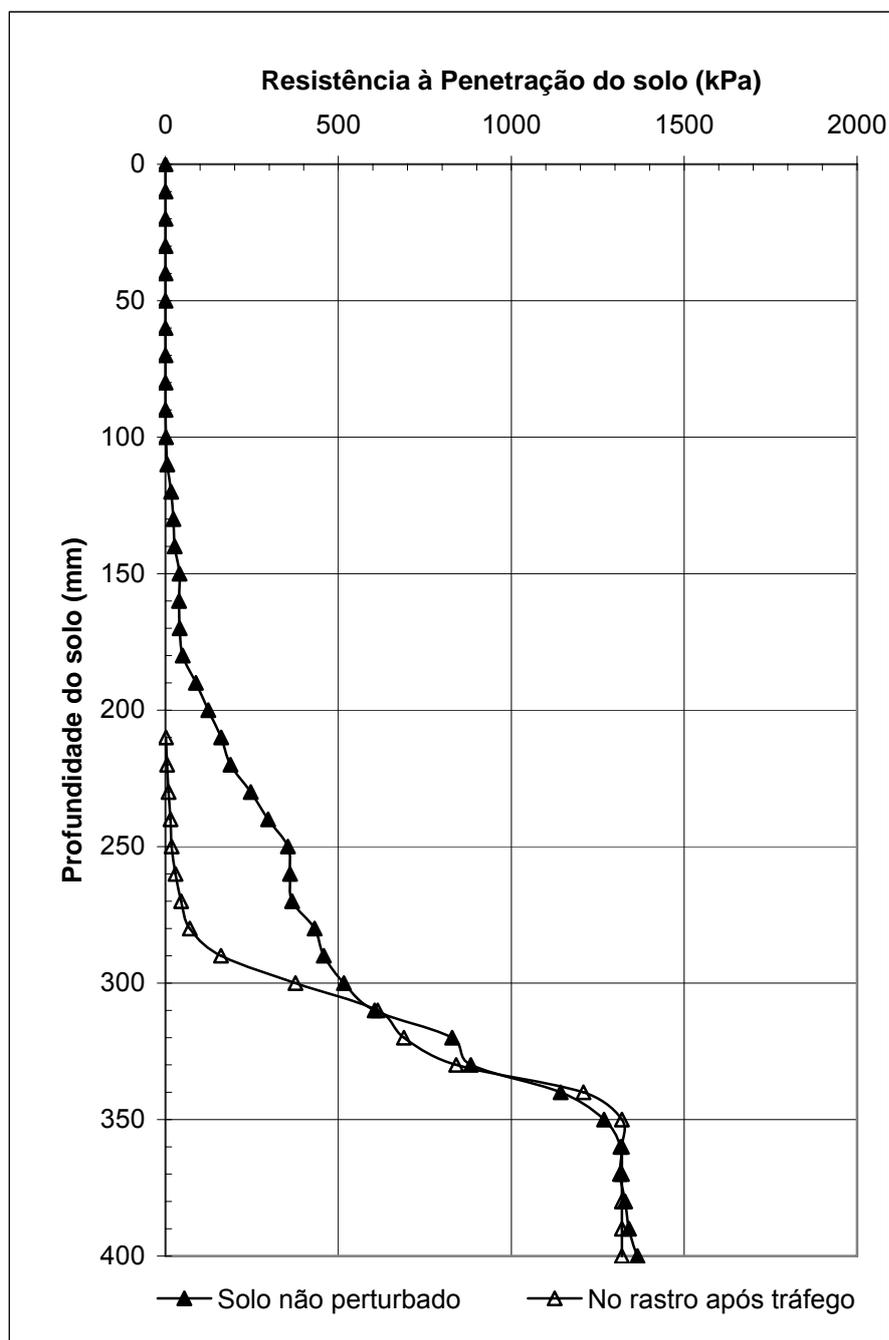


Figura 44 - Curvas da resistência à penetração no perfil do solo medido antes e depois do tráfego do conjunto trator e reboque.

3.5 Conclusões

A adição de lastro aumenta a superfície de contato dos pneus dianteiros em aproximadamente em 16%, para ambas as pressões internas; e nos pneus traseiros o lastro não modifica a superfície de contato. A diminuição da pressão dos pneus aumentou em 33% a superfície de contato nos pneus dianteiros e em 26% nos pneus do rodado traseiro.

Em solo seco os maiores forças na BT foram obtidos com baixa velocidade de deslocamento, baixa pressão interna dos pneus e com trator lastrado operando em solo firme. O menor consumo específico foi obtido em solo firme, com trator sem lastro, baixa pressão nos pneus e operando em marcha alta. O acréscimo de umidade no solo diminuiu o coeficiente dinâmico de tração de 0,57 para 0,31 e a eficiência de tração de 50 para 37%.

A utilização de baixa pressão interna nos pneus tem efeitos positivos na trafegabilidade em solos alagados, reduzindo significativamente o patinamento e aumentando a velocidade de deslocamento. Por outro lado, a utilização de lastro no trator em condições de solo saturado tem pouco efeito prático e aumenta o consumo global de combustível na operação, uma vez que demanda maior potência e requer velocidade de deslocamento inferior à condição sem lastro.

A tração dianteira auxiliar foi determinante para o sucesso da mobilidade do conjunto trator e reboque sobre solo alagado, especialmente quando os pneus estavam com a máxima pressão interna. Contudo, nos demais tratamentos, o uso da TDA propiciou redução do índice de patinamento em aproximadamente 50%.

A pressão de contato que os pneus do trator exercem sobre o solo (dianteiros, entre 50 e 100 kPa; traseiros, entre 100 e 150 kPa) e a resistência à penetração do solo determinam diretamente o recalque do rodado. Porém, é o índice de cone em profundidade que equilibra a flutuação e determina, indiretamente, a capacidade de tração do trator.

4. CONCLUSÃO GERAL

Embora os veículos objetos deste estudo tenham sido projetados e fabricados pela indústria brasileira ainda na década de 70, o EB reconhece que não houve estudos prévios de trafegabilidade referentes ao Cascavel e Urutu. Mesmo após mais de 30 anos em plena utilização e com uma sobrevida estimada em pelo menos 10 anos, havia incertezas quanto ao tipo e condições de terreno em que os referidos veículos poderiam trafegar sem imobilização. Com o estabelecimento do parâmetro de Índice de Cone do Solo mínimo necessário para o veículo, estas incertezas diminuem, dando maior confiabilidade para as operações militares que se utilizam de carros blindados de roda. Com o andamento do desenvolvimento de uma nova família de blindados de roda para o EB, que ainda está na fase de protótipo, os estudos realizados poderão servir de parâmetro ao novo projeto no quesito de trafegabilidade em solos úmidos, agregando novas informações para o dimensionamento de rodados e escolha de pneus mais adequados.

Para utilização prática dos resultados obtidos neste trabalho torna-se indispensável a aquisição e a utilização do penetrômetro de cone por parte do EB, como ferramenta de sondagem de solo e tomada de decisão para as unidades militares mantedoras de veículos blindados sobre rodas, garantido o sucesso da mobilidade em operações sobre terrenos desconhecidos, especialmente sobre solos úmidos, alagados ou pantanosos.

Buscando melhorar o desempenho da trafegabilidade dos referidos veículos blindados de rodas, recomenda-se a utilização de pneus do tipo *off-road* que proporcionem maior superfície de contato com o solo, a exemplo dos 12.50R20, 14.00R20 ou 385/R20, fabricados pela Michelin e Goodyear para veículos militares. Especificamente no veículo Urutu, por não apresentar avanço cinemático do eixo da tração auxiliar em relação aos eixos trucados, recomenda-se a utilização de pneus dianteiros diferenciados, com raio cinemático maior, a fim de compensar o atraso verificado. A referida correção também pode ser conseguida com a utilização de pneus dianteiros com menor nível de desgaste ou então utilizando-se pressões internas maiores, o que provocariam menor deflexão dos pneus e, conseqüentemente, maior circunferência de rolamento.

Os estudos envolvendo trator agrícola em operação de tração e transporte reforçam a importância da adoção de técnicas que, se observadas, irão proporcionar aos agricultores um ganho em eficiência na utilização de suas máquinas. Foi comprovado que a pressão interna dos pneus e a quantidade de lastro utilizada no trator interferem no desempenho das operações, na capacidade de tração, no consumo horário e específico de combustível, no índice de patinamento e na forma de trafegar sobre solos com baixa capacidade de suporte de carga, a exemplo dos solos encharcados. Cabe ressaltar que a alteração da pressão dos pneus de tratores e o ajuste correto de lastro para melhor se adequar ao tipo de operação podem estar ao alcance de todos os usuários e não impõem custos adicionais.

Por fim, baseado nos resultados obtidos, sugere-se aos agricultores que as operações de preparo do solo sejam realizadas sob solo na faixa de umidade correspondente ao seu estado friável; ainda, optar pela utilização de tratores com tração dianteira auxiliar, porque melhora o coeficiente dinâmico de tração, proporcionando maior eficiência tratorial; adotar correta distribuição de lastros sobre os eixos do trator (para tratores com TDA, 60% do peso sobre o eixo traseiro e 40% no dianteiro) para propiciar melhor aderência dos rodados motrizes; utilizar pneumáticos que ofereçam maior superfície de contato com o solo, melhorando a condição de flutuação do trator e adotar baixa pressão interna nos pneus. Para situações de transporte sob solos alagados, se o agricultor vem utilizando lastros metálicos e água nos pneus e considerando a facilidade de manuseio, recomenda-se remover apenas os lastros metálicos, aliviando parcialmente a demanda de potência, diminuindo resistência ao rolamento e garantindo peso aderente suficiente caso necessite de maior demanda de tração.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de testes similares para a Nova Família de Blindados de Rodas, do tipo 6x6 e 8x8, que estão sendo desenvolvidos pelo EB, em parceria com a Iveco. O EB já mostrou interesse para que o protótipo seja testado em 2010, na unidade em Santa Maria.

Caso novos estudos ocorram, sugere-se que os ensaios de trafegabilidade sejam realizados sobre pistas edafométricas, construídas com solo e dotado de um sistema de irrigação da pista, permitindo variar e controlar o índice de cone do solo. Sugere-se também testar e avaliar outros tipos e tamanho de pneus e estudar a possibilidade de duplagem das rodas, tanto para veículos militares como agrícolas.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUÑA, R. R. D.; MANTOVANI, E. C.; MARTYN, P. J.; BERTAUX, S. Comparação do coeficiente de tração e da eficiência tratorária de um trator agrícola obtidos pela equação de Wismer e Luth e por ensaios de campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 4, p. 523- 530, 1995.

AHLVIN, RICHARD B.; HALEY, PETER W. **NATO Reference Mobility Model Edition II**, NRMM II User's Guide. Technical Report GL-92-19, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg (Mississippi). 1992.

AL-HAMED, S.A.; GRISSO, R.D.; ZOZ, F.M.; VON BARGEN, K. **Tractor performance spreadsheet for radial tires**. St. Joseph: ASAE. 1990 (ASAE Paper, 901576), 27p.

ASAE D 497.4 FEB03. **Agricultural Machinery Management Data**. In: ASAE Standards: standards engineering practices data. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, p. 373-380. 2003.

ASAE EP 496.2 FEB03. **Agricultural Machinery Management**. In: ASAE Standards: standards engineering practices data. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, p. 366-372. 2003.

ASAE S296.4 **General terminology for traction of agricultural tractors, self-propelled implements, and traction and transport devices**. In: ASAE Standards: standards engineering practices data. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, p.116. 1996.

ASAE. S296.4. **Uniform terminology for traction of agricultural tractors, self-propelled implements, and other traction and transport devices**. In: ASAE Standards: standards engineering practices data. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, p. 119-21. 1999.

ASAE. **S313.2: Soil cone penetrometer**. In: ASAE Standards. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers. 1997. 2p.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. 3. ed. Piracicaba, SP: Luiz Antonio Balastreire, 2007.

BEKKER, M. G. **Theory of land locomotion**. Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan Press, 1956.

BERNARDES, R. C.; BALASTREIRE, L. A. Determinação das curvas de iso-consumo de combustível com trator operando sobre solo agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28., 1999, Pelotas. **Anais...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1999. 1 CD-Rom.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV. 2006.

BOSCH, R. **Automotive Handbook**. 2. ed. Stuttgart: GMBH, 1986.

BRASIL. Exército. Estado-Maior. Portaria N° 149, de 19 de dezembro de 2001. **Manual de Campanha C 5-38 – ESTRADAS**. 1. ed., Brasília, DF, 2001.

BRASIL. **IP 30-1, A Atividade de Inteligência Militar**. Instruções Provisórias do Ministério da Defesa Brasília, DF: Exército Brasileiro, 1. ed., 1999.

BRIXIUS, W. W. **Traction prediction equation for bias ply tires**. St. Joseph, Michigan: ASAE. 1987 (ASAE Paper, 83-1067).

CARVALHO, M. J. F. **Avaliação da conformidade de veículos terrestres**. 2004. 168 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

CARVALHO, M. P. L. A avaliação da trafegabilidade no estudo do terreno: um óbice na atualidade. **Revista Liderança Militar**, Rio de Janeiro, v.2, n.1, p. 5-9, 1. sem. 2005.

CEPIK, C. T. C.; TREIN, C. R.; LEVIEN, R.; HERZOG, R. L. S. Patinagem do trator e força de tração de haste sulcadora de semeadora-adubadora de precisão em função de teores de água no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2001, Salvador. **Anais...** Piracicaba: SBEA, 2001. 1 CD-Rom.

COLLINS, J. G. **Forecasting Trafficability of Soils**. Technical Memorandum 3-331. U. S. Army Corps of Engineers. Waterways Experiment Station. Vicksburg (Mississippi). 1971.

CORDEIRO, M. A. L. **Desempenho de um trator agrícola em função do pneu, da lastragem e da velocidade de deslocamento**. 2000. 153f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2000.

CORREA, I. M. Conheça o pneu agrícola que você usa. **Revista UNESP Rural**, Jaboticabal, v. 18, p. 21, 1999.

CORREA, I. M.; LANÇAS, K. P.; MAZIEIRO, J. V. G.; YANAI, K. Desempenho operacional de trator 4x2 (aux.) com pneus radiais de baixa pressão e diagonais com a tração dianteira desligada. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA AGRÍCOLA, 10., 2000, Guanajuato, México. **Anales...** Guanajuato: ALIA, 2000. 1 CD-Rom.

CORREA, I. M.; YANAI, K.; MAZIEIRO, J. V. G.; MOLINA JUNIOR, W. F. Desempenho de tração em campo de um trator equipado com pneu radial de baixa pressão e pneu diagonal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997. Campina Grande. **Anais...** Piracicaba: SBEA, 1997. 1 CD-Rom.

CORREA, I. M.; YANAI, K.; MAZIERO, J. V. G.; LANÇAS, K. P. Determinação da circunferência de rolamento de pneus agrícolas utilizando dois métodos: manual e eletrônico. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p.179-184, 1999.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

EXÉRCITO BRASILEIRO. **Viatura Blindada de Transporte de Pessoal URUTU**. 2004a. Disponível em <http://extranet.md.eb.mil.br/data/yb/jaa/jaa2004/jaa_0263.htm> Acesso em outubro de 2006.

EXÉRCITO BRASILEIRO. **Viatura Blindada de Reconhecimento CASCAVEL**. 2004b. Disponível em <http://extranet.md.eb.mil.br/data/yb/jaa/jaa2004/jaa_0108#img> Acesso em outubro de 2006.

FERREIRA, M. F.; SCHLOSSER, J. F.; NEUJAHN, E. B. Influência da pressão interna em pneus diagonais na força de tração de um trator 4x2 em duas condições de superfície. **Rev. Bras. de Agrociência**, Pelotas, v. 6, n. 1, p. 66-70. Jan-abr 2000a.

FERREIRA, M. F.; SCHLOSSER, J. F.; NEUJAHN, E. B. Patinamento de pneus diagonais de um trator 4x2, em função da variação da pressão interna e carga na barra de tração **Rev. Bras. de Agrociência**, Pelotas, v. 6, n. 3, p. 254-257. set-dez 2000b.

FRANCISCO, G. M. **Proposta de validação de um modelo para a avaliação da trafegabilidade dos solos inserida no estudo de situação de inteligência**. 2004. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Militares) – Escola de Comando e Estado-Maior do Exército. Rio de Janeiro, 2004.

GABRIEL FILHO, A.; 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, set/dez. 2004.

GENTA, G. **Motor Vehicle Dynamics: modeling and simulation**, London: World Scientific Publishing, 1997.

GILL, W. R.; VANDEN BERG, V. **Soil dynamics in tillage and traction**. Washington: United States Department of Agriculture, 1968.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. 6. ed. Society of Automotive Engineers, Inc., 1992.

GU, Y.; KUSHWARA, R. L. Dynamic load distribution and tractive performance of a model tractor. **Journal of Terramechanics**, v. 31, n. 1, p. 21-39, 1994.

HALEY, P.W.; JURKAT, M. P.; BRADY Jr.; PETER M. **NATO Reference Mobility Model - NRMM**. Vicksburg: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1979.

HERZOG, R. L. S.; LEVIEN, R.; BEUTLER, J. F.; TREIN, C. R. Patinagem das rodas do trator em função da profundidade do sulcador e doses de resíduos sobre o solo na semeadura da soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002. Salvador. **Anais...** Piracicaba: SBEA, 2002. 1 CD-Rom.

HETHERINGTON, J. C. The applicability of the MMP concept in specifying off-road mobility for wheeled and tracked vehicles. **Journal of Terramechanics**, n.38, p.63-70. 2001

IMKO. **TRIME – DataPilot Manual**. Ettlingen, Germany: IMKO Micromodultechnik GmbH, 2006.

INNS, F. M.; KILGOUR, J. **Agricultural tyres**. London: Dunlop Limited, 1978. 70p.

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

JENANE, C.; BASHFORD, L. L.; MONROE, G. Reduction of fuel consumption through improved tractive performance. **Journal of Agricultural Engineering Research**. Silsoe, v. 64, p. 131-138, 1996.

KLAMT, E. et al. **Solos de várzea no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS. 1985.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 18, n. 2, p. 45-54, 1998.

KNIGHT; MEYER. **Soil trafficability classification scheme**. In: International Conference Mech. Soil Vehicle Systems Proc. 1., Turín, 1961. p. 567-574.

LANÇAS, K. P.; UPADHYAYA, S. K. **Pneus radiais para tratores. Guia para a seleção correta da pressão de inflação**. Botucatu: UNESP, 1997. 33p. Boletim Técnico nº 1.

LARMINE, J. C. Modifications to the mean maximum pressure system. **Journal of Terramechanics**, v. 29, n. 2, p. 239-255, 1992.

LARMINE, J. C. Standards for the mobility requirements of military vehicles. **Journal of Terramechanics**, v. 25, n. 3, 1988.

LEE, D. R.; KIM, K. U. Effect of inflation pressure on tractive performance of bias-ply tires. **Journal of Terramechanics**, v. 34, n. 3, p. 187-208, 1997.

LINARES, P. **Análisis de la movilidad de vehículos militares em caminos de características desconocidas**. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid, 1995.

LINARES, P. **Teoría de la tracción de tractores agrícolas**. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos da Universidad Politécnica de Madrid, 1996. 157 p.

LINARES, P.; JEVENOIS, J. **El tractor y el terreno, una armonía difícil**. 1^{er} Premio Eladio Aranda. Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Centro, Aragón y Canarias. Madrid: Editorial Agrícola Española S.A. 1992.

LONGO, M. A. Trafegabilidade de blindados. **Ação de Choque**: revista do Centro de Instrução de Blindados, Santa Maria, n. 7, p. 18-22, 2008.

LOPES, A. et al. Consumo de combustível de um trator agrícola em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho em condição de preparo do solo com escarificador. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002. Salvador. **Anais...** Piracicaba: SBEA, 2002. 1 CD-Rom.

LUCAS, G. G. **Road Vehicle Performance**: methods of measurement and calculation. 2. ed. Gordon and Breach Science Publishers, 1994. (Transportation Studies vii).

MACHADO, A. L. T. et al. Eficiência da tração dianteira auxiliar em um trator 4x4 TDA em duas condições de solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005. Canoas. **Anais...** Piracicaba: SBEA, 2005. 1 CD-Rom.

MACHADO, R. L. T. **Capacidade de suporte de um Argissolo sob plantio direto a partir da resistência à penetração e teor de água no solo**. 2008. 93f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2008.

MACLAURIN, B. Comparing the NRMM (VCI), MMP and VCLI traction models. **Jornal of Terramechanics**, v.44, n.1, p. 43-51. 2007.

MIALHE, L. G. **Máquinas Agrícolas: Ensaio e certificação**. Piracicaba, SP: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996.

MIALHE, L. G. **Máquinas Motoras na Agricultura**. São Paulo: Ed. USP, v.2, 1980. 366 p.

NAGAOKA, A. K. et al. Avaliação do consumo de combustível, patinagem e capacidade de campo operacional na operação de semeadura da cultura de aveia preta (*Avena strigosa*) em três sistemas de manejo do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002. Salvador. **Anais...** Piracicaba: SBEA, 2002. 1 CD-Rom.

NEUJAHR, E. B. **Comportamento em tração e flutuação de pneus agrícolas radiais e diagonais**. 1999. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 1999.

NEUJAHR, 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, mai. 2001.

OLIVEIRA, I. C. S. **O uso da análise espacial no processo de integração terreno, condições meteorológicas e inimigo (PITCI) do Exército Brasileiro.** 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2006.

OTAN. **Global Security, Chapter 7: Soils Trafficability.** Disponível em <<http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-430-00-1/CH7.htm>> Acesso em dezembro de 2006.

PINHEIRO, D. P.; SILVA, J. C. da; ALBERTO, C. M.; COSTA, J. A. Programa para determinação da área foliar e da cobertura do solo através de processamento de imagens digitais. In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA, 19., 2003. Itajaí, SC. **Anais...** Itajaí: Universidade do Vale do Itajaí, 2003. 1 CD-Rom.

PRADO JR., C. **Mecânica da Locomoção de Veículos Rodoviários.** Cascavel, PR: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2002. Curso de Engenharia Civil, Disciplina de Transportes.

PRIDDY, J. D. **Stochastic vehicle mobility forecasts using NRMM.** Report 3 – Database development for statistical analysis of the NRMM II cross country traction empirical relationships. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg. Tech report GL-95-8. 1995.

PRIDDY, J. D.; WILLOUGHBY, W. E. Clarification of vehicle cone index with reference to mean maximum pressure. **Journal of Terramechanics**, v. 43, n. 2, p. 85-96. 2006.

PYTKA, J.; DABROWSKI, J.; ZAJAC, M.; TARKOWSKI, P. Effects of reduced pressure and vehicle loading on off-road traction on soil stress and deformation state. **Journal of Terramechanics**. v. 13, n. 4, p. 469-485. 2006.

REIS, A. V. dos; MACHADO, A. L. T.; TILLMANN, C. A. da C.; MORAES, M. L. B. de. **Motores, tratores, combustíveis e lubrificantes.** Pelotas: Editora e Gráfica Universitária – UFPel, 1999.

ROWLAND, D. **Tracked vehicle ground pressure and its effect on soft ground performance.** Proceedings of the fourth international conference of the ISTVS, Stockholm; 1972.

RUSSINI, A. **Projeto, construção e teste de instrumentação eletrônica para avaliação do desempenho de tratores agrícolas.** 2009. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009.

SCHWANGHART, H. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. **Journal of Terramechanics**, v. 28, n. 4, p. 309-318, 1991.

SCHLOSSER, J. F. **Dinâmica da tração**. Santa Maria: Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria, 2006. Apresentação de aula da disciplina de Mecanização Agrícola.

SCHLOSSER, J. F. Locomoção em terrenos de baixa capacidade de suporte. In: WORKSHOP SOBRE MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA NA REGIÃO DE CLIMA TEMPERADO, 2., 1996, Pelotas. **Anais...** Pelotas: UFPel/EMBRAPA/UFSM, 1996a.

SCHLOSSER, J. F. **Influence del avance cinemático de las ruedas delanteras motoras en la eficiencia en tración de los tractores agrícolas**. 1996. 286f. Tese (Doutorado em Ingeniería Rural) – Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Madrid, 1996b.

SCHLOSSER, J. F. **Motores e tratores agrícolas**. Santa Maria: Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria, 1997. 76 p. Caderno didático.

SCHLOSSER, J. F.; LINARES, P.; MARQUEZ, L. Influence of the kinematics advance on the traction efficiency of the front wheel assist tractor. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1801-1805, 2004.

SCHREINER, B.G. **Mobility exercise A (MEXA) field test program**. WES, Tech report M-70-11; 1971.

SERRANO, J. M. P. Desempenho de tratores agrícolas em tração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 7, p. 1021-1027, jul. 2007.

SILVA, S. L.; BENEZ, S. H. Construção de um sistema de aquisição de dados para avaliação do desempenho energético de máquinas e equipamentos agrícolas em ensaios de campo. **Energia na agricultura**, Botucatu, v. 12, n. 3, p. 10-18, 1997.

SILVA, S. L.; BENEZ, S. H.; LEVIEN, R.; SIQUEIRA, R. Força de tração obtida com integrador de força e sistema computadorizado, operando um rolo faca. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, Campina Grande. **Anais...** Piracicaba: SBEA, 1997. 1 CD-Rom.

SOWERS, G. F. In: BLANCK, C. A. **Methods of Soil Analysis**. Part 1. ASA and ASTM, Madison, Wisconsin, p. 391-399. 1965. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/fisicadosolo/downloads/Consistencia_3.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2010.

SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P. **Tractor hitching, traction and testing**. In: Engineering principles of agricultural machines. 3. ed. St. Joseph: ASAE, 1996. p.117-145.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222p.

TRANSATLANTIC. **TRIME-FM**: Medidores de umidade do solo - Manual do Software. Rio de Janeiro: Transatlantic, 2007.

UPADHYAYA, S. K.; WULSFON, D. **Review of traction prediction equations**. St. Joseph: **ASAE**. 1990 (ASAE Paper, 90-1573), 23p.

USDA – **Soil Conservation Service**. Soil Survey Investigations Report n.1. Washington, 1972. 63p. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/fisicadosolo/downloads/TexturaPipeta1.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2010.

VIEIRA, A. **Trafegabilidade dos solos: modelagem e aplicações**. Vicksburg: U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1994.

WISMER, R. D.; LUTH, H. J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 1, p. 8-14, 1974.

WITNEY, B. **Choosing and using farm machines**. Harlow: Longman, 1988. 412p.

WONG, J. Y. **Theory of Ground Vehicles**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1978. 330p.

YANAI, K. et al. Desempenho operacional de trator com e sem acionamento da tração dianteira auxiliar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 8, p. 1427-34, 1999.

YANAI, K. **Influência da pressão de inflação e da carga sobre o rodado no desempenho operacional de trator com e sem o acionamento da tração dianteira auxiliar**. 1994. 69f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 1994.

ZOZ, F. M. **Predicting tractor field performance** (updated). St. Joseph: ASAE . 1987 (ASAE Paper No. 871623) 12p.

ZOZ, F. M., R. L. TURNER, L. R. SHELL. Power delivery efficiency: a valid measure of belt and tire tractor performance. **Transactions of the ASAE**, v. 45, p. 509-518. 2002.

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

APÊNDICES

Apêndice 1 - Configuração do GPS Trimble modelo AgGPS EZ-Guide SL

Idioma de tela: português

Sistema de unidades: métrico

Porta A (comunica Trimble c/ PC): Input TextA 38400; Output NMEA 38400; Bin 8N1

Tipo de mensagens de saída NMEA: habilitado somente VTG (velocity true ground)

Frequência de saída de mensagens: NMEA out 01 segundo

A saída de dados solicitados (VTG) é fornecida na forma de uma *string* e sua estrutura é exemplificada a seguir, em que a “vírgula” divide as informações em oito campos (TRIMBLE, 2004b):

\$GPVTG, 261.4, T, , , 03.65, N, 06.76, K .

1 2 3 4 5 6 7 8

1. Azimute do deslocamento, em graus;
2. Texto “T” azimute relativo ao norte verdadeiro (true north);
3. Não é usado;
4. Não é usado;
5. Valor da velocidade em nós;
6. Texto “N” indica que a velocidade está expressa em nós (knots);
7. Valor da velocidade em quilômetros por hora;
8. Texto “K” indica que a velocidade está expressa em km/h.

De acordo com o fabricante, a velocidade não sofre variações significativas durante um intervalo menor que um segundo, por isso, o receptor fornece uma taxa máxima de saída de dados NMEA em 1 Hz.

Apêndice 2 - Rotina do programa para aquisição de dados com o *datalogger*.

'CR1000 - Programa para medida de patinamento dos veículos militares

'Declaração de Variáveis e Unidades

Public Tensao_Bat

Public PerAvg(2)

Public in_bytes_str(2) AS String * 80

Units Tensao_Bat=Volts

Units PerAvg=Hz

Dim nibr_bytes_rtrnd

'Definição da tabela de armazenamento

DataTable(Table1,True,-1)

 DataInterval(0,1,Sec,10)

 Sample(1,PerAvg(1),FP2)

 FieldNames("Roda1")

 Sample(1,PerAvg(2),FP2)

 FieldNames("Roda2")

 Sample(1,in_bytes_str(2),String)

 FieldNames("Trimble")

EndTable

'Programa principal

BeginProg

 'Inicializa as portas seriais do Datalogger:

 SerialOpen (Com2,38400,0,0,600)

 Scan(1,Sec,1,0)

 'Medida da Tensão da Bateria do Datalogger:

 Battery(Tensao_Bat)

 'Medida do período dos pulsos dos sensores:

 PeriodAvg(PerAvg(1),2,mV250,5,50,1,1,450,1.0,0.0)

 'Recebe os dados do GPS:

 SerialInRecord(Com2,in_bytes_str(2),&h24,0,&h0A,nibr_bytes_rtrnd,01)

 'Chama a tabela para armazenamento de dados

 CallTable(Table1)

 NextScan

EndProg

Apêndice 3 - Valores da resistência à penetração do solo, em kPa, medidos na área do NEMA/UFSM e do 1º RCC/CIBLD para diferentes condições de trafegabilidade do veículo Urutu.

Profundidade (mm)	Valores referente à Figura 18			
	A	B	C	D
10	59	9	17	71
20	94	61	98	70
30	141	198	282	244
40	150	306	387	322
50	123	508	408	373
60	68	538	417	375
70	68	607	618	376
80	75	696	661	431
90	82	714	673	508
100	103	714	745	572
110	117	700	753	642
120	107	669	760	715
130	108	621	723	784
140	114	616	714	819
150	127	610	703	900
160	150	588	682	1245
170	195	569	705	1506
180	252	514	772	1569
190	286	470	787	1603
200	283	458	791	1607
210	260	439	809	1586
220	280	439	850	1562
230	299	418	885	1540
240	376	399	893	1366
250	489	402	913	1321
260	524	384	901	1191
270	559	393	875	1063
280	542	408	864	1025
290	552	430	868	977
300	550	436	856	882
310	559	436	817	857
320	556	439	776	864
330	578	492	769	1014
340	560	504	787	1054
350	585	523	842	1178
360	582	563	861	1219
370	567	557	898	1264
380	539	532	1144	1353
390	512	548	1500	1507
400	519	538	1700	1547
0 a 200	135	508	585	737
200 a 400	499	464	940	1219
230 a 380	526	457	872	1136
0 a 400	317	486	763	978
Desvio padrão	204	153	296	465

Valores referente à Figura 19			
A	B	C	D
27	38	53	47
68	108	106	121
71	190	212	186
83	249	406	268
93	268	480	307
108	271	526	345
116	423	772	384
108	512	844	403
106	574	891	421
113	563	966	439
117	553	1006	408
113	570	1067	407
108	539	1180	421
125	539	1243	425
162	590	1263	422
169	641	1273	400
186	620	1280	402
204	581	1296	378
221	563	1311	359
240	568	1283	369
243	551	1253	367
251	511	1211	377
251	488	1177	412
254	480	1095	431
268	474	1037	428
278	460	1011	434
299	444	966	461
322	434	849	508
347	441	806	544
350	432	765	569
351	419	727	590
356	423	706	611
367	438	671	626
387	441	669	641
393	415	635	654
396	384	619	674
390	371	619	698
410	348	607	706
438	328	653	705
467	337	754	700
127	508	873	346
341	464	841	557
339	431	810	562
234	486	857	451
124	137	337	156

Apêndice 4 - Valores da resistência à penetração do solo, em kPa, medidos na área do NEMA/UFMS e do 1º RCC/CIBLD para diferentes condições de trafegabilidade do veículo Cascavel.

Profundidade (mm)	Valores referente à Figura 20			
	A	B	C	D
10	0	66	0	175
20	1	95	0	252
30	3	108	0	389
40	11	149	0	446
50	20	192	0	482
60	21	222	0	480
70	17	271	0	466
80	10	287	0	460
90	6	293	0	439
100	6	277	0	427
110	5	266	0	463
120	10	265	0	531
130	23	324	0	663
140	71	392	0	684
150	121	532	0	694
160	327	544	0	712
170	387	537	0	667
180	478	527	0	620
190	490	486	0	610
200	547	488	0	610
210	586	480	25	607
220	618	504	37	618
230	634	524	72	638
240	629	553	147	671
250	622	560	255	692
260	616	546	277	721
270	613	557	322	745
280	593	546	343	759
290	558	533	334	762
300	548	482	336	750
310	544	436	351	671
320	522	414	351	632
330	475	391	347	629
340	476	333	311	618
350	475	307	297	577
360	476	312	254	530
370	490	324	241	528
380	527	355	261	519
390	554	382	269	505
400	561	415	314	514
0 a 200	128	316	0	513
200 a 400	556	448	257	634
230 a 380	550	448	281	652
0 a 400	342	382	129	574
Desvio padrão	259	144	149	133

Valores referente à Figura 21			
A	B	C	D
16	0	0	0
85	0	0	41
319	14	15	111
593	29	15	244
762	77	97	335
770	94	107	409
786	118	128	441
780	152	138	469
772	193	77	609
704	216	97	707
606	235	86	763
603	267	128	867
585	378	147	942
557	458	127	975
546	509	116	1000
532	525	144	1018
525	487	187	1029
492	465	245	1029
451	386	285	1048
449	330	328	1114
392	296	327	1182
368	327	322	1238
275	321	303	1262
260	332	308	1336
248	340	345	1369
229	333	348	1372
240	304	356	1384
236	304	354	1393
234	301	365	1400
232	312	400	1408
225	312	409	1420
203	309	421	1406
175	322	446	1411
157	330	463	1426
151	330	469	1438
128	330	484	1423
112	332	475	1414
110	338	495	1408
114	335	475	1404
116	331	485	1408
547	247	123	658
210	322	402	1375
201	322	402	1392
378	284	263	1016
233	135	161	450

Apêndice 5 - Planilha de cálculo do Índice de Cone Veicular pelo modelo NRMM-II

a) ICV referente ao veículo Urutu.

DADOS DE ENTRADA		calculos de unidades		
veiculo:	URUTU			
peso bruto:	11200 kg	24691.74 lb	24.69174 KIPS	11.2 TON
numero de rodas:	6 rodas			
numero de eixos:	3 eixos			
vão livre :	370 mm	14.5669 pol		
potencia:	145 Kw	194.4482 HP		
transmissão:	automática			
pneus:				
pressão:	20 psi			
larg. nominal pneu:	240 mm	9.4488 pol		
ø externo pneu:	1086 mm	42.75582 pol		
CALCULOS:		calculos adicionais		
fator pressão do pneu:	20.37317 lb/pol ²	fator motor:	17.36145 HP/TON	
fator peso:	1.321609 lb	escala de peso:	8230.581 lb/eixo	
fator pneu:	0.194488 pol	usando a deflexão		
fator garra:	1.00	deflexão (δ)	66.00 mm	2.598 pol
fator altura:	1.45669 pol	perfil (h)	276 mm	10.866 pol
fator carga:	4.115291 pol			
fator motor:	1.00			
fator transmissão:	1.00			
IM:	141.10 PSI			
ICV₁:	33.18 228.75 kPa			
Ahlvin e Haley (1992)				
ICV₅₀:	79.94 551.19 kPa			
Haley et al. (1979)				

b) ICV referente ao veículo Cascavel.

DADOS DE ENTRADA		calculos de unidades		
veiculo:	CASCADEL			
peso bruto:	12265 kg	27039.66 lb	27.03966 KIPS	12.265 TON
numero de rodas:	6 rodas			
numero de eixos:	3 eixos			
vão livre :	376 mm	14.80312 pol		
potencia:	128 Kw	171.6508 HP		
transmissão:	automática			
pneus:				
pressão:	20 psi			
larg. nominal pneu:	240 mm	9.4488 pol		
ø externo pneu:	1033.33 mm	40.6822 pol		
CALCULOS:		calculos adicionais		
fator pressão do pneu:	23.44763 lb/pol ²	fator motor:	13.99517 HP/TON	
fator peso:	1.347436 lb	escala de peso:	9013.221 lb/eixo	
fator pneu:	0.194488 pol	usando a deflexão		
fator garra:	1.00	deflexão (δ)	80.00 mm	3.150 pol
fator altura:	1.480312 pol	perfil (h)	256.66 mm	10.105 pol
fator carga:	4.506611 pol			
fator motor:	1.00			
fator transmissão:	1.00			
IM:	165.47 PSI			
ICV₁:	33.34 229.85 kPa			
Ahlvin e Haley (1992)				
ICV₅₀:	90.42 623.451 kPa			
Haley et al. (1979)				

Apêndice 6 - Rotina para aquisição de dados de tração com *datalogger*.

'Programa para medida de força de tração, patinamento e consumo de combustível do trator

'Declaração de Variáveis e Unidades

```
Public Tensao_Bat
Public FBr6W
Public Pulsos_Flux
Public PerAvg(4)
Public Forca
Public Consumo
Public in_bytes_str(2) AS String * 80
```

```
Units Tensao_Bat=Volts
Units FBr6W=mV
Units Pulsos_Flux=Counts
Units PerAvg=Hz
Units Forca=Kgf
Units Consumo=L/h
```

'Definição da tabela de armazenamento

```
DataTable(Table1,True,-1)
    DataInterval(0,1,Sec,10)
    Sample(1,Tensao_Bat,FP2)
    FieldNames("Bateria")
    Sample(1,FBr6W,FP2)
    FieldNames("Cel.Carga")
    Average(1,Forca,FP2,False)
    FieldNames("Força")
    Sample(1,Pulsos_Flux,FP2)
    FieldNames("Pulsos Flux.")
    Sample(1,Consumo,FP2)
    FieldNames("Consumo")
    Sample(1,PerAvg(1),FP2)
    FieldNames("Roda1")
    Sample(1,PerAvg(2),FP2)
    FieldNames("Roda2")
    Sample(1,PerAvg(3),FP2)
    FieldNames("Roda3")
    Sample(1,PerAvg(4),FP2)
    FieldNames("Roda4")
    Sample(1,in_bytes_str(2),String)
    FieldNames("Trimble")
```

EndTable

'Programa principal

BeginProg

```
'Inicializa as portas seriais do Datalogger:
SerialOpen (Com2,38400,0,0,600)
```

```
Scan(1,Sec,1,0)
```

```
'Medida da Tensão da Bateria do Datalogger:
Battery(Tensao_Bat)
```

```
'Medida a 6 fios de Célula de carga Full Bridge:
BrFull6W(FBr6W,1,mV5000,mV7_5,1,1,1,2500,True,True,0,250,4.8,-0.05)
Forca = (1000 * FBr6W)/2.103 * 1.0418 * 2.167 - 450.6
```

'Medida de pulso do fluxômetro:

PulseCount(Pulsos_Flux,1,1,0,0,1.0,0.0)

Consumo = Pulsos_Flux * 3.6

'Medida do período dos pulsos dos sensores:

PeriodAvg(PerAvg(1),4,mV250,5,50,1,1,240,1.0,0.0)

'Recebe os dados do GPS:

SerialInRecord (Com2,in_bytes_str(2),&h24,0,&h0A,nmbr_bytes_rtrnd,01)

'Chama a tabela para armazenamento de dados

CallTable(Table1)

NextScan

EndProg

Apêndice 7 - Valores da resistência à penetração do solo, medidos em kPa, referente aos experimentos de tração e trafegabilidade com trator.

Profundidade (mm)	Solo NEMA/UFMS - Exp. de tração			
	Valores referente à Figura 40			
	A	B	C	D
0	0	0	0	0
10	51	39	0	6
20	193	176	4	13
30	305	295	23	17
40	463	394	27	15
50	538	443	33	13
60	581	541	37	10
70	601	573	67	4
80	553	593	82	4
90	608	761	82	6
100	751	808	85	17
110	866	968	112	30
120	939	1037	119	55
130	1229	1152	220	158
140	1736	1384	372	251
150	2272	1507	576	389
160	2370	1514	827	519
170	2674	1588	1059	595
180	2781	1723	1414	700
190	2418	1941	1781	789
200	2412	2101	1973	950
210	2246	2097	2008	1041
220	2151	2161	1945	1141
230	2060	2121	1888	1126
240	1976	2100	1893	1125
250	1834	2070	2021	1094
260	1790	2025	2051	1100
270	1831	2052	2099	1125
280	1833	1998	2083	1174
290	1903	1883	2114	1259
300	2028	1757	2074	1276
310	2081	1675	1995	1262
320	2180	1683	1892	1195
330	2172	1581	1821	1133
340	2229	1460	1740	1117
350	2183	1342	1666	1187
360	2170	1287	1594	1191
370	2114	1284	1579	1278
380	1923	1308	1536	1281
390	1735	1285	1568	1263
400	1681	1277	1559	1189
0 a 200	1159	930	423	216
200 a 400	2006	1722	1856	1178
0 a 400	1583	1326	1140	697

IFF/SVS - Exp. trafegabilidade		
Valores referente à Figura 43		
Bloco1	Bloco2	Bloco3
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	4	0
0	6	0
0	6	0
2	12	1
3	20	5
8	29	17
11	39	23
23	57	26
43	78	41
51	108	39
86	163	41
111	219	50
169	255	88
194	330	124
238	393	161
317	450	188
569	522	247
709	669	297
1034	790	354
1192	815	360
1324	848	366
1459	1059	431
1482	1090	458
1511	1128	516
1536	1171	605
1563	1259	829
1563	1271	883
1563	1352	1143
1563	1364	1268
-	1335	1316
-	1348	1315
-	1402	1329
-	1405	1340
-	1447	1365
33	63	22
1175	1056	739
604	559	380