

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

**MODELAGEM DO DESEMPENHO EM TRAÇÃO DE**  
**CONJUNTOS MECANIZADOS VISANDO AO**  
**DIMENSIONAMENTO DO TRATOR**

**TESE DE DOUTORADO**

**Paula Machado dos Santos**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

**MODELAGEM DO DESEMPENHO EM TRAÇÃO DE  
CONJUNTOS MECANIZADOS VISANDO AO  
DIMENSIONAMENTO DO TRATOR**

**por**

**Paula Machado dos Santos**

Tese apresentada ao 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. Dr. José Fernando Schlosser**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

S237m Santos, Paula Machado dos

Modelagem do desempenho em tração de conjuntos mecanizados visando ao dimensionamento do trator / Paula Machado dos Santos. – 2010.  
154 f.

Monografia (tese) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2010.

“Orientação: Prof. Dr. José Fernando Schlosser”.

1. Tratores agrícolas - desempenho 2. Modelos matemáticos 3. Predição de tração I. Título

C.D.U.: 631.372

Catálogo na fonte: bibliotecária Sandra Milbrath CRB 10/1278

Dedico à

Deus minha razão de ser e viver

e

à meus amados pais Paulo e Rosângela que através de seu sacrifício me deram a sua principal herança: a oportunidade de estudar.

## AGRADECIMENTOS

É importante salientar que tudo que decorreu ao longo do decorre deste trabalho se deveu à colaboração e à amizade indispensáveis de todos que, de forma direta ou indireta, me apoiaram durante este percurso. Nunca será demais destacá-los e agradecer a todos.

A Deus que me amparou, foi a luz e a certeza de colo de Pai que me tornou mais forte e mais suave as minhas dificuldades.

Ao meu orientador, Dr. Prof. José Fernando Schlosser, pela confiança depositada, apoio, orientação, modelo de profissionalismo e principalmente a amizade construída por esses três anos de companheirismo.

Aos meus pais que primeiro sonharam este sonho e me deram condições para que eu fosse como sou, sendo um pouco do que eles são, trabalhadores, corretos, amorosos, e mesmo quando distantes, me garantiram suporte, confiança e orações. Espero retribuir um pouco com essa conquista.

Ao amigo e companheiro Eric, que sempre manteve-se ao meu lado e aceitou por muitas vezes minha ausência, por ter me levantado nos momentos que a força parecia ter me deixado, sempre segurando na minha mão. Você sempre terá um lugar especial no meu coração.

À minha família querida que sempre me deu muito mais que apoio, pelas valiosas orações.

Aos colegas do NEMA: Gustavo, Ulisses, Alexandre, Claudio, Oni, Marcelino, Pietro, André, Rodrigo, Orli, Marcelo, Paulo, Gismael e Ereno, companheiros incansáveis, por todo auxílio técnico e momentos de superação em grupo.

Aos professores e amigos Lindolfo Storck e Sidinei José Lopes que além de ter me incentivado à pesquisa científica e contribuírem para essa conquista, sempre estiveram presentes com sua amizade e atenção.

Aos funcionários do NEMA, por sua boa vontade em resolver nossos problemas.

Aos secretários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola: Luís e Estevão, sempre prestativos e apoiadores em meu trabalho.

Às minhas colegas profissionais e amigas inseparáveis Aline e Carine, sinônimos de incentivo, amizade e serenidade na minha vida.

À Concessionária Itaimbé Máquinas de Santa Maria pela sua sempre prestativa atenção e socorro às nossas carências materiais do Laboratório.

À Universidade de Passo Fundo pela concessão de infra-estrutura e área indispensável para a realização deste trabalho.

À Capes, pela bolsa e auxílio financeiro concedido para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos que fiz ao longo de minha existência, que por serem tantos é impossível especificar todos, que por meio de palavras e gestos me confortaram e me encorajaram nos momentos mais difíceis e garantiram esta amizade mesmo à distância e que compreenderam minhas ausências e não desistiram de torcer por mim.

E ainda, gostaria de fazer um agradecimento em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, que muito mais de servir de caminho e suporte para minha Tese, apostou em mim, recebendo-me da forma mais acolhedora impossível, dando-me a certeza que em nenhum outro curso eu teria sido tão feliz e realizada profissionalmente e como pessoa.

“Sê humilde se queres adquirir sabedoria; sê mais humilde ainda, quando a tiveres adquirido.”

Helena P Blavatsky

## RESUMO

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

### **MODELAGEM DO DESEMPENHO EM TRACÇÃO DE CONJUNTOS MECANIZADOS VISANDO AO DIMENSIONAMENTO DO TRATOR**

AUTORA: PAULA MACHADO DOS SANTOS  
ORIENTADOR: JOSÉ FERNANDO SCHLOSSER  
Santa Maria, 16 de março de 2010

Na busca do conhecimento sobre o desempenho de tratores agrícolas disponíveis no mercado e realizar a seleção adequada dos implementos para cada trator, a pesquisa tem apresentado modelos matemáticos como importante ferramenta na representação do desempenho em tração dos tratores. Mas que, no entanto, pesquisadores brasileiros encontram como principal limitação na aplicação destes modelos matemáticos a utilização de dados característicos de solos e máquinas Norte-Americanas e Européias. Pela necessidade de se obterem valores representativos das condições de solo e máquinas brasileiras, o objetivo deste trabalho foi determinar modelos de demanda de tração para predição do desempenho de tratores em operações que demandam força de tração. Foram utilizados os conjuntos mecanizados trator-semadora-adubadora, trator-grade aradora e trator-escarificador operando em duas texturas de solo, média e argilosa. Buscando-se a representação gráfica de demanda requerida de força de tração, patinagem e consumo de combustível realizou-se a simulação dos diferentes modelos matemáticos pelo auxílio do programa computacional Table Curve 3D v.2.03 (Jandel Scientific) e Table Curve 2Dv.2.03 (Jandel Scientific) capaz de oferecer informações para a predição empírica destes parâmetros. Verificou-se que a velocidade de deslocamento do trator influencia diretamente na demanda em tração de todos os conjuntos mecanizados, diferindo do modelo proposto pela ASAE D 497.2 (1995). A velocidade ao interagir com a massa da grade aradora representa os parâmetros de desempenho em tração através de modelos lineares, assim como, a sua interação com a profundidade de trabalho do escarificador por modelos quadráticos, com bom ajuste, acima de 70%. A semeadora apresentou aumento em demanda de tração com o aumento linear da velocidade do trator. As teorias preditivas  $C_n$ ,  $B_n$  e  $M_n$  apresentam correlação boa com os valores experimentais sob solos característicos brasileiros, correspondendo em média de 70% ao valores medidos experimentalmente. Sendo a Teoria  $M_n$  a mais relacionada ao comportamento de demanda energética e patinagem medidas. Novos parâmetros são necessários para estimativa da força de tração de escarificadores e semeadoras, bem como, a alteração dos coeficientes para caracterizar estes conjuntos mecanizados. Sendo os modelos para semeadora, grade aradora e escarificador:  $D = F_i.[1474 + (601.S)].W.T$ ;  $D = F_i.[290 + (57.S)].W.T$  e  $D = F_i.[110 + (32.S) + (-2,9.S^2)].W.T$ , respectivamente.

**Palavras-chave:** modelos matemáticos, desempenho, predição de tração



## ABSTRACT

Doctoral Thesis  
Pós-Graduate Program in Agricultural Engineering  
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

### MODELLING OF THE DEMAND OF TRACTION OF MECAHNIZED GROUPS FOR SIZING OF THE TRACTOR

AUTHOR: PAULA MACHADO DOS SANTOS  
ADVISOR: JOSÉ FERNANDO SCHLOSSER  
Santa Maria, March, 16th, 2010

In pursuit of knowledge about the performance of agricultural tractors on the market and make the appropriate selection of attachments for each tractor, the research has presented mathematical models as an important tool in the representation of the traction performance of tractors. But that, however, Brazilian researchers found as the main limitation in applying these mathematical models using data characteristic of soil and machinery North American and European. By the need to obtain representative values of soil conditions and Brazilian machinery, the goal was to determine demand models for prediction of traction performance of tractors in operations that require traction force. Sets were used mechanized tractor-seeding, disc harrow and chisel plow operating on two soil textures, loamy and silty. Seeking for a graphical representation of demand required traction force, slirage and fuel consumption was held to simulate the different mathematical models by the help of computer program Table Curve 3D v.2.03 (Jandel Scientific) and Table Curve 2Dv.2.03 (Jandel Scientific) capable of providing information for the empirical prediction of these parameters. It was found that the forward speed of the tractor directly influences the demand pull of all sets mechanized, differing from the model proposed by ASAE D497.2 (1995). The speed when interacting with the mass of the disk harrow represents the traction performance parameters using linear models, as well as its interaction with the working depth of the chisel plow by quadratic models with good fit, over 70%. The seeding showed an increase in demand of traction with the linear increase of tractor speed. Predictive theories Cn, Bn and Mn have good correlation with experimental values in soils typical Brazilian, corresponding on average 70% for values measured experimentally. Theory being the most Mn related behavior of energy demand and slirage action. New parameters are needed to estimate the traction force of tillers and planters, as well as the change of coefficients to characterize these machinery. As models for seeding, disc harrow and chisel plow:  $D = Fi. [1474 + (601.S)]$ . W.T ,  $D = Fi. [290 + (57.S)]$ . W.T and  $D = Fi. [110 + (32.S) + (-2.9. S^2)]$ . W.T, respectively.

**Key Words:** models mathematical, make, traction of prediction

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros relacionados a características e largura para cada máquina e relacionados à textura do solo (adaptado de ASAE D497.4, 2003). .....	30
Tabela 2 - Parâmetros de força de tração para máquinas e implementos (ASAE D497.4, 2003), segundo as texturas de solo argilosa ( $F_1$ ) e média ( $F_2$ ), os parâmetros da máquina (A, B), a velocidade de deslocamento (S), a largura do implemento (W) e profundidade de trabalho (T). .....	67
Tabela 3 - Valores médios das características físicas do solo limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP) e análise granulométrica. ....	68
Tabela 4 - Valores médios de densidade aparente do solo, umidade do solo e índice de cone. ....	69
Tabela 5 - Valores médios de força de tração (N), obtidas em ensaios de campo ( $F_t$ ) e estimadas pela ASAE 497.4 (2003) (D). ....	85
Tabela 6 - Valores para normalidade do modelo matemático segundo o tipo de implemento e textura do solo para o parâmetro patinagem das rodas motrizes do trator. ....	86
Tabela 7 - Médias de variáveis de desempenho para o conjunto trator-semeadora-adubadora e respectivos coeficiente de correlação entre valores experimentais e valores preditivos pelas teorias de para solo de textura média. ....	108
Tabela 8 - Coeficientes de regressão para determinação da força de tração do conjunto trator-grade-aradora ao trabalhar em solo de textura argilosa e média e respectivos coeficientes de correlação para os parâmetros força de tração, patinagem e coeficiente de força tangencial. ....	115

Tabela 9 - Médias de força de tração do conjunto trator-grade-aradora e análise de correlação (r) entre valores medidos em campo (experimental) e valores estimados pelas teorias de predição Cn, Bn e Mn para solos de textura argilosa e média.....	117
Tabela 10 - Médias de patinagem das rodas motrizes do trator ao tracionar uma grade-aradora e análise de correlação entre valores experimentais e valores preditivos em solos de textura argilosa e média. ....	122
Tabela 11 - Coeficientes de regressão para determinação da força de tração do conjunto trator-escarificador ao trabalhar em solo de textura argilosa e respectivos coeficientes de correlação para os parâmetros força de tração, patinagem e coeficiente de força tangencial.....	132
Tabela 12 - Médias de força de tração requerida pelo escarificador, patinagem e análise de correlação (r) entre valores medidos experimentalmente e valores estimados pelas teorias de predição para solos de textura argilosa.....	135
Tabela 13 - Número característico da roda (Cn), número característico de mobilidade (Bn) e número de mobilidade (Mn) determinados em solos de textura média e argilosa. ....	141
Tabela 14 - Proposta de parâmetros de força de tração para implementos e extraídos e adaptados da ASAE D497.4 – Agricultural Machinery Management Data – Fevereiro de 2003.....	146

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama real da previsão da potência requerida do implemento para o trator (Adaptado de SERRANO, 2002). .....	26
Figura 2 - Rendimento máximo de potência mecânica de um trator com tração simples sobre pista de concreto (ASAE EP496.2, 1999). .....	32
Figura 3 - Representação do trator no triedro de referência ponderodimensional, com os três planos especificados (MIALHE, 1980). .....	43
Figura 4 - Trator de tração simples em condição estática (LINARES, 1996). .....	44
Figura 5 - Trator de tração simples em condição dinâmica, com terreno horizontal e esforço de tração paralelo ao solo (LINARES, 1996). .....	44
Figura 6 - Fluxograma de atividade e metodologias desenvolvidas. ....	61
Figura 7 - Instrumentação de aquisição eletrônica de dados instalada no trator (a), célula de carga (b), fluxômetro (c) e GPS (d). .....	65
Figura 8 - Parcela experimental seguindo o trajeto do conjunto mecanizado (a) e estaca demarcadora de tratamento/parcela (b). .....	71
Figura 9 - Determinação da massa total (a), do eixo dianteiro (b) e do eixo traseiro (c) para dimensionamento da distribuição do peso. ....	73
Figura 10 - Equipamento auxiliar de medição dos parâmetros dos pneus. ....	74
Figura 11 - Força de tração requerida na barra do trator ( $F_t$ ) por uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas, medida em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ), trabalhando em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%. ....	88

Figura 12 - Coeficiente de força tangencial do trator ( $\mu_t$ ) determinado em função da sua velocidade de deslocamento ( $V_r$ ) ao tracionar uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas, trabalhando em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.....	90
Figura 13 - Potência requerida na barra de tração do trator ( $P_r$ ) por uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas determinada em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.....	90
Figura 14 - Consumo de combustível operacional do trator por área trabalhada ( $CC_o$ ) ao tracionar uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas, medido em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.....	91
Figura 15 - Patinagem das rodas motrizes do trator ( $\delta$ ) determinada em função da sua velocidade de deslocamento ( $V_r$ ) ao tracionar uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas, trabalhando em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.....	92
Figura 16 - Eficiência em tração ( $\eta_{bt}$ ) determinada em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) ao tracionar uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas, trabalhando em solo de textura média.....	92
Figura 17 - Diagrama tri-dimensional da força de tração requerida na barra do trator ( $F_t$ ) medida por unidade de disco da grade aradora, em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e massa da grade ( $M$ ), sob solo de textura média.....	93
Figura 18 - Força de tração requerida na barra do trator ( $F_t$ ) medida por unidade de disco da grade aradora em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.....	95
Figura 19 - Patinagem das rodas motrizes do trator ( $\delta$ ) ao tracionar uma grade aradora, composta por 18 discos, determinada em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e massa da grade ( $M$ ), em solo de textura média.....	96
Figura 20 - Patinagem do trator ( $\delta$ ) operando uma grade aradora, composta por 22 discos, determinada em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.....	97

Figura 21 - Consumo de combustível operacional do trator ( $C_{co}$ ) tracionando uma grade aradora, composta por 18 discos, medido em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da massa da grade ( $M$ ) em solo de textura média. ....	98
Figura 22 - Consumo de combustível operacional do trator ( $C_{co}$ ) tracionando uma grade aradora, composta por 22 discos, medido em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.....	99
Figura 23 - Coeficiente de força tangencial do trator ( $\mu_t$ ) ao tracionar uma grade aradora composta por 18 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da massa da grade ( $M$ ) em solo de textura média. ....	100
Figura 24 - Coeficiente de força tangencial do trator ( $\mu_t$ ) ao tracionar uma grade aradora composta por 22 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.....	100
Figura 25 - Eficiência em tração do trator ( $\eta_{bt}$ ) ao tracionar grade aradora, composta por 18 discos, em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da massa da grade ( $M$ ) em solo de textura média. ....	101
Figura 26 - Eficiência em tração ( $\eta_{BT}$ ) operando uma grade aradora, composta por 22 discos, em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa. ....	101
Figura 27 - Diagrama tri-dimensional da força de tração ( $F_t$ ) medida em função da variação da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho ( $p$ ) tracionando um escarificador, composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa. ....	103
Figura 28 - Diagrama tri-dimensional da patinagem do trator ( $\delta$ ) determinada em função da variação da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho de um escarificador ( $p$ ), composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa. ....	104
Figura 29 - Diagrama tri-dimensional do coeficiente de força tangencial de um trator ( $\mu_t$ ) determinado em função da variação da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho de um escarificador ( $p$ ), composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa. ....	104

Figura 30 - Diagrama tri-dimensional da potência requerida na barra de tração medida ( $P_r$ ) em função da variação da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho ( $p$ ) ao tracionar um escarificador composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa. ....	105
Figura 31 - Diagrama tri-dimensional do consumo de combustível de um trator por unidade de área ( $C_{co}$ ) medido em função da variação da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho ao tracionar um escarificador ( $p$ ), composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa. ....	105
Figura 32 - Diagrama tri-dimensional da eficiência em tração de um trator ( $\eta_{bt}$ ) determinado em função da variação da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho ao tracionar um escarificador ( $p$ ), composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa. ....	106
Figura 33 - Diagrama tri-dimensional da força de tração medida na barra ( $\delta_{experimental}$ ) (a) e preditivas ( $\delta_{preditiva}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar uma semeadora-adubadora de cinco linhas em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa.....	109
Figura 34 - Diagrama de dispersão da força de tração medida ( $F_{t_{experimental}}$ ) em função da força de tração preditiva das teorias preditivas ( $F_{t_{preditiva}}$ ) Cn (a), Bn (b) e Mn (c) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-semeadora-adubadora composta por cinco linhas, em solo de textura média.....	110
Figura 35 - Patinagem das rodas motrizes do trator medida ( $\delta_{experimental}$ ) (a) e preditivas ( $\delta_{preditiva}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) de um trator ao tracionar uma semeadora-adubadora de cinco linhas em função da variação de velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%. ....	111
Figura 36 - Diagrama de dispersão da patinagem das rodas motrizes medida ( $\delta_{experimental}$ ) em função da patinagem obtida através da aplicação das Teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\delta_{preditiva}$ ) em valor percentual e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-semeadora-adubadora composta por cinco linhas, em solo de textura média. ....	112

Figura 37 - Coeficiente de força tangencial do trator medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivos ( $\mu_{t_{\text{preditivo}}}$ ) estimados pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) de um trator ao tracionar uma semeadora de cinco linhas em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.....	113
Figura 38 - Diagrama de dispersão do coeficiente de força tangencial medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\mu_{t_{\text{preditivo}}}$ ) em valor decimal e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-semeadora-adubadora composta por cinco linhas, em solo de textura média. ....	114
Figura 39 - Diagrama tri-dimensional da força de tração medida na barra do trator ( $F_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivas ( $F_{t_{\text{preditiva}}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar uma grade aradora composta por 18 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da massa da grade (M) trabalhando em solo de textura média. ....	118
Figura 40 - Diagrama de dispersão da força de tração medida na barra do trator ( $F_{t_{\text{experimental}}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $F_{t_{\text{preditiva}}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradora composta por 18 discos, em solo de textura média. ....	119
Figura 41 - Força de tração medida na barra do trator ( $F_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivas ( $F_{t_{\text{preditiva}}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar uma grade aradora composta por 22 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.....	120
Figura 42 - Diagrama de dispersão da força de tração medida ( $F_{t_{\text{experimental}}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $F_{t_{\text{preditiva}}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradora composta por 22 discos, em solo de textura argilosa. ....	121
Figura 43 - Diagrama tri-dimensional da patinação das rodas motrizes do trator medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) (a) e preditivas ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar uma grade aradora composta por 18 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da massa da grade (M) em solo de textura média. ....	123



Figura 44 - Diagrama de dispersão da patinagem das rodas motrizes do trator medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) em função da predita através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradora composta por 18 discos, em solo de textura média. ....	124
Figura 45 - Patinagem das rodas motrizes do trator medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) (a) e preditivas ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar uma grade aradora composta por 22 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%. ....	126
Figura 46 - Diagrama de dispersão da patinagem medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) em função da predita através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradora composta por 22 discos, em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%. ....	127
Figura 47 - Diagrama tri-dimensional do coeficiente de força tangencial medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivos ( $\mu_{t_{\text{preditivo}}}$ ) estimados pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) de uma grade aradora composta por 18 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da massa da grade (M) trabalhando em solo de textura média. ....	128
Figura 48 - Diagrama de dispersão do coeficiente de força tangencial medido experimentalmente ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\mu_{t_{\text{preditiva}}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradora composta por 18 discos, em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%. ....	129
Figura 49 - Coeficiente de força tangencial do trator medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivos ( $\mu_{t_{\text{preditivo}}}$ ) estimados pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) de um trator ao tracionar uma grade aradora composta por 22 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%. ....	130
Figura 50 - Diagrama de dispersão do coeficiente de força tangencial medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\mu_{t_{\text{preditiva}}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradora composta por 22 discos, em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%. ....	131

- Figura 51 - Diagrama tri-dimensional da força de tração pedida ( $F_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivas ( $F_{t_{\text{preditiva}}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) de um conjunto trator-escarificador de cinco hastes em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho do escarificador ( $p$ ) em solo de textura argilosa..... 134
- Figura 52 - Diagrama tri-dimensional da patinagem de um trator medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) (a) e preditivas ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar um escarificador de cinco hastes em função da velocidade de deslocamento ( $S$ ) e da profundidade de trabalho ( $p$ ) em solo de textura argilosa. .... 137
- Figura 53 - Diagrama de dispersão da patinagem medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e MN (c) ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-escarificador com cinco hastes, em solo de textura argilosa. .... 138
- Figura 54 - Diagrama de dispersão do coeficiente de força tangencial medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e MN (c) ( $\mu_{t_{\text{preditiva}}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-escarificador com cinco hastes, em solo de textura argilosa. .... 139
- Figura 55 - Diagrama tri-dimensional do coeficiente de força tangencial de um trator medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivos ( $\mu_{t_{\text{preditivo}}}$ ) estimados pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar um escarificador de cinco hastes em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho do escarificador ( $p$ ) em solo de textura argilosa. .... 140

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
	<b>2.1 Considerações iniciais.....</b>	<b>22</b>
	<b>2.2 Dimensionamento do conjunto mecanizado .....</b>	<b>24</b>
	2.2.1 Grade de discos .....	36
	2.2.2 Escarificador.....	38
	2.2.3 Semeadora-adubadora .....	39
	<b>2.3 Modelagem matemática e estimativa de parâmetros na agricultura.....</b>	<b>40</b>
	2.3.1 Modelagem na determinação do desempenho de tratores.....	42
	2.3.2 Modelos de predição de tração existentes .....	52
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>62</b>
	<b>3.1 Material.....</b>	<b>62</b>
	3.1.1 Conjuntos mecanizados.....	62
	3.1.2 Equipamentos utilizados para a instalação do experimento.....	63
	3.1.3 Parâmetros para modelagem do rendimento experimental dos conjuntos mecanizados .....	64
	3.1.4 Estimativa dos parâmetros de rendimento estimado dos conjuntos mecanizados .....	65
	3.1.5 Proposição de coeficientes de força de tração para os implementos.....	66
	<b>3.2 Métodos.....</b>	<b>66</b>
	3.2.1 Dimensionamento dos implementos .....	66
	3.2.2 Instalação do experimento.....	67
	3.2.3 Modelagem do desempenho experimental do trator .....	72
	3.2.4 Desempenho preditivo x desempenho experimental.....	80
	3.2.5 Proposição dos parâmetros de determinação da força de tração requerida.....	83
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>85</b>
	<b>4.1 Dimensionamento dos implementos .....</b>	<b>85</b>

<b>4.2 Modelagem dos parâmetros de desempenho experimental do conjunto mecanizado .....</b>	<b>86</b>
4.2.1 Análises para pressuposições dos modelos matemáticos .....	86
4.2.2 Semeadora-adubadora .....	87
4.2.3 Grade aradora .....	93
4.2.4 Escarificador.....	102
4.2.5 Considerações finais sobre o desempenho em tração dos conjuntos mecanizados .....	106
<b>4.3 Desempenho experimental x desempenho preditivo.....</b>	<b>107</b>
4.3.1 Semeadora .....	107
4.3.2 Grade aradora .....	115
4.3.3 Escarificador.....	131
4.3.4 Considerações finais sobre a utilização de teorias preditivas .....	141
<b>4.4 Proposição dos parâmetros característicos das máquinas no modelo de determinação da força de tração requerida .....</b>	<b>142</b>
4.4.1 Semeadora .....	143
4.4.2 Grade aradora .....	144
4.4.3 Escarificador.....	145
4.4.4 Análise das proposições .....	146
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>148</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>149</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>157</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A agricultura moderna está cada vez mais exigente na utilização racional de todos os meios de produção, sendo as máquinas agrícolas ocupantes de um papel primordial pra a racionalização, por ser um item de expressivo valor tanto técnico como econômico em explorações agrícolas. Uma das formas de aumentar a eficiência, no trabalho com esta máquina, requer, entre as várias condicionantes uma adequada adaptação do veículo ao implemento ao qual está acoplado.

Em diversas situações, pesquisadores buscam um método eficiente para determinar a qualidade de tração dos tratores, desenvolvendo teorias de predição, que em comum tem o objetivo de prever o comportamento de vários parâmetros de rendimento deste veículo.

Juntamente com os ensaios realizados sob condições reais de funcionamento, os progressos das modernas técnicas de simulação fornecem ferramentas de grande utilidade nos estudos do seu comportamento, porém precisam de um suporte teórico que compare as técnicas empregadas na modelagem.

A modelagem matemática pode fornecer ao agricultor, informações práticas para um eficiente planejamento da utilização de máquinas agrícolas existentes na sua propriedade ou na aquisição do conjunto trator-implemento através de sua aplicação facilitada por softwares especializados para administração de propriedades agrícolas, principalmente por fornecer informações como a capacidade operacional de cada conjunto trator-implemento através da determinação da demanda de força de tração de cada implemento ou da capacidade de tração do trator, bem como a sua seleção. Enquanto que para as indústrias fabricantes oferece suporte científico e de considerável precisão na determinação do desempenho dos produtos, desde tratores a pneus, reduzindo os custos e o tempo despendido nos ensaios, podendo oferecer recomendações de como se conseguir condições mais favoráveis de utilização dos tratores.

A difusão do uso da predição do desempenho de tratores e equipamentos agrícolas no Brasil deve-se tornar uma realidade em meios científicos, de fábricas de máquinas e equipamentos agrícolas e que, no entanto, para que isso ocorra no Brasil é preciso primeiramente promover a predição de tração de implementos através da modelagem obtida de resultados precisos, simples e práticos, fornecendo parâmetros reais para as condições brasileiras de solo e de trabalho no campo.

A predição do desempenho de tratores e implementos poderá ainda ser uma ferramenta de grande utilidade para agricultores, cooperativas, administradores rurais, fornecendo dados importantes para a seleção da maquinaria agrícola disponível na agricultura nacional; disponibilizando bases teóricas para pesquisadores e universidades e ainda, podendo facilitar o trabalho de indústrias fabricantes de tratores agrícolas, reduzindo custos e o tempo do projeto, diminuindo a quantidade de ensaios em campo.

A determinação de teorias preditivas do desempenho e requerimentos de conjuntos mecanizados para as condições regionais pode servir para estimar a demanda energética e a otimizar a combinação entre trator-implemento.

Pela necessidade em obterem-se valores reais de parâmetros do modelo de predição da demanda energética de diferentes conjuntos mecanizados, este trabalho tem por objetivo principal determinar modelos de demanda de tração para predição do desempenho de tratores em operações que demandam força de tração sob dois tipos de textura do solo no Estado do Rio Grande do Sul. Como por objetivos específicos, propõe-se:

- i. Realizar uma revisão das teorias de predição do comportamento em operações de tração.
- ii. Estudar ferramentas projetadas especialmente para simular situações reais de campo contrastada por dados empíricos obtidos em condições reais de trabalho em dois tipos de texturas de solo do Estado do Rio Grande do Sul com os resultados obtidos em outros trabalhos semelhantes realizados em outros países.
- iii. Determinar as variáveis relevantes na modelagem de predição para desempenho de tração.
- iv. Determinar coeficientes representativos às características dos solos de textura argilosa e textura média do Estado do Rio Grande do Sul presentes nas equações de predição para desempenho de tração do modelo proposto pela ASAE D 497.4 (2003).
- v. Fornecer relações entre velocidade de operação e força de tração disponível na barra de tração para diferentes texturas de solo e implementos agrícolas através de simulação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Considerações iniciais

É crescente a necessidade do mercado de máquinas agrícolas em suprir a demanda existente de tratores e equipamentos agrícolas adequados às diversas atividades do campo. Com uma produção nacional de tratores desde 15 a 200 cv de potência, as indústrias necessitam dispor de informações sobre adequação de potência e os implementos disponíveis. A seleção de máquinas e implementos agrícolas cada vez mais torna-se uma tarefa difícil para o agricultor, frente às diversas opções de marcas e modelos já estabelecidos comercialmente e o lançamento freqüente de conjuntos mecanizados que disponibilizam inovações tecnológicas atrativas para o mercado. Porém, esta diversidade pode, por muitas vezes, desviar o agricultor de uma escolha racional do ponto de vista do desempenho operacional, financeiro e econômico, seja pelo baixo nível técnico de conhecimento dos requisitos para uma correta seleção da maquinaria por parte do agricultor, como por parte dos técnicos de algumas revendas autorizadas de máquinas agrícolas, deficientes de pessoas qualificadas tecnicamente para auxiliar o agricultor nesta escolha, ou ainda, apenas visando o lucro a ser alcançado pela revenda (SERPA, 1997).

MacMillan (2002) cita como principais interessados e suas respectivas motivações em estudar o desempenho de tratores:

(i) Os projetistas que desejam prever se o trator que está sendo projetado alcançará os objetivos do projeto, seja por meio dos procedimentos tradicionais do projeto para elementos mecânicos, tais como o sistema de transmissão de potência, experiência obtida por especificações de projeto de outros tratores ou pela aplicação das técnicas de predição do desempenho conhecidas cientificamente.

(ii) Aqueles que são consultores dos usuários, incluindo consultores de extensão e pessoas de vendas, também precisam entender do desempenho do trator. Seu interesse não está no projeto, mas de como escolher (em termos econômicos e também físicos) um trator de uma classificação avaliável para atingir uma média de trabalho requerida (ou contrastá-lo com outras máquinas) e como ajustá-lo, bem como, operá-lo da maneira eficiente.

(iii) Usuários que necessitam entender os aspectos básicos do desempenho do trator de forma que eles possam interagir com seus consultores e trabalhar com seus tratores de uma maneira eficiente.

(iv) Aqueles que são responsáveis por fornecer serviços tais como treinamento, administração, segurança e outros aspectos associados aos grupos acima também precisam entender o desempenho do trator e assim prover consultoria convincente e útil.

O mesmo autor ainda justifica o estudo sobre desempenho de tratores pelas características de trabalho do mesmo, tais como:

(i) Os solos agricultáveis, em que o trator opera, são “fracos”, além de favorecer perdas de rendimento pela ocorrência do patinamento, sofrem compactação quando carregados verticalmente. Esta condição, a qual o trator e seu implemento acoplado são freqüentemente utilizados para produzir trabalho, é geralmente ideal sob o ponto de vista agrícola, mas não é condizente à operação eficiente do ponto de vista da tração.

(ii) As condições de carga do trator são variáveis segundo cada operação agrícola. No entanto, para que a operação seja considerada eficiente, é necessário que o trator esteja idealmente ajustado para trabalhar sob aquela condição operacional.

(iii) As condições de operação do trator são altamente variáveis no tempo e no espaço, necessitando monitoração contínua e o ajuste de ambos, tanto do trator como do implemento em operação.

(iv) As superfícies do solo são consideradas rugosas e declivosas algumas vezes, conseqüentemente, dificultando o controle do conjunto trator e implemento, sendo a instabilidade um perigo sempre presente. Também importante pela condução do conjunto sempre por pessoas especializadas.

O interesse pelas pesquisas na área da mecanização agrícola tem sido cada vez mais pronunciado, provavelmente devido à evolução não planejada desse setor nos últimos 30 anos, desde a implantação da indústria nacional de máquinas agrícolas, o que acarretou num uso indiscriminado e intensivo dessa maquinaria, indispensável para o progresso tecnológico da nossa agricultura, porém muitas vezes, utilizada inadequadamente.

Em muitas regiões do Brasil, equipamentos agrícolas têm a sua utilização comprometida, em razão da sua não-adequação às condições de trabalho (MANTOVANI et al., 1999). Para que ocorra o uso racional destes equipamentos agrícolas torna-se necessário conhecer o sistema de manejo de solo que ele vai atender, as características desejáveis que o solo deve apresentar, a energia consumida e, também, a sua capacidade efetiva de trabalho.



De acordo com Mialhe (1974), mecanizar racionalmente as operações agrícolas constitui o objetivo básico do estudo da mecanização agrícola. A correta utilização e a adequação de tratores aos implementos e a capacidade do operador para aproveitar ao máximo as possibilidades oferecidas por estes modernos equipamentos, reflete a maior capacidade de trabalho e economia do consumo de combustível. O autor afirma que as operações agrícolas são definidas como "toda atividade direta e permanentemente relacionada com a execução do trabalho de produção agropecuária". Dentro destas operações incluem-se as de preparo inicial e periódico do solo, semeadura, plantio e transplante, aplicação de defensivos e colheita. A execução destas operações, também denominadas comumente de práticas agrícolas, exige uma metodologia específica e a utilização de equipamentos adequados. Além de exigir atenção para a época em que se realiza estas operações, o teor de umidade do solo e o equipamento empregado influenciam sobre a qualidade da operação e o consumo de energia.

Para isso, o estabelecimento de um modelo de dimensionamento trator-implemento, baseado na medição da força de tração requerida em condições reais de trabalho, permite aos fabricantes uma indicação precisa da potência recomendada para cada modelo de implemento produzido, com informações importantes para o agricultor na sua tomada de decisão quanto à seleção do conjunto trator-implemento adequado à sua exploração (SERRANO et al., 2003).

## **2.2 Dimensionamento do conjunto mecanizado**

O trator agrícola segundo MIALHE (1980) é uma máquina autopropelida provida de meios que, além de lhe conferir apoio estável sobre uma superfície horizontal e impenetrável, capacitam-no a tracionar, transportar e fornecer potência mecânica, para movimentar órgãos ativos de máquinas e implementos agrícolas. No trator agrícola a energia gerada pela combustão é transformada em energia mecânica no motor. O trabalho mecânico desenvolvido no motor é aplicado no acionamento de máquinas e implementos através da tomada de potência (TDP) e da barra de tração (MIALHE, 1974). Através da barra de tração desenvolve-se a força exigida pelos equipamentos por meio da transferência de energia do motor para os rodados, através das transmissões, e finalmente transformam o torque do eixo motriz do trator, em força disponível na barra de tração, isto é, a força de tração resultante da interação do trator com o meio, sendo gerada no motor e chega ao solo pelas rodas. Do encontro desses dois elementos, formando o conjunto roda-solo, resulta o fenômeno da tração.

A transmissão de potência do motor para a barra de tração sofre diversas perdas passando pela caixa de câmbio, coroa e pinhão, diferencial e redução final. Além dessas perdas na transmissão da potência do motor, ocorrem perdas devido à patinagem, deformação dos pneus, tipo de solo, teor de umidade do solo, dentre outras fontes de perda (MIALHE, 1980). Devido a estas perdas é necessário conhecer a potência fornecida pelo motor e o que realmente é disponibilizado de potência na barra de tração para tracionar o implemento, bem como, o seu real requerimento em força de tração.

Esta força é necessária para fornecer a energia requerida para girar o pneu, para comprimir ou empurrar suavemente para trás o solo e girando a roda deslocar seu eixo para frente.

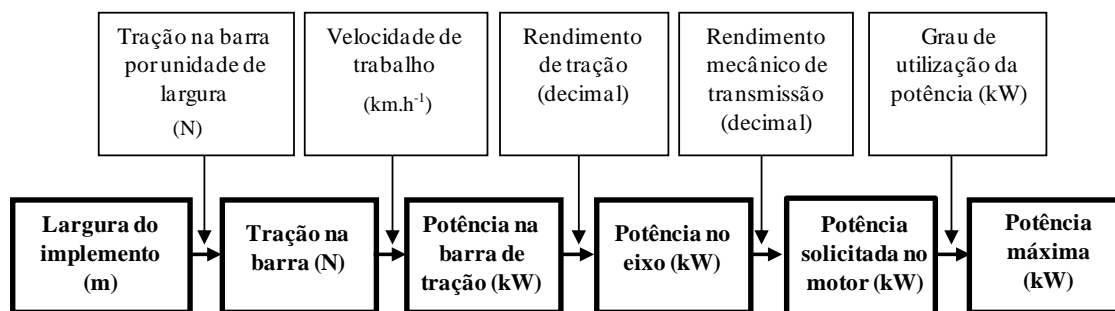
A tração é a força, na direção do deslocamento, produzida por um trator em sua barra de tração (ASAE, 1999a). Segundo a ASAE (1999b), o desempenho na barra de tração de um trator depende da potência do motor, da distribuição de peso sobre os rodados, da altura e da posição dos engates da barra e da superfície do solo, entre outros fatores. A eficiência no uso dessa força é limitada pela ação dos dispositivos de tração, que, nos tratores agrícolas, mais usualmente, são rodados pneumáticos (SRIVASTAVA et al., 1996).

Segundo Linares et al. (2006) o solo que serve como meio de locomoção extraviaria é de grande variabilidade, dificultando conhecer in situ suas propriedades mecânicas, além de haver certas exigências agrônômicas como a necessidade de rompê-lo e alterar sua porosidade, sem, no entanto, compactá-lo. Os autores citam a dificuldade em relacionar tal diversidade sob as rodas de um trator com a própria natureza dos pneus, nem sempre bem conhecida, dificultando ainda mais o desenvolvimento de leis científicas para as ações que a roda transmite ao terreno.

De acordo com Serrano (2002) o dimensionamento do conjunto mecanizado (trator-implemento) pressupõe a consideração de variáveis que fornecem o tamanho do implemento, ou seja, a sua largura recomendada para a potência do trator, ou vice-versa. A Figura 1 demonstra o dimensionamento de um implemento para determinado trator, utilizando-se de valores de referência os valores médios das variáveis determinadas em ensaios de campo, além das indicações publicadas pelos Standards da ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers).

O dimensionamento de um conjunto trator-implemento realiza-se a análise de uma série de variáveis, dentre as quais, a máxima potência requerida do motor. De maneira indireta, deve-se considerar o tipo, forma de trabalho e largura do implemento e as condições de solo sobre as quais o trator irá trabalhar. Relativo à operação, deve-se considerar a faixa de

velocidade de trabalho desejada como critério de seleção, levando em conta os escalonamentos de marchas apresentados pelos modelos comerciais que atendam à potência máxima requerida pelo motor (MACMILLAN, 2002).



**Figura 1 - Diagrama real da previsão da potência requerida do implemento para o trator (Adaptado de SERRANO, 2002).**

Segundo a metodologia proposta pela ASABE (ASAE Standards, 2000: ASAE EP496.2DEC99) o início do dimensionamento de máquinas agrícolas parte do cálculo do ritmo operacional. Para tanto é necessário primeiramente conhecer a dimensão da área a ser trabalhada e os dias disponíveis para a realização da operação agrícola para cada cultura, permitindo a execução das tarefas no período adequado, sem correr riscos de natureza agrônômica, garantindo a instalação das culturas no período mais favorável para o seu crescimento e desenvolvimento. Agedes & Mota (1986), afirmam que existem inúmeras decisões dependentes das condições meteorológicas a serem tomadas pelo agricultor. Entre essas decisões encontra-se a necessidade de prever uma operação agrícola em tempo hábil com a maquinaria que se dispõe. Para isso, devem ser definidos os períodos nos quais as operações devem ser realizadas, para posteriormente avaliar o tempo disponível de trabalho nos referidos períodos. Na previsão operacional são consideradas datas limites de início e término, levando em conta apenas os fatores associados ao desenvolvimento das plantas da cultura e ao meio ambiente, enquanto no trabalho com máquinas agrícolas existe a interferência de fatores que são incontroláveis, do ponto de vista prático, como a jornada de trabalho dos operadores e dos dias de chuva.

O cálculo do tempo disponível para realizar qualquer operação cultural pode ser estimado de acordo com a Equação 01 proposta por Mialhe (1974), a qual traduz o produto do número de dias úteis com precipitação inferior ao valor crítico, pelo número de horas disponíveis por dia. O número de dias em que a quantidade de precipitação impede a realização da operação cultural pode ser estimado a partir de cálculos de probabilidades, baseados nos registros de pluviosidade diária verificados numa determinada região, numa série de anos consecutivos.

$$T_d = [N - (Ndf + Nu)].Hj \quad (01)$$

Onde:

$T_d$  = tempo disponível num determinado mês do ano (h);

$N$  = número de dias úteis;

$Ndf$  = total do número de dias de domingos e feriados e o

$Nu$  = número de dias do mês em que a precipitação é maior ou igual ao valor crítico;

$Hj$  = jornada de trabalho diária (h).

O cálculo do ritmo operacional é efetuado em função da área que necessita a operação cultural em causa (multiplicar pelo número de passagens do implemento), utilizando o valor contabilizado de horas disponíveis nesse período. A Equação 02 relaciona o ritmo operacional realizado pelo conjunto mecanizado com as variáveis que a determinam.

$$RO = \frac{L \cdot Vr \cdot \eta}{10} \quad (02)$$

Onde:

$RO$  = ritmo operacional ( $ha.h^{-1}$ );

$L$  = largura de trabalho (m);

$Vr$  = velocidade real de deslocamento ( $km.h^{-1}$ );

$\eta$  = eficiência operacional (decimal).

Nesta expressão, o rendimento de campo depende fundamentalmente de aspectos relacionados com (ASAE STANDARDS, 2000):

- a) O operador (a sua eficiência nas manobras de cabeceiras, nas sobreposições e nas regulagens do implemento);
- b) As características da área (a sua dimensão, forma, tipo de cultura, teor de umidade, condição do solo);
- c) O tipo de operação cultural.

A velocidade de trabalho e a eficiência operacional são atribuídas segundo o tipo de operação e situa-se normalmente num intervalo também citado pela ASAE D497.4 (1999),

embora esta decisão dependa também da experiência do operador e do relevo do terreno a ser trabalhado. Na Equação 02 a largura de trabalho passa a ser a variável dependente, indicando a dimensão do implemento, a qual é imposta pela necessidade de garantir um determinado ritmo operacional. O principal objetivo desta primeira fase do dimensionamento do trator está na indicação de um intervalo de larguras de trabalho para garantir a realização da operação cultural em causa, no período de tempo disponível imposto pelas condições do solo habituais na região. Esta informação é, todavia, de valor meramente indicativo, uma vez que em cada ano as condições meteorológicas condicionam as decisões dos agricultores relativamente ao momento oportuno para intervir (SERRANO et al., 2003).

Após conhecer a dimensão do implemento requerida para a realização da operação em tempo hábil, realiza-se o dimensionamento do trator, ou seja, a estimativa da potência recomendada. Para isto é necessário haver o conhecimento das exigências de tração do implemento, a qual, associada à velocidade de operação, permite prever a potência solicitada na barra de tração (Equação 03).

$$Pr = \frac{Ft \cdot Vr}{3,6} \quad (03)$$

Onde:

Pr = potência requerida na barra de tração solicitada pelo implemento (kW);

Ft = força de tração na barra (kN);

Vr = velocidade real de deslocamento (km.h<sup>-1</sup>);

3,6 = fator de conversão de unidades.

A ASAE D497.2 (1995) apresentava modelos e valores dos coeficientes específicos para estimar a força de tração requerida para cada tipo de implemento, dependendo da estrutura e teor de umidade do solo, os modelos definidos eram os seguintes:

a) Escarificadores: força de tração (N/sulco) dependente da profundidade de trabalho representada por d (cm).

$$\text{Silte argilo-limosa:} \quad Ft = 21,5 d^2 \quad (04)$$

b) Grade de discos: força de tração (N) por massa (M) (kg) a qualquer velocidade e sob profundidade típica de funcionamento.

$$\text{Argiloso:} \quad Ft = 14,7 M \quad (05)$$

$$\text{Franco limoso:} \quad Ft = 11,7 M \quad (06)$$

$$\text{Arenoso-franco:} \quad Ft = 7,8 M \quad (07)$$

c) Semeadoras em linha: Força de tração por linha (N/linha) e, incluída a resistência ao rolamento para solos argilosos.

$$\text{Somente semeadura} \quad F_t = 450 \text{ a } 800 \text{ N/linha} \quad (08)$$

$$\text{Semeadura + aplicações químicas} \quad F_t = 1100 \text{ a } 2000 \text{ N/linha} \quad (09)$$

A força de tração solicitada na barra de tração utilizada na Equação 03 tem apresentado constantes atualizações quanto ao seu processo de determinação, publicadas pela ASABE através de “drafts”, sendo que a partir de 2003 por uma equação geral (Equação 10) diferentemente daquelas sugeridas anteriormente pela ASAE D497.2, ou seja, sua validade inclui a determinação da força de tração para todos os implementos (individualizados) em uma mesma equação, sejam de preparo do solo ou de cultivo, utiliza-se de dados como textura do solo, velocidade de operação, profundidade de trabalho e parâmetros relacionados à máquina, ou seja, relação existente ou não de cada máquina com a influência da velocidade para determinar a força de tração (ASAE D497.4, 2003). Este modelo além de facilitar a aplicação por parte do usuário possibilita a utilização de mais variáveis influentes sobre a demanda de força de tração, anteriormente desprezadas por modelos mais simplificados em nível de análise do sistema solo-máquina.

$$D = F_i \left[ A + B(S) + C(S^2) \right] \cdot W \cdot T \quad (10)$$

Onde:

D = força de tração requerida pelo implemento (N);

F = parâmetro adimensional relacionado à textura do solo;

i = 1 para solo arenoso, 2 para médio e 3 para solos argilosos;

A, B e C = parâmetros dependentes de cada tipo de máquina;

S = velocidade operacional ( $\text{km.h}^{-1}$ );

W = largura da máquina (m) ou número de órgão ativos e

T = profundidade de trabalho (cm).

Os parâmetros obtidos pela ASAE D497.4 (2003) tanto os relacionados ao solo quanto aos relacionados à máquina são tabelados, porém, segundo valores obtidos em experimentos sob solos típicos Norte-Americanos. A Tabela 1 exemplifica alguns desses valores para parâmetros relacionados à máquina (A, B, C) e ao solo (Fi).

Os modelos de predição necessitam de ensaios em condições reais para possíveis comparações segundo Linares et al., (2006), tornando necessários os ensaios em campo, por dois motivos: para obter dados utilizados para o desenvolvimento do modelo e para a comparação posterior, uma vez determinada a teoria. No entanto, pesquisadores brasileiros encontram como principal limitação na aplicação destes modelos de predição da força de tração a utilização de dados característicos de solos Norte-Americanos e Europeus propostos como métodos pela ASAE (1995) e Witney (1985) respectivamente, não havendo certeza se sua aplicação no Brasil pode ser de mesma precisão comparados aos ensaios realizados nos países de origem. Sendo este o motivo da necessidade em reavaliar os coeficientes determinados pelo método do equacionamento empírico para determinar coeficientes específicos para as condições de solos brasileiros. Já Mantovani et al. (1999) citam que os fabricantes têm tentado resolver tais problemas, mas existem poucos dados sistematizados sobre as características dos solos do Brasil para utilizá-los como parâmetros de projetos de adaptação e adequação.

**Tabela 1 - Parâmetros relacionados a características e largura para cada máquina e relacionados à textura do solo (adaptado de ASAE D497.4, 2003).**

Implemento	Largura /unidade	Parâmetros de máquina			Parâmetros de Solo		
		A	B	C	F1	F2	F3
Escarificador	hastes	107	5,3	0,0	1,0	0,85	0,65
Grade Pesada em “V”	m	364	18,8	0,0	1,0	0,88	0,78
Semeadora - adubadora Fluxo Contínuo	linhas	1550	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0
Semeadora - adubadora Precisão, plantio direto	linhas	3400	0,0	0,0	1,0	0,96	0,92

Para o funcionamento de uma determinada máquina em um determinado tipo de solo, a própria magnitude da força de tração requerida é uma função de velocidade de deslocamento, profundidade e largura de trabalho. O implemento pode influir na força de

tração, conforme o tipo de ferramenta usada, as propriedades do material que está em contato com o solo, a superfície em contato com o solo, a curvatura, a forma e as condições da superfície da ferramenta onde a força é aplicada. Outras variáveis incluem largura e profundidade do sulco (FAGANELO, 1989). Yanai et al. (1999) citam o solo como uma das principais dentre as várias situações e condições que podem influenciar na tração, em função das suas propriedades físicas e condição da superfície. As condições do solo que afetam a eficiência de tração de um trator agrícola são a textura, o tamanho dos agregados, o teor de água, a densidade do solo, a estrutura, os efeitos de declividade, da vegetação e dos resíduos de culturas anteriores (YANAI et al., 1999)

Assim, a demanda de força de tração é o primeiro passo a ser determinado para o dimensionamento da potência do trator, visto a sua aplicação para determinar a potência requerida pelo implemento. No entanto, valores impróprios para determinadas condições de trabalho, como determinado tipo de solo, e parâmetros relacionados ao projeto da máquina comprometem a precisão no dimensionamento final de uma frota agrícola. Smith & Fornstron (1980) afirmam que as medições do consumo energético em vários implementos fornecem base para seleção dos mesmos e dos sistemas de cultivos. O desenvolvimento de um banco de dados em energia requerida para várias operações agrícolas vem a ser a principal preocupação na administração econômica dos recursos para a produção agrícola, através da melhoria em eficiência operacional que pode ser melhorada maximizando a produtividade ou reduzindo consumo de combustível, ou seja, melhorias na eficiência de tratores agrícolas incluem maximizar o desempenho de tração e o aumento em eficiência no consumo de combustível de máquinas através da seleção apropriada da velocidade de operação para a o sistema trator-implemento sob determinada condição de solo (KEIRALLA et al., 2004).

A potência do motor é disponibilizada através da transmissão da potência do trator sob três situações, pela potência requerida na barra de tração pelos implementos, e a outra pela tomada de potência do trator, além do sistema hidráulico. A obtenção da potência solicitada ao motor a partir do conhecimento da potência solicitada na barra de tração passa pelo conhecimento da potência disponível na barra de tração (Equação 11) considerando a possibilidade de uma heterogeneidade da área, no que diz respeito a fatores de sobrecarga, dispersando os valores médios encontrados para potência requerida. O estabelecimento de valores para a reserva é dependente da experiência do operador e do conhecimento da área a ser trabalhada. Conseqüentemente, pode-se determinar a potência líquida do motor do trator, tratando-se da potência efetivamente retirada do motor, em operação, com o trator trabalhando na rotação de trabalho (Equação 12).



$$PdBT = Pr \cdot \text{reserva} \quad (11)$$

$$NI = \frac{PdBT}{0,65} \quad (12)$$

Onde:

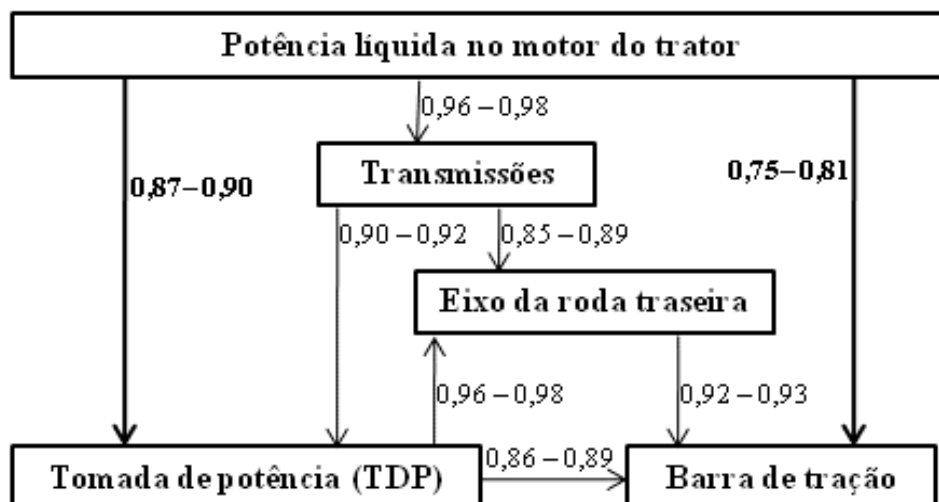
PdBT = potência disponível na barra de tração (kW);

Pr = potência requerida pelo implemento (kW);

NI = potência líquida no motor e

0,65 = valoração para o rendimento da transmissão de potência.

A norma ASAE EP496.2 (1999), apresenta as perdas nas diversas etapas de transmissão de potência para a tomada de potência (TDP) e para a barra de tração, e a relação entre elas, como ilustrado na Figura 2. Porém a potência líquida obtida na barra de tração é válida para a condição de piso de concreto (eficiência máxima de transmissão de potência). Portanto, para se calcular as diferentes potências na barra de tração em função dos vários tipos e condições de solos agrícolas, esse valor deve ser multiplicado pelo rendimento do rodado nesses solos. Esta representação considera perdas em torno de 19 a 25 % da potência produzida no motor aos pontos de acoplamento, devido às perdas decorrentes nos sistema de transmissão, embreagem, diferencial, redução final e rodados.



**Figura 2 - Rendimento máximo de potência mecânica de um trator com tração simples sobre pista de concreto (ASAE EP496.2, 1999).**

Assim, pode-se determinar a potência bruta do trator a ser dimensionado através da Equação 13:

$$N_m = \frac{N_l}{0,85} \quad (13)$$

Onde:  $N_m$  é a potência máxima disponível no motor;  $N_l$  é a potência líquida do motor e 0,85 é valorção para o rendimento da transmissão de potência máxima do motor.

Como indicação de enquadramento destes valores, a ASAE estima que o rendimento total de tração máximo em tratores de quatro rodas motoras seja de 70 % em solo firme (não mobilizado) e de 67,5 % em solo mobilizado (ASAE Standards, 2000: ASAE D 497.4 MAR 99). A indicação da potência motora recomendada (kW) pressupõe a consideração do grau de utilização da potência máxima, normalmente entre 80 e 85 %, funcionando esta margem de 15 a 20 % como reserva para fazer face á solicitações suplementares que possam surgir no decorrer do trabalho a realizar, imprevistos resultantes da heterogeneidade do solo e zonas inclinadas em que é preciso vencer a gravidade.

Bowers (1985) da Universidade de Oklahoma, nos Estados Unidos citado por Schlosser et al. (1998), sugere uma regra, conhecida como “Fator 86” ou ainda, como método prático para o dimensionamento de implementos. O método utiliza um coeficiente de perda de potência, estimado como 0,86, ou seja, considera uma redução de potência de 14% a cada passo do método, obtido com repetidos testes e ensaios de tratores e montado em universidades americanas, considerando que:

- a) Potência bruta do motor x 0,86 = Potência na TDP;
- b) Potência na TDP x 0,86 = Potência máxima no rodado sobre pista de concreto;
- c) Potência máxima no rodado sobre pista de concreto x 0,86 = Potência máxima sobre pista de solo agrícola firme;
- d) Potência máxima sobre pista de solo agrícola firme x 0,86 = Potência utilizável sobre solo cultivado;
- e) Potência utilizável sobre solo arável x 0,86 = Potência utilizável sobre solo solto.

Quanto maior for o ajuste da potência disponível do trator com a potência requerida pelo equipamento sob determinadas condições de trabalho, mais eficiente será a seleção da máquina, seja ela o trator ou o implemento agrícola. Devendo evitar-se situações de dimensionamento incorreto, as quais resultarão na redução da capacidade requerida e consumos de combustível consumidos por hectare. O limite, no caso de implementos pequenos para o trator, será imposto pela velocidade de trabalho, a qual deve garantir a segurança e o conforto do operador e a qualidade do trabalho. No caso de implementos

grandes, em que o limite é imposto pela capacidade de tração do trator, a patinagem das rodas motoras funciona como um fusível indicador (SERRANO et al., 2003).

O consumo de energia pode variar dependendo do tipo de operação agrícola. Segundo Kepner et al. (1977) a energia requerida para obter um desejado grau de mobilização do solo depende primariamente da resistência do solo e da eficiência de utilização do implemento. O trabalho realizado por Michel Júnior et al. (1985) afirma que o requerimento energético dos sistemas de preparo do solo é dependente da seqüência de realização das operações, bem como dos implementos usados. Enquanto para Singe & Singe (1986), o elevado consumo de energia nas operações de preparo periódico do solo em relação às demais se deve ao desenho de muitas ferramentas que são baseadas em experiências práticas e não em conhecimentos científicos.

Schlosser (1998) cita o método “passo a passo” como forma de planejamento de aquisição e utilização de máquinas agrícolas e alternativo ao método prático do Fator 86, sendo o dimensionamento o último passo que antecede a seleção das máquinas. Segundo o autor, o método passo a passo, ou também conhecido como planejamento por etapas ou pela rotina de trabalho, é uma técnica cujo critério básico é a ordem de trabalho a ser executado. Faz-se um relacionamento de métodos, sistemas e operações em ordem de execução, determinando-se o requerimento para cada operação utilizando inclusive gráficos e diagramas.

Uma metodologia que foi desenvolvida por Brixius & Zoz (1975), propõe a utilização de curvas de força de tração disponível na barra de tração versus a velocidade de deslocamento de um trator como técnica para analisar o desempenho do conjunto trator-implemento. Entre os parâmetros considerados pelo autor, está a relação existente entre o peso e a potência do trator, o tamanho do implemento e a velocidade que os implementos podem ser tracionados. A velocidade de tração do trator é definida pela máxima força de tração disponível pelo mesmo para qualquer velocidade determinada. Reciprocamente, a velocidade máxima pode ser definida através da determinação de um nível de força de tração requerida por um determinado implemento. O trator opera a qualquer ponto abaixo da curva. Para velocidades mais altas, o trator apresenta limitação pela potência. Sob velocidades mais baixas, o trator possui a limitação de tração pela patinagem, de praticamente 25%. Quando a força de tração é superior ao limite de tração especificado, o trator patina excessivamente, conseqüentemente o desgaste sofrido pelo pneu é maior, existindo baixa eficiência de tração e compactação do solo. Assim, esta curva para força de tração-velocidade define a força de tração requerida para um determinado implemento indicada para a sua velocidade de

deslocamento. Normalmente a força de tração de implementos aumenta com a velocidade devido à reação de forças do solo.

A velocidade máxima de operação difere entre a diversidade de combinações do conjunto trator-implemento. Porém, os implementos são normalmente operados sob velocidade pouco inferior à máxima recomendada para cada tipo de operação considerando a necessidade de existir uma reserva de tração. A recomendação de velocidade maior que a máxima é indisponível devido a limitações por potência. As análises de curvas definem a tração e a limitação da operação por potência, mas o desempenho do implemento pode ser limitado por outros fatores citados por Brixius & Zoz (1975), sendo eles o controle, a montagem e o tipo de funcionamento. Já, Srivastava et al. (1993) citam o requerimento de tração por implementos, a potência requerida e ainda a qualidade de trabalho oferecida pelos mesmos como os fatores determinantes no desempenho de implementos.

Segundo Witney (1987) o gráfico de predição para o desempenho de tração de um implemento é um procedimento que visa avaliar o efeito de força do solo e a velocidade de deslocamento na exigência de potência da barra de tração pelo implemento.

A importância do conhecimento das exigências de tração específicas de cada implemento decorre de duas ordens de razões:

- a) Com base nas mesmas, pode-se prever a dimensão adequada dos tratores, em termos de potência;
- b) O fabricante, conhecendo estes valores encontra uma importante referência para efeitos de projeto e desenvolvimento dos implementos.

Portanto, a disponibilidade de dados sobre solicitações de força por parte de implementos de mobilização em tipos específicos de solo representa um importante instrumento na seleção do tipo e da dimensão dos implementos e dos tratores adequados para cada exploração agrícola, mas também na estimativa dos custos associados a diferentes sistemas e itinerários agrícolas alternativos.

Diversos outros trabalhos foram desenvolvidos analisando o desempenho de diferentes combinações entre tratores e diferentes tipos de implementos encontrando valores para demanda de força de tração. Os resultados de pesquisas sobre os implementos grade de discos, escarificador e semeadora encontram-se a seguir.

### 2.2.1 Grade de discos

Sua função é completar o serviço executado pelos arados, embora elas possam ser utilizadas antes ou até mesmo em substituição a estes em algumas situações. Também têm a função de complementar o preparo do solo, no sentido de desagregar os torrões, nivelar a superfície do solo para facilitar a semeadura, diminuir vazios que resultam entre os torrões e destruir os sistemas de vasos capilares que se formam na camada superior do solo, para evitar a evaporação de água das camadas mais profundas.

O desempenho de implementos de disco é avaliado em termos de tração, tração específica, potência requerida e profundidade. Diferentemente do arado de aivecas, a profundidade de penetração dos discos do implemento é determinada pelo peso do implemento, pelo ângulo de travamento da grade e condição do solo. Normalmente grades de ação simples operam com um ângulo de ataque maior. As grades de dupla ação apresentam regulagens de ângulo de ataque que variam de 17,5 (para grade leve), de até 22,5 graus para as grades pesadas/aradoras (Stolf et al., 2007). Quanto maior for o ângulo maior será a profundidade de trabalho. A profundidade de trabalho da grade aumenta com o diâmetro dos discos. Assim, na medida em que maiores diâmetros são adotados, maiores espaçamentos entre discos são fixados. Assim, a capacidade para mantê-lo numa profundidade desejada uniforme torna-se um importante critério no seu desempenho.

A ASABE propõe como modelo geral de previsão de força de tração ( $F_t$ ) solicitado pelas grades de discos, uma função linear da massa da grade,  $M$  em kg (Equação 14), sendo o coeficiente  $k$  estabelecido em função da textura do solo (ASAE D497.2, 1995).

$$F_t = k.M \quad (14)$$

Este modelo pode ser considerado como referência para estimativas, uma vez que considera provavelmente os dois parâmetros com maior importância na definição de força solicitada por estes implementos: o peso do implemento e o tipo de solo.

Harrigan & Rotz (1994) propõem o modelo linear da velocidade para a grade de discos e para cada tipo e condição de solo em cada profundidade de trabalho, a relação entre força de tração e velocidade toma a forma da Equação 15.

$$R = A + B * V_r \quad (15)$$

Onde:

$R$  = resistência específica por unidade de secção de solo mobilizado (em  $N.cm^{-2}$ );

$V_r$  = velocidade de deslocamento ( $km.h^{-1}$ );

A, B = constantes dependentes do implemento, do tipo e da condição de solo.

Os coeficientes A e B apresentados traduzem a consideração por parte dos autores Harrigan & Rotz (1995) de um fator constante para inserir o efeito da textura do solo e da condição do solo. Quanto à textura, consideram que a resistência específica em solo de textura média é cerca de 88% da resistência específica em solo de textura argilosa, enquanto em solo de textura arenosa é de prever uma resistência específica de cerca de 78% da resistência específica em solo de textura argilosa. No que concerne à condição do solo, a força exigida aos discos é normalmente maior em mobilizações primárias relativamente às mobilizações secundárias, contudo, por vezes, acontece o inverso devido à maior profundidade de trabalho em solo já mobilizado. Siemens (1996), relativamente a esta problemática, cita os resultados publicados por Reid et al. (1978 e 1983): a força exigida pela grade de discos “offset” na mobilização secundária foi cerca de 63% da mobilização primária em solo franco-argiloso, 58% em solo franco-argilo-arenoso e 93% em solo arenoso-franco. Harrigan e Rotz (1995) e Siemens (1996) indicam no modelo um fator constante intermédio destes (0,70) para a utilização da grade de discos em mobilização secundária, relativamente à mobilização primária. Os valores dos parâmetros indicados são resultado da pesquisa de dados publicados, algumas vezes obtidos em condições específicas de solos, outras vezes resultantes de extrapolações a partir de dados obtidos com grades semelhantes e de preferência representativos das três principais classificações de solos: textura argilosa, média e arenosa.

Serrano (2007) cita que os ensaios de campo realizados em situações de mobilização primária de solos de textura média com grades de discos offset de 2 a 4 m de largura de trabalho, com massa de 1.200 a 3.500 kg, permitiram estabelecer um modelo de previsão da força de tração na barra ( $F_t$ , em N) em função da massa da grade de discos ( $M$ , em kg), a qual se pode expressar matematicamente pela equação 16 com coeficiente de determinação de 0,79.

$$F_t = 7,3965.M + 7541,6 \quad (16)$$

Confirmando o modelo de previsão apresentado pela ASAE (1995) para grades de discos offset, em mobilização primária de solo de textura média pela equação  $T = 11,7M$ .

Quanto a resultados de eficiência energética, em um solo de textura média, Keiralla et al. (2004) avaliaram diferentes sistemas de preparo do solo na Malásia, através de modelagem da demanda energética e concluíram que a grade de discos foi mais eficiente energeticamente quando comparado a enxada rotativa, arado de discos e arado de aivecas.

### 2.2.2 Escarificador

O escarificador é um implemento agrícola que se apresenta como opção para o agricultor, dentro da ótica do manejo conservacionista; trazendo como vantagens o fato de que mobiliza o solo sem que ocorra a inversão de camadas, promovendo a incorporação de menos de 1/3 do material existente na superfície (ORTIZ-CAÑAVATE e HERNANZ, 1989) além de agredir pouco a estrutura do solo, por produzir torrões grandes (fissuras pouco numerosas, porém de grandes extensões). Este implemento consegue romper camadas compactadas do solo e atingir profundidades de trabalho maiores, quando comparado com outros implementos de preparo primário. No entanto, quando comparado à implementos de discos, sãoi menos agressivos à estrutura do solo, provocando a ruptura do solo nos pontos de menor resistência dos agregados (DALLMEYER, 1994).

A sua avaliação é geralmente direcionada a estudos em função da resistência específica do solo à ação da haste escarificadora, da área de solo mobilizada pelo implemento e pela relação entre a área teórica e a área real mobilizada (eficiência na mobilização do solo). Bianchini et al. (1999) ao avaliarem o desempenho de um escarificador de hastes parabólicas no preparo primário de um solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo e obter equações para prever a força de tração e a potência exigidas concluíram que a regulação do escarificador, com vistas a maximizar o seu desempenho, deve ser realizada observando-se criteriosamente os fatores umidade de solo, profundidade de trabalho, distância entre hastes e velocidade de operação.

Salvador et al. (1998), estudando a energia requerida por área considerando a potência e o tempo gasto por hectare ( $\text{kWh ha}^{-1}$ ) em sistemas de preparo baseados em aração (discos e aivecas), gradagem (pesada e niveladora) e escarificação num Latossolo Vermelho Amarelo, concluíram que a escarificação apresentou menor requerimento de energia que os demais sistemas de preparo periódico do solo. Os valores obtidos de força de tração na barra foram de 12,77 e 18,16 kN, nas profundidades de solo de 27,1 e 33,1 cm, respectivamente, as quais apresentaram diferenças significativas, pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. A variação da força de tração, em função da profundidade de trabalho, é representada, segundo Kiss e Bellow (1981), por uma expressão quadrática, o que explica o fato de a força de tração ter sofrido grande variação entre as profundidades de trabalho utilizadas.

### 2.2.3 Semeadora-adubadora

Oliveira et al. (2000) relatam a grande evolução das semeadoras-adubadoras utilizadas, principalmente quanto à sua concepção e utilização, sendo que as principais mudanças ocorreram nos mecanismos de deposição de fertilizantes, os quais eram constituídos basicamente por discos duplos, atualmente substituídos por hastes rompedoras. As hastes formam o sulco de semeadura com maiores profundidades do que os discos duplos, com conseqüente aumento da mobilização do solo, forças de tração e exigência de potência nos tratores.

Dentre os diversos tipos e combinações de sulcadores para sementes e adubos elas classificam-se em função do preparo de solo realizado, tipo, quantidade e forma de disposição dos resíduos ou de plantas de cobertura, tipo de solo, teor de água, grau de compactação da camada superficial, profundidade de semeadura, velocidade e grau de mobilização do leito de semeadura desejado (ASAE, 1996). No Brasil, as opções mais empregadas são os sulcadores de disco triplo, discos duplos de mesmo diâmetro, discos duplos de diâmetros diferentes (defasados) e os do tipo haste combinadas com discos duplos desencontrados. Para Araújo et al. (2001), a melhor haste é aquela que consegue penetrar com facilidade no solo mais endurecido superficialmente, típico do sistema plantio direto, exigindo baixa força de tração e movimentando pouco solo no sulco. O autor cita que o desempenho da haste depende de vários fatores, tais como, velocidade de operação, posição em relação aos demais sulcadores da semeadora, condições de solo (densidade, teor de água e resistência à penetração), nível de aderência de solo e das características geométricas da própria haste.

Para Chang et al. (1983), a força na barra de tração depende, entre outras variáveis, do teor de água do solo. Vieira et al. (1998) afirmam que, problemas com a haste devido à aderência desta ao solo úmido podem ocorrer, bem como aos demais elementos de discos.

A velocidade de semeadura é um dos parâmetros que mais influencia o desempenho de semeadoras. No entanto, Furlani et al. (2005) avaliando o desempenho de um conjunto trator-semeadora variando a velocidade e o preparo do solo observaram que a força de tração na barra durante a operação de semeadura não foi influenciado pelos fatores velocidade do trator e preparo do solo.

A força de tração na barra requerida por linha de semeadura está na faixa de 1,1 a 2,0 kN (ASAE, 1996). Porém, dependendo do tipo de cultura implantada e da atribuição de atividades como a adubação simultaneamente à semeadura pode aumentar estes valores. A



força de tração necessária para a operação com semeadoras de grãos graúdos (semeadora de precisão), na direção horizontal do deslocamento, já incluída a resistência ao rolamento da máquina, com bom leito de semeadura, varia de  $900 \text{ N} \pm 25\%$  por linha na realização de somente semeadura e ao realizar conjuntamente a semeadura adubação de  $3.400 \text{ N} \pm 35\%$  por linha (ASAE, 1999).

Silva (2000) constatou que, na semeadura direta de milho (quatro linhas), os maiores valores de força de tração (16,12 kN) ocorreram na maior velocidade, e na média do ensaio, verificou-se 1,65 kN (semeadura da soja) e 2,92 kN (semeadura de milho) de exigência de força de tração na barra por linha.

Por outro lado Modolo et al. (2005) ao avaliarem a força de tração solicitada por uma semeadora-adubadora de precisão com diferentes números de unidades de semeadura, verificaram que os valores médios da força de tração média foram de 8.620 N ao tracionar cinco linhas, resultados semelhantes foram encontrados por Mahl et al. (2002) e estão próximos aos obtidos por Silva et al. (2002), que observaram força média de 7.330 N, para semeadora-adubadora equipada com seis unidades de semeadura, utilizando mecanismo sulcador do tipo haste sulcadora em sistema de plantio direto.

### **2.3 Modelagem matemática e estimativa de parâmetros na agricultura**

Desde os tempos mais remotos que o homem busca entender o universo do qual faz parte, esta curiosidade, juntamente com a necessidade de controlar tudo o que o rodeia, sempre foram as características humanas mais evidentes e constantes ao longo dos tempos, utilizando-se da matemática para testar idéias e realizando previsões sobre o mundo real, a tal ponto que se tornou a linguagem base das físicas e suas aplicações em engenharia. O modelo matemático é, sem dúvida, o modelo mais versátil e barato que um engenheiro pode usar, uma vez que diferentes variações nas características e entradas de um sistema podem ser analisadas sem nada ser construído.

Quando o desempenho de um sistema é representado matematicamente por equações, tem-se então um modelo matemático. Este vai definir quantitativamente hipóteses assumidas sobre o sistema real, permitindo deduzir suas conseqüências (Dourado Neto et al., 1998).

Segundo Pereira & Machado (1987), o ideal é formular um modelo suficientemente complexo para desenvolver dados originais, sem, no entanto dificultar sua utilização prática.

Entretanto, todo modelo matemático é uma simulação do sistema a ser estudado, e por isso, não é possível contemplar todas as variáveis existentes, o que resulta numa previsão não exata da realidade.

A experimentação é indispensável para a determinação dos parâmetros empíricos que constituem os modelos matemáticos.

Sempre que se parte para a elaboração de um novo modelo ou para a modificação de um já existente, consideram-se certos pressupostos e simplificações, de tal modo que os modelos raramente são exatos. Torna-se então necessário estar permanentemente a fazer um balanço entre a simplicidade, fator de extrema importância quando se pretende entender determinado fenômeno, e a correção, que deve ser adequada por forma a que o modelo não se afaste demasiado da realidade.

Um bom modelo leva a um melhor entendimento de uma determinada situação, mas nunca se pode esquecer que este deve ser robusto, não contendo situações fora dos limites da sua definição ou assentando em pressupostos que possam levar a resultados inconsistentes. Deve ainda ser preditivo, isto é, ser capaz de antecipar resultados que podem subsequentemente ser verificados através de observações experimentais. Casos há em que essa experimentação se torna inconveniente, quer por ser dispendiosa, perigosa ou mesmo impossível, revestindo-se o modelo matemático de extrema importância, uma vez que se torna o único meio de avaliar os resultados de escolhas alternativas. A este processo chama-se simulação.

Diversos exemplos de modelagem podem ser citados na agricultura, como o seu uso na irrigação, física do solo, nutrição de plantas, bem como no estudo da dinâmica de tratores agrícolas, podendo ser utilizado por engenheiros nos projetos dos tratores, visando a melhoria da segurança nas operações agrícolas mecanizadas.

A modelagem pode ser aplicada na mecanização agrícola através da avaliação de máquinas agrícolas, podendo ser realizadas no laboratório, em campo ou por programas computacionais de simulações de operações de equipamentos. No entanto, para que a mesma seja eficiente é necessário utilizar parâmetros previamente determinados e conhecidos.

Outro exemplo do uso de modelagem matemática é citado por Schlosser et al. (2004) considerando o estudo do desempenho de tratores agrícolas em campo como uma tarefa bastante complexa devido a quantidade de variáveis a serem controladas e analisadas ser muito grande, englobando desde o conjunto mecânico até o terreno onde está desenvolvida a tração, considerando praticamente inexecutável controlar todas as variáveis pela quantidade e dificuldade de medi-las. Dessa forma pesquisadores tem se utilizado de teorias de simulação,

que em comum, têm por objetivo estimar o comportamento de vários parâmetros de rendimento desses veículos. As equações utilizadas baseiam-se em variáveis que podem ser medidas direta e indiretamente e que caracterizam de maneira conjunta o solo e a máquina. Assim, cada uma das partes desse sistema pode ser demonstrada por variáveis específicas.

### 2.3.1 Modelagem na determinação do desempenho de tratores

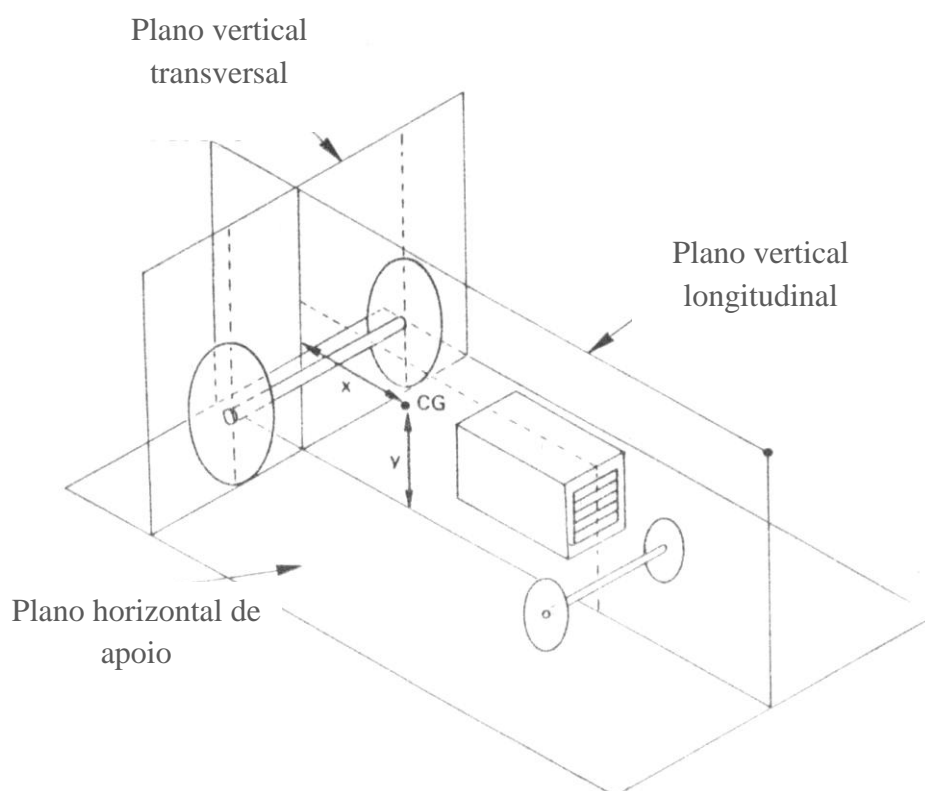
O trator agrícola, dentro de sua característica de autopropulsão, possui um motor que transforma a energia química do combustível em movimento rotativo em seu volante. Para que esse movimento se transforme em deslocamento linear da máquina sobre o solo, através das rodas, necessita percorrer um caminho que é o conjunto de transmissões. Devido a este trajeto que o movimento percorre dentro do trator ocorrem algumas perdas de potência, determinando parte do desempenho em tração, em termos de força (torque do motor e força de tração na barra), velocidade (rotacional), potência na barra de tração e números não-dimensionais (patinagem, eficiência de tração). O consumo de combustível é também uma das formas de expressar o desempenho de tratores. As maiores perdas, porém, ocorrem no encontro da roda com o solo. Nessa interface trator-ambiente, geram-se muitas forças e fenômenos relacionados com a resistência ao rolamento, com a patinagem, a tração, a flutuação, e estes parâmetros têm grande influência no desempenho da máquina (SOUZA FILHO, 2001).

O desempenho da força de tração dos tratores depende inicialmente da potência do motor, distribuição de peso nas rodas de tração, tipo de engate e condição de solo.

Independente do projeto de trator ser direcionado para alguma tarefa específica ou não, qualquer um destes projetos utiliza o mesmo triedro de referência (Figura 3), para caracterizar de forma ponderodimensional um trator. Este triedro, descrito em Mialhe (1980), é constituído de três planos: horizontal, vertical transversal e vertical longitudinal. Nele podem-se projetar as dimensões do espécime, caracterizando-o dimensionalmente por cotas e, ainda, conforme a sua distribuição de massas, caracterização ponderal.

Segundo Mialhe (1996), a caracterização ponderodimensional é aquela que nos dá os efeitos resultantes da interação entre as dimensões e a distribuição de massas do trator. Isso resulta em duas situações bem definidas. A primeira ocorre com o trator parado, quando a distribuição estática de pesos sobre os eixos do trator, e os eixos são os pontos de referências,

pois existe o contato roda/solo e o local de ocorrência do fenômeno da tração. Logo, quando este trator entra em movimento, ocorrem transferências de pesos entre os eixos, que dão a distribuição de pesos dinâmica sobre os eixos, a qual é distinta da estática e deve ser considerada no momento em que se avalia o desempenho de um trator.



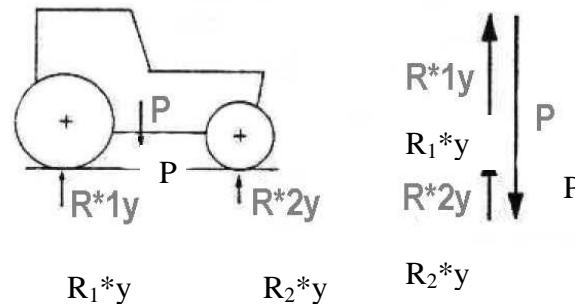
**Figura 3 - Representação do trator no triedro de referência ponderodimensional, com os três planos especificados (MIALHE, 1980).**

Considera-se como o peso estático de um trator a força total normal ao plano da superfície que o suporta, exercida sobre o elemento de tração ou transporte em posição estacionária, sobre um solo horizontal e com tração líquida ou torque no motor nulo (SCHLOSSER, 1996). O peso dinâmico do trator é a força total normal ao plano da superfície que o suporta, exercida sobre o elemento de tração ou transporte em condições de trabalho, podendo ser originada pelo uso de lastros e/ou pelas forças aplicadas.

Na condição estática, a definição da distribuição de pesos acontece pelas dimensões características do trator e pela disposição das massas. Assim, sob uma condição dinâmica, têm-se outras forças interferindo sobre a distribuição de pesos do trator, que são o força de

tração desenvolvido na barra de tração, ou engate de três pontos, a resistência ao rolamento das rodas, e os esforços decorrentes do ângulo de inclinação do terreno e ângulo de inclinação da força de tração na barra.

Quando as forças e os momentos que atuam sobre o trator encontram-se iguais a zero, segundo Linares (1996), ocorre a condição de equilíbrio de um trator, representados pela Figura 4:



**Figura 4 - Trator de tração simples em condição estática (LINARES, 1996).**

O equilíbrio de forças pode ser definido pela Equação 17:

$$P = R_1 * y + R_2 * y, \text{ para } Ft=0 \quad (17)$$

Onde:

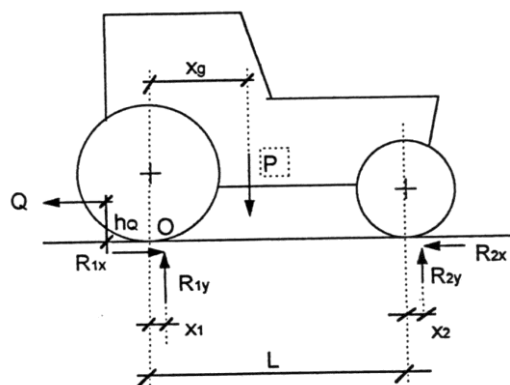
$P$  = peso total do trator (kgf);

$R_1 * y$  = peso estático do trator apoiado sobre o eixo traseiro (kgf);

$R_2 * y$  = peso estático do trator no eixo dianteiro (kgf);

$Ft$  = força de tração.

Na condição dinâmica a equação passa a representar o esforço de tração ilustrado na Figura 5.



**Figura 5 - Trator de tração simples em condição dinâmica, com terreno horizontal e esforço de tração paralelo ao solo (LINARES, 1996).**

Equilíbrio das forças:

$$P = R_1y + R_2Y \quad (18)$$

Pesos dinâmicos:

$$R_2y = \frac{(P \cdot x_g) - (Mk) - (Q \cdot h_q)}{L} \quad (19)$$

$$R_1y = P - R_2y \quad (20)$$

Onde:

$R_1y$  = peso dinâmico do trator no eixo traseiro (kgf);

$R_2y$  = peso dinâmico do trator no eixo dianteiro (kgf);

$Q$  = esforço em tração na barra de tração (kgf);

$R_k$  = resistência ao rolamento (kgf);

$M_k$  = momento resistente ao rolamento;

$L$  = distância entre eixos (mm);

$h_q$  = altura do ponto de engate da barra de tração (mm);

$x_g$  = distância do CG até o eixo traseiro (mm).

Dentre as inúmeras maneiras para avaliar e caracterizar a força de tração, ela depende das características do solo, da roda e do peso do trator e da sua distribuição sobre os eixos. Segundo Mialhe (1980), a força de tração deve ser suficiente para vencer a resistência oferecida para movimentação do próprio trator, bem como deslocar a carga imposta à barra de tração, nas velocidades requeridas para o trabalho. Pode-se, então, definir força de tração pela equação 21.

$$F_t = Q + R_k \quad (21)$$

Onde:

$F_t$  = força de tração (kgf);

$Q$  é o esforço de tração na barra de tração (kgf) e

$R_k$  representa a resistência ao rolamento (kgf).

Independente da operação realizada em campo, as forças geradas pela passagem de máquinas causam deformações e rupturas sobre o solo. Porém, as relações na interface solo-

implemento são muito complexas, pois são afetadas pelas propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e pelas características dos órgãos ativos (ferramentas).

Hunt (1995) afirma que a operação de um equipamento sobre um solo agrícola típico envolve concepções de resistência ao rolamento e componentes de peso, semelhante ao expresso pela Equação 22 para definir força de tração. A resistência ao rolamento incluída na força de tração é definida como a fração da força devido ao peso necessário para sustentar o equipamento movido por uma velocidade constante. Enquanto Neujahr (1999) define a resistência ao rolamento como a resistência proporcionada pelo solo, pelos mecanismos internos de transmissão da máquina e pela histerese do pneu, que se contrapõe ao rolamento do mesmo sobre o solo, estando sempre presente no deslocamento de um trator agrícola, desenvolvendo tração.

As condições de superfície do solo influem de maneira notável sobre a força de tração. Por isso é que os solos cheios de torrões, ou lamacentos, ou macios, oferecem uma resistência maior às rodas do que em um terreno firme (SILVA & KAY, 1996).

As relações de estresse por esforço envolvendo a deformação do solo são extremamente complexas. Operações de semeadura, preparo e/ou mobilização de solo envolvem aplicação de forças e para haver penetração, quebra ou cisalhamento do solo, a força aplicada deve ser no mínimo imediatamente superior à resistência do solo. Com a ação do órgão ativo dos equipamentos a massa de solo se move, os sólidos expulsam ar e água ou o solo se quebra.

O trator agrícola recebe o movimento que vem do seu motor, transmite-o às rodas, alterando velocidade e torque e aplicando ao solo uma força tangencial, inversamente proporcional ao raio da roda, que deve ser absorvida pelo sistema para que ocorra o deslocamento. Essa força deve ser suficientemente grande para que sejam vencidas as forças de sentido contrário, que são a resistência ao rolamento e a carga na barra de tração. Essa interação se faz dentro de limites que são próprios das condições e tipo do terreno e do que o motor pode gerar em torque, dependendo, é claro, das magnitudes de certas características do trator, como pneus, peso, e outros, e de características do terreno, como a sua capacidade em suportar esforços, que, por sua vez, depende de algumas condições temporais e espaciais, como, por exemplo, o seu conteúdo de água. Quando o solo não suporta o esforço aplicado, se produz o fenômeno denominado de patinagem, que ocorre pelo rompimento da porção de solo parcial ou total, que está na região entre as garras dos pneus, dependendo das condições explicadas anteriormente.

A definição de patinagem de uma roda motriz é definida por Linares (1996) como a variação da velocidade de deslocamento da roda com respeito a uma velocidade em uma condição de referência estabelecida (Equação 22). A velocidade na condição de referência denomina-se de teórica e nas condições de trabalho real.

$$\delta = \frac{(V_t - V_r)}{V_r} \cdot 100 \quad (22)$$

Onde:

$\delta$  = patinagem (%);

$V_t$  = representação de velocidade teórica ou de referência ( $\text{km.h}^{-1}$ );

$V_r$  = velocidade real ou de trabalho ( $\text{km.h}^{-1}$ ).

Outra forma de calcular a patinagem é pelos raios das rodas:

$$\delta = \frac{(r - r')}{r} \cdot 100 \quad (23)$$

Onde:

$\delta$  = patinagem (%);

$r$  = raio da roda em uma condição de referência (m)

$r'$  = raio da roda em uma condição de trabalho (m).

Independente da maneira selecionada para determinar patinagem, sempre deverá assumir-se como a mesma sendo uma perda de deslocamento da roda em relação a uma condição de referência, chamado também de patinagem positiva para diferenciar de certas condições em que ocorre a patinagem negativa ou deslizamento da roda, onde a distância percorrida é superior à condição de referência. A máxima potência na barra de tração normalmente é obtida sob condições de patinagem das rodas entre 8 e 15 por cento, dependendo das condições do solo (ASAE D497.4, 2003).

Através da aplicação da Lei de Coulomb, também se pode determinar cientificamente a patinagem, referida por diferentes autores, como Cervantes (1993) e Sanchez-Girón (1996). Essa lei estabelece que a ruptura do solo pelo esforço cortante tem lugar em um plano no qual a tensão tangencial cortante aplicada é igual à coesão das partículas do solo e a força de atrito que se gera pelo deslocamento relativo das duas superfícies que se formam depois da ruptura, podendo ser expressa pela modelagem matemática:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\phi \quad (24)$$

Sendo:



$\tau$  = tensão cortante que produz a ruptura do solo ( $\text{N.m}^{-2}$ );

$c$  = coesão do solo ( $\text{N.m}^{-2}$ );

$\sigma$  = tensão normal que suporta o solo no plano de ruptura ( $\text{N.m}^{-2}$ );

$\phi$  = ângulo de atrito interno entre as partículas do solo.

Segundo Sanchez-Girón (1996), os valores do ângulo de atrito interno variam entre zero e 10 graus, para solos argilosos, e a sua coesão entre 10 e 20  $\text{kN.m}^{-2}$ . Para os solos mais macios, como os arenosos, os valores estão entre 25 e 40 graus de ângulo de atrito interno e zero e 10  $\text{kN.m}^{-2}$  para a coesão.

Considerando-se a área do plano de ruptura como  $A$ , pode-se representar a força que atua na área de contato desta forma:

$$F_{t_s} = c \cdot A + N \cdot \tan\phi \quad (25)$$

Sendo:

$F_{t_s}$  = força tangencial que suporta o solo (N);

$c$  = coesão do solo ( $\text{N.m}^{-2}$ );

$A$  = área do plano de ruptura ( $\text{m}^2$ );

$N$  = força normal que suporta o solo (N).

Conhecendo-se a determinação dos parâmetros de solo que compõem o desempenho do trator agrícola, é possível modelizar a eficiência do mesmo em condições de trabalho.

O desempenho de tração de tratores agrícolas é caracterizado geralmente pela eficiência de tração e a relação de dinâmica da tração. A eficiência de tração é um parâmetro que define em percentagem a potência existente no eixo e que é disponibilizada em potência na barra de tração, influenciada pela relação de tração, resistência ao rolamento e pela patinagem (JENANE & BASHFORD, 2000).

A qualidade de trabalho de um trator pode ser expressa através da eficiência em tração, que é o quociente entre a potência disponível na barra de tração e a potência fornecida pelo motor.

$$TE = \frac{\eta_{BT}}{N} \quad (26)$$

Onde:

$TE$  = eficiência em tração;

$\eta_{BT}$  é a potência disponível na barra de tração;

$N$  é a potência fornecida pelo motor.

Segundo Schlosser (1996) e o que foi exposto anteriormente, a eficiência em tração também pode ser representada pelo produto das eficiências da patinagem, resistência ao rolamento e transmissão.

$$TE = \eta_t \times \eta_\delta \times \eta_k \quad (27)$$

Onde:

TE = eficiência em tração;

$\eta_t$  = eficiência da transmissão =  $N1 / N$ ;

$\eta_\delta$  = eficiência da patinagem =  $N'1 / N1$ ;

$\eta_k$  = eficiência da resistência ao rolamento =  $\eta_{BT} / N'1$ ;

N1 = potência disponível no eixo motriz,

N'1 = potência disponível na roda, descontada a patinagem.

A aderência é a força resultante que aparece entre as rodas e o terreno, resultado de forças localizadas na zona de contato roda-solo (SCHLOSSER, 1997). Sua magnitude depende da carga dinâmica que possui cada roda e da natureza e condições da zona de contato. As variáveis que representam a transformação desse peso aderente em força de tração, segundo Linares (1996), estão apresentados na forma de coeficientes, como pode-se ver a seguir:

$$\mu_t = \frac{F_t}{R_y} \quad (28)$$

Onde:

$\mu_t$  = coeficiente de força tangencial (decimal);

$F_t$  = força de tração (kgf);

$R_y$  = peso dinâmico (kgf).

$$\mu_n = \frac{Q}{R_y} \quad (29)$$

Onde:

$\mu_n$  = coeficiente dinâmico de tração (decimal);

Q é o esforço de tração na barra de tração (kgf);

$R_y$  é o peso dinâmico (kgf).

$$k = \frac{R_k}{R_y} \quad (30)$$

Onde:

$k$  = coeficiente de resistência ao rolamento (decimal);

$R_k$  = resistência ao rolamento (kgf);

$R_y$  = o peso dinâmico (kgf).

Embora, relacionar as propriedades e parâmetros do solo, com a eficiência tratória e o desempenho dos tratores tenha sido um dos mais importantes alvos investigados nos últimos anos, por outro lado, são poucos os trabalhos desenvolvidos estudando racionalizar as operações consumidoras de energia, principalmente, visando a mecanização agrícola que possui como sua principal fonte de potência o trator agrícola, capaz de realizar diversos trabalhos e em condições muito variadas. Sendo importante salientar que estas operações agrícolas utilizam expressiva quantidade de energia, mas que, no entanto, não é renovável, comprometendo o futuro energético da agricultura.

Foi verificado por Fernandes et al. (2008) que o plantio direto foi o sistema que proporcionou menor consumo de combustível, seguido pelo sistema de cultivo mínimo com grade de discos leve, preparo reduzido e preparo convencional, respectivamente. O plantio direto teve um custo energético de 52,72% do custo do sistema convencional e o cultivo mínimo foi de 77,52%, possibilitando economizar entre 1216,51 e 578,39 MJ ha<sup>-1</sup>, respectivamente, equivalente a 25,45 e 12,10 L de óleo diesel para cada hectare trabalhado. Por outro lado, Dallmeyer (1994) justifica a utilização do preparo reduzido em relação aos sistemas convencionais, por não inverter as leivas do solo, proporciona menor incorporação de resíduos vegetais em um menor número de operações, sendo vantajoso em função do menor custo do preparo e redução nas perdas de água e solo.

Considerando a grande extensão territorial e as condições climáticas favoráveis, Lopes et al. (2003) caracterizam a agricultura como tentáculos de grande importância econômica, fato este, que implica em grandes áreas cultivadas, de intensa utilização de tratores agrícolas e responsáveis por quase metade do custo por hectare. O mesmo autor ainda cita a necessidade de quantificar precisamente o consumo de combustível dentre as diversas operações executadas no campo como alternativa na redução das despesas.

Várias pesquisas têm demonstrado que o custo energético, especificamente o combustível em máquinas, representam alta porcentagem do custo energético total de produção na agricultura empresarial (FAO, 1990). Segundo Ibañes & Rojas (1994) o custo da maquinaria agrícola, fundamentalmente o combustível, varia entre 35 a 45% do custo total de produção.

Segundo Mialhe (1996), o consumo de combustível pode ser apresentado como unidade de volume por unidade de tempo ( $L \cdot h^{-1}$ ), em que não se considera a influência da variação da temperatura e nem relacionado com a potência desenvolvida. E ainda pode-se apresentar o consumo de combustível através da unidade de massa por unidade de tempo ( $kg \cdot h^{-1}$ ); nessa forma, apesar de considerar a influência da temperatura, também não contempla a potência; no entanto, a maneira mais técnica de apresentar o consumo é expressá-lo em unidade de massa por unidade de potência ( $g \cdot kWh^{-1}$ ), conhecida como consumo específico ou consumo por unidade de área trabalhada ( $g \cdot kWh^{-1} \cdot ha^{-1}$ ).

Na transmissão de potência do motor de tratores para a barra de tração, ocorrem perdas de energia que, dependendo das condições de operação do trator, podem atingir níveis bastante comprometedores de perda de potência apresentando condições inadequadas para a tração e causando um consumo excessivo de combustível pelo trator (GABRIEL FILHO et al., 2010).

Tanto na seleção de maquinaria para a realização de uma única operação quanto de uma frota de tratores necessários para a realização de operações múltiplas, em ambos os casos devem ser realizadas análises técnicas do desempenho da barra de tração e uma avaliação econômica de custos operacionais envolvidos, visando identificar uma solução de menores custos.

Os ensaios de tratores realizados em Nebraska são utilizados intensamente como fonte de comparação do consumo de combustível. Procedimentos para a realização deste ensaio visando determinar o consumo de combustível de tratores agrícolas são demonstrados em ASAE Standard S209.5 e realizados em organizações comprometidas com a imparcialidade nos resultados. Onde uma variedade de resultados é obtida para força de tração requerida na barra de tração e o respectivo consumo de combustível.

O consumo típico de combustível para uma operação específica segundo ASAE D497.2 é determinado em  $L/kW \cdot h$  e existindo uma relação de potência da TDP requerida por uma determinada operação em relação a máxima potência disponível na TDP ( $X$ ). Os modelos de equações de consumo de combustível expressos nas equações de 31 a 33 indicam ser 15% superiores ao desempenho típico do Trator de Ensaio de Nebraska, refletindo a perda de eficiência sob condições de campo:

$$\text{Gasolina} \quad 2,74X + 3,15 - 0,203 \sqrt{697X} \quad (31)$$

$$\text{Diesel} \quad 2,64X + 3,91 - 0,203 \sqrt{738X + 173} \quad (32)$$

$$\text{LPG (gás de petróleo liquefeito)} \quad 2,69X + 3,41 - 0,203 \sqrt{646X} \quad (33)$$

### 2.3.2 Modelos de predição de tração existentes

A realização de testes de potência de motores e ensaios em condições reais de trabalho é realizada desde o início da mecanização agrícola, buscando-se conhecer o rendimento dos tratores agrícolas (LINARES et al., 2006). Porém, foi no início do século XX em que houve um crescente interesse em se conhecer o rendimento dos tratores de uma maneira sistemática e rigorosa. E neste sentido, ensaios oficiais de tratores foram realizados na Universidade de Nebraska em 1923, buscando fornecer respostas aos usuários norte-americanos através de uma normalização que garantisse que os tratores apresentassem as especificações e características indicadas pelos fabricantes.

Os trabalhos publicados por Zoz (1970), marcaram o início das propostas sistemáticas de previsão do dimensionamento trator-implemento, estabelecendo um diagrama designado "Tractor Drawbar Performance Predictor Chart", fundado em conhecimentos teóricos e em resultados de ensaios de campo, com o qual permitia estimar a potência disponível na barra e as necessidades de lastro para tratores de duas rodas motoras. Para o autor é importante que pessoas que trabalham em todas as áreas de cultivos mecanizados, sejam elas engenheiros projetistas de máquinas, pesquisadores, agricultores e demais profissionais envolvidos possuam informações relativas ao desempenho de tratores no campo. Os primeiros ensaios para a barra de tração eram realizados em solos agrícolas, porém a dificuldade em transferir os resultados para os diferentes tipos de solo e condições de trabalho tornou necessário que os ensaios passassem a ser realizados em pistas de concreto. Mesmo sabendo-se que as condições de trabalho em um solo agrícola diferem substancialmente das de ensaios em pista (LINARES et al., 2006). Um dos primeiros trabalhos baseado em dados obtido por testes de desempenho de pneus em pistas de concreto foi realizado por Zoz (1970) visto que os projetos de novos tratores e equipamentos eram baseados em experiências passadas com unidades aceitáveis no campo em lugar de critérios reais de desempenho. Sendo este até então o principal motivo para a adoção desta metodologia devido à complexidade do problema de tentar relacionar todas as possíveis combinações de conjuntos mecanizados e diversos tipos de solos ao desempenho esperado dessas combinações.

Segundo Zoz (1997) progressos consideráveis vêm sendo obtidos, nas últimas décadas, no estudo da tração, explica, através do desenvolvimento de critérios para avaliar o desempenho do trator com base nos resultados de ensaio realizados em pista de concreto. Entretanto Gabriel Filho et al. (2008) cita a necessidade de maior quantidade de pesquisas

para avaliar o desempenho em tração sob condições de campo e, com isso, fornecer informações suficientes para que esse atributo seja estimado.

A modelagem do comportamento dos tratores por meio da adoção de teorias de predição do desempenho tem sua grande utilização atualmente por fabricantes de pneus e de tratores agrícolas, pois permite prever parâmetros como a patinagem, a força de tração, o coeficiente dinâmico de tração e, conseqüentemente a eficiência em tração importantes para o processo conceitual e de marketing de projetos. A base destas teorias segundo Souza Filho (2001) estão na caracterização do conjunto mecanizado e do solo.

Grandes são os desafios em modelar o sistema veículo-solo, devido à alta ocorrência de modelos não lineares, e ao elevado grau de incertezas quanto às interações entre veículo-solo. Outra dificuldade em modelar este sistema está na inabilidade para coletar dados experimentais do solo e suas propriedades para todos os ambientes de operação futuros.

A partir de então muitos trabalhos têm sido realizados na busca de se conhecer o desempenho das máquinas agrícolas disponíveis no mercado que possuem a função de tracionar os implementos, existindo uma tendência relacionada à linha de pesquisa, seja através do estudo das relações veículo-terreno de forma totalmente teórica, ou ainda por pesquisas que utilizam métodos semi-empíricos (BEKKER, 1956; WONG & REECE, 1967) e ainda, outras baseadas no índice de cone (introduzidas por Freitag, Wes e outros) que são as mais amplas. No entanto, as teorias de predição clássica são as de Wismer & Luth (Teoria da ASAE ou Cn), Brixius & Wismer (DEERE ou Bn) e Gee-Clough (NIAE ou MN) (SOUZA FILHO, 2001; LINARES et al., 2006), as quais serão descritas a seguir em seus pontos principais, para marcar e identificar os padrões adotados.

#### a) Teoria Cn ou ASAE

Desenvolvida em 1972 por Wismer, R. D. e Luth, H. através da Technical Center de John Deere em Waterloo (Iowa, EUA). As equações propostas são:

Parâmetros da relação solo-veículo: Número Característico da Roda (Cn).

$$C_n = \frac{(Cl \cdot b \cdot d)}{R_y} \quad (34)$$

Coeficiente de resistência ao rolamento (k)

$$k = \frac{1,2}{C_n} + 0,04 \quad (35)$$

Coeficiente de força tangencial ( $\mu_t$ )

$$\mu_t = 0,75.(1 - e^{-0,3.Cn\delta}) \quad (36)$$

Patinagem ( $\delta$ )

$$\delta = \frac{1}{0,3.Cn} \cdot \ln\left(\frac{0,75}{0,75 - \mu_t}\right) \cdot 100 \quad (37)$$

Onde:

Cn = número característico da roda;

Ry = peso exercido sobre a roda (kN);

b = largura da roda (m);

d = diâmetro da roda (m);

Cl = índice de cone do solo (kPa) e

$\delta$  = patinagem (%).

b) Teoria Bn ou DEERE

Desenvolvida por Brixius, W. W. & Wisler, R. D. (1975), também no Technical Center de Jonh Deere em Waterloo (Iowa, EUA). As equações propostas são:

Parâmetros da relação solo-veículo: Número Característico de Mobilidade (Bn).

$$Bn = Cn \cdot \frac{1 + 5 \cdot \frac{\Delta}{h}}{1 + 3 \cdot \frac{b}{d}} \quad (38)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta = \left(\frac{d}{2} - r_c\right) \cdot \frac{P_r}{P_{\text{máx}}} \quad (39) \\ h = \frac{d - d_{LL}}{2} \quad (40) \end{array} \right.$$

Coefficiente de resistência ao rolamento (k)

$$k = \frac{1}{Bn} + 0,04 + \frac{0,5 \cdot \delta}{\sqrt{Bn}} \quad (41)$$

Coefficiente de força tangencial ( $\mu_t$ )

$$\mu_t = 0,88.(1 - e^{-0,1.Bn}).(1 - e^{-7,5\delta}) + 0,04 \quad (42)$$

Patinagem ( $\delta$ )

$$\delta = \frac{1}{7,5} \cdot \ln \left\{ \frac{0,88 \cdot (1 - e^{-0,11 \cdot Bn})}{\left[ 0,88 \cdot (1 - e^{-0,11 \cdot Bn}) \right] + 0,04 - \mu t} \right\} \cdot 100 \quad (43)$$

Onde:

$Bn$  = número característico da mobilidade;

$\Delta$  = deflexão do pneu;

$h$  = altura da seção teórica (m);

$d_{LL}$  = diâmetro do aro (m);

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

$P_{m\acute{a}x}$  = peso máximo por roda (kgf);

$P_r$  = peso por roda durante os ensaios (kgf);

$b$  = largura da roda (m);

$d$  é o diâmetro da roda (m) e

$\delta$  = patinagem (%).

c) Teoria  $Mn$  ou NIAE

Desenvolvida por Gee-Clough, D. (1984), no National Institute of Agricultural Engineers Inglês (NIAE), atualmente AFRC. As equações propostas são:

Parâmetro da relação solo-veículo: Número de Mobilidade ( $Mn$ ).

$$Mn = Cn \cdot \sqrt{\frac{\Delta}{h}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{b}{2 \cdot d}} \quad (44)$$

Coefficiente de resistência ao rolamento ( $k$ )

$$k = 0,049 + \frac{0,289}{Mn} \quad (45)$$

Coefficiente de tração líquida ( $\mu_n$ )

$$\mu_n = \mu_{n\max} \cdot (1 - e^{-k' \cdot \delta}) \quad (46)$$

$$\mu_{n\max} = 0,796 - \frac{0,92}{Mn} \quad (47)$$

$$k' \cdot \mu_{n\max} = 4,838 + 0,061 \cdot Mn \quad (48)$$



Coeficiente de força tangencial ( $\mu_t$ )

$$\mu_t = \mu_n + k \quad (49)$$

Patinagem ( $\delta$ )

$$\delta = \frac{1}{k} \cdot \ln \left( \frac{\mu'_{nm\acute{a}x}}{\mu_{nm\acute{a}x} + k - \mu_t} \right) \cdot 100 \quad (50)$$

Onde:

Mn = número de mobilidade;

$\Delta$  = deflexão do pneu;

h é a altura da seção teórica (m);

b = largura da roda (m);

d = diâmetro da roda (m) e

$\delta$  = patinagem (%).

#### d) Teoria Cn Modificada

Hernandez (1998) cita a obtenção de resultados consistentes através de solos testados, entre 200 e 1200 kPa, ainda que somente para veículos de duas rodas através da teoria Cn. Considerando os resultados desta teoria, propôs-se uma alteração no coeficiente de patinagem original, isto é, a substituição do parâmetro A1. Conduzindo a uma melhoria significativa entre a comparação da predição e resultados experimentais. O mesmo procedimento operacional foi repetido em anos subsequentes, utilizando áreas previamente catalogadas para a predição (CATALÁN & LINARES, 1998). O ajuste entre a predição e a experimentação mantendo a equação original que une o coeficiente de tração ( $\mu_t$ ) com a patinagem ( $\delta$ ), possui assim, a única modificação no coeficiente numérico de patinagem (0,3). O ajuste busca um parâmetro A<sub>1</sub> que melhor ajuste a predição à experimentação:

$$\mu_t = 0,75 \cdot (1 - e^{A_1 \cdot Cn \delta}) \quad (50)$$

Enquanto no modelo original A<sub>1</sub> vale 0,3, este ajuste realizado propõe que o valor do parâmetro seja: 0,16 para um solo firme e 0,61 para solo solto.

Catalán (1993), também aplicou as modificações propostas por Cervantes (1993) em Madrid, na Espanha, para ensaios com simples tração e verificou resultados similares aos

obtidos anteriormente: com a teoria Mn apresentando os melhores resultados de predição, porém apresenta maior complexidade, enquanto as teorias Cn e Bn, apresentam menor confiabilidade. Ao realizar modificações para os coeficientes de Cn este autor também observou uma significativa melhora nos resultados das simulações pela ASAE, verificando que as três teorias apresentam uma grande sensibilidade aos valores de índice de cone e aos esforços de tração, sendo a teoria MN a que apresentou menor sensibilidade a variação deste índice.

A ASABE disponibiliza através da ASAE D497.4 (2003) importantes dados como parâmetros de máquinas agrícolas servindo de auxílio para administradores de propriedade agrícolas e projetistas de máquinas na busca por conhecimento sobre o desempenho de tratores em campo através da informação de valores típicos como exigências de potência de implementos, consumo de combustível obtidos por experimentos, modelagens ou pesquisas. Apresentando primeiramente as seguintes definições:

Resistência ao rolamento, MR (como definido na ASAE S296) é igual à diferença entre tração global (GT) e tração líquida (NT).

$$MR = GT - NT = W \cdot \left( \frac{1,2}{C_n} + 0,04 \right) \quad (51)$$

Onde:

$$C_n = \frac{C_l \cdot b \cdot d}{R_y} \quad (52)$$

Cn = índice adimensional;

Ry = peso dinâmico sobre a roda em unidade de força sobre a superfície do solo;

CI = índice de cone para o solo (ASAE S313);

b = largura de seção do pneu sem carga;

d = diâmetro total do pneu sem carga.

A relação de resistência ao rolamento ( $\rho$ ) é uma relação entre a resistência ao rolamento e a carga dinâmica da roda.

$$\rho = \frac{MR}{W} \cdot \left( \frac{1,2}{C_n} + 0,04 \right) \quad (53)$$

Tração líquida (P) (ASAE S296):

$$P = 0,75W \cdot (1 - e^{-3 \cdot Cn \cdot s}) \cdot W \cdot \left( \frac{1,2}{Cn} + 0,04 \right) \quad (54)$$

Onde:

s = patinagem (decimal);

e = base de logaritmos naturais.

Predição de patinagem (s) (decimal):

$$s = \frac{1}{0,3 \cdot Cn} \cdot \ln \left[ \frac{0,75}{0,71 - \left( \frac{P}{W} \right) - \left( \frac{1,2}{Cn} \right)} \right] \quad (55)$$

Eficiência de tração (TE):

$$TE = \frac{(1 - s) \cdot \left( 1 - \frac{1,2}{Cn} + 0,4 \right)}{0,75 \cdot (1 - e^{0,3 \cdot Cn \cdot s})} \quad (56)$$

A força exigida para tracionar as semeadoras e implementos que trabalham com pouca profundidade no solo depende principalmente da largura e velocidade de trabalho. Para implementos que possuem suas ferramentas que trabalham a profundidades maiores, a força de tração depende também da textura do solo, profundidade de trabalho e geometria da ferramenta.

Entre importantes trabalhos realizados no Brasil pode-se citar Souza Filho (2001) que realizou comparações entre teorias de predição do desempenho da tração de trator agrícola, desenvolvidas por Wismer, Brixius e Gee-Clough e concluiu que as teorias são adequadas como ferramenta de simulação, porém, também se deve pesquisar diferentes teorias para o uso no meio brasileiro, avaliando-se o modelo que pode adaptar-se mais facilmente e para quais condições de trabalho este é mais preciso.

Estudando a simulação de desempenho de tratores em trabalhos de preparo do solo Serpa (1997) desenvolveu um modelo matemático em que a simulação foi realizada pela Teoria Cn, a qual avaliou bem o comportamento dos mesmos em uma faixa de patinagem entre oito e 18 % e verificou que o modelo mostrou-se adequado para arado de discos, arado de aivecas e implementos de hastes, no entanto, não verificou o mesmo resultado positivo para o comportamento de grades de discos.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 6 apresenta um fluxograma com o resumo dos objetivos a serem alcançados e os materiais e metodologias utilizadas para esta finalidade.

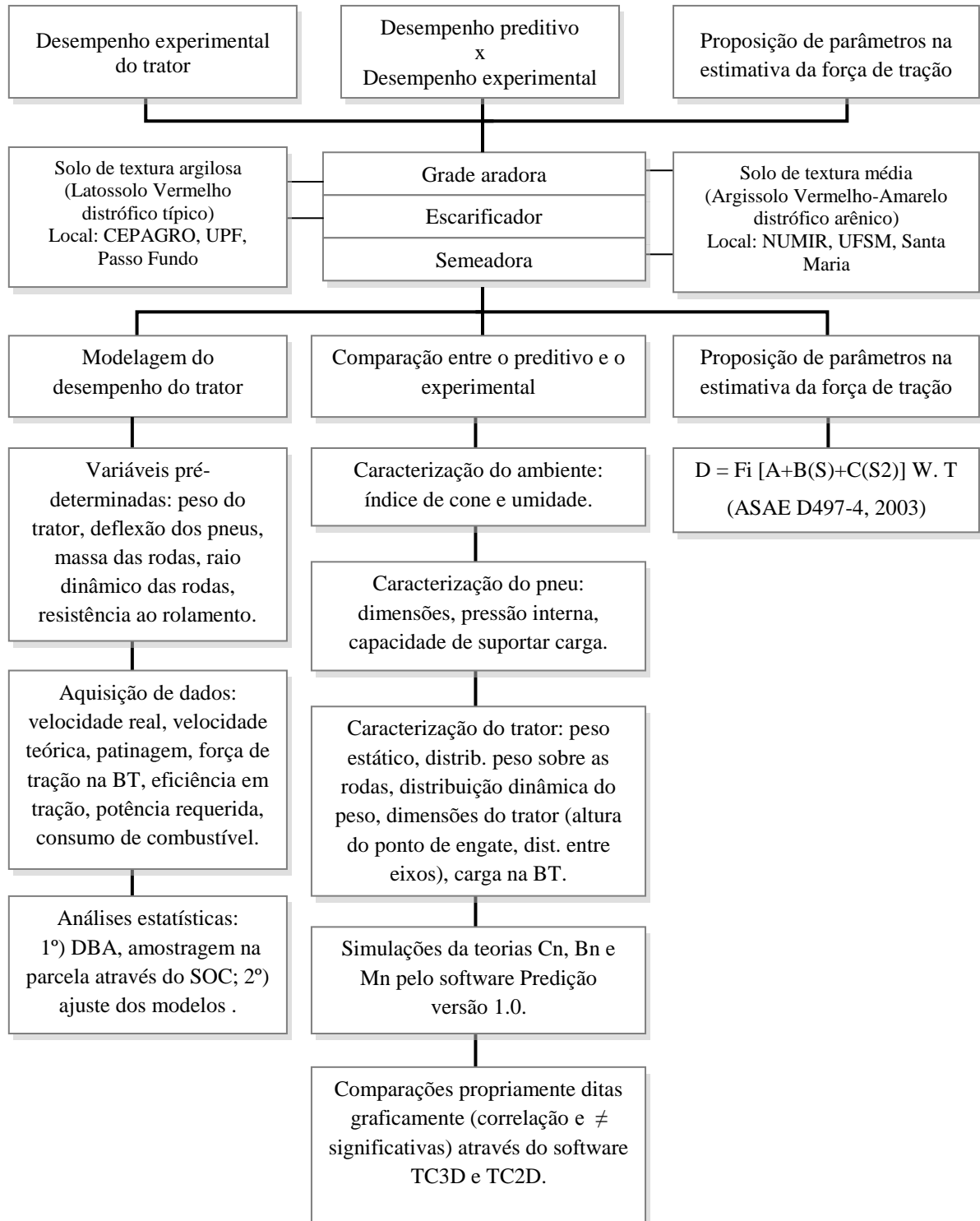


Figura 6 - Fluxograma de atividade e metodologias desenvolvidas.

### 3.1 Material

#### 3.3.1 Conjuntos mecanizados

Buscou-se caracterizar operações agrícolas representativas das regiões produtoras de grãos do Estado do Rio Grande do Sul, principalmente para as culturas de soja e arroz, consideradas de expressiva produção agrícola, com 3,82 e 1,10 milhões de hectares, respectivamente, colhidos no Estado na safra 2008/09 (CONAB, 2010), através da coleta de dados experimentais com a utilização de uma semeadora-adubadora, grade aradora e escarificador.

##### a) Semeadora-adubadora

Utilizou-se uma semeadora-adubadora da marca Sfil, modelo PSMT 5311-A, de arrasto, composta por cinco linhas, equipada com discos duplos desencontrados para a deposição de sementes e adubos e hastes sulcadoras, peso de 1050 kg enquanto vazia. Para adequar a medição da demanda energética à situação real, utilizaram-se lastros metálicos de 800 e 420 kg, respectivamente de acordo com o peso admitido nos depósitos de adubo e semente.

##### b) Grade aradora

Foram utilizados dois modelos de grade aradora, de marcas distintas.

O modelo GR, composto por 18 discos ABNT nº 26, marca Baldan, largura de corte de 2000 mm, e massa total de 1200 kg. O segundo modelo utilizado foi GA, com 22 discos ABNT nº 26, da marca Tatu, com largura de corte de 2420 mm e massa total de 1683 kg. Ambos os modelos por sistema de arrasto.

Foi realizada a adição de lastros metálicos visando avaliar a influência da variável massa da grade sobre a determinação do modelo da força de tração, alcançando massa total da grade de 1200 kg (sem lastros), 1448 e 1680 kg (com lastros).

##### c) Escarificador:

Utilizou-se o escarificador modelo Jumbo Matic, marca Jan, de arrasto, composto por cinco hastes, rolo destorroador/nivelador e regulagem da profundidade de trabalho através da articulação das rodas, acionado pelo sistema hidráulico de controle remoto do trator. A amplitude da profundidade foi determinada pela quantidade de calços limitadores de curso, localizados nas hastes dos dois cilindros hidráulicos.

### 3.1.2 Equipamentos utilizados para a instalação do experimento

Para caracterizar o ambiente de trabalho em campo foi necessária a utilização dos seguintes equipamentos apresentados no Quadro 1.

Avaliação	Equipamento	Especificações
Teor de umidade do solo	Sonda TDR	Eletrônica integrada da marca Imko, modelo Trime-EZC, que apresenta numa faixa de umidade de até 40% uma precisão de $\pm 3\%$ e a alimentação de 7V a 15V DC.
Posicionamento das parcelas	GPS de navegação	Marca Garmin, modelo GPSmap 60CS no trator e software para confecção dos mapas de georreferenciamento em campo Trackmaker.
	Mapas de georreferenciamento	Software “Sistema Agropecuário CR – Campeiro 6”, desenvolvido pelo setor de Geomática do Departamento de Engenharia Rural pertencente à Universidade Federal de Santa Maria.
Resistência à penetração do solo	Penetrômetro gráfico	Marca Falker, modelo penetroLOG PLG1020, conectado a um Sistema de Posicionamento Global (GPS), com uma profundidade máxima de penetração de 400 mm e capacidade de memória de até 2.000 medições, comprimento total da haste de 870 mm e protocolo de comunicação com receptor GPS NMEA 0183.
Resistência ao	Trator freio	Marca Massey Ferguson, modelo 291, potência de

rolamento		100 cv.
Amostras físicas do solo	Densidade do solo	Amostrador tipo “Uhland” com cilindros de aço inoxidável com 76 mm de diâmetro e 76 mm de altura (volume de 344,59 cm <sup>3</sup> ).

**Quadro 1 - Equipamentos utilizados para a caracterização da área experimental.**

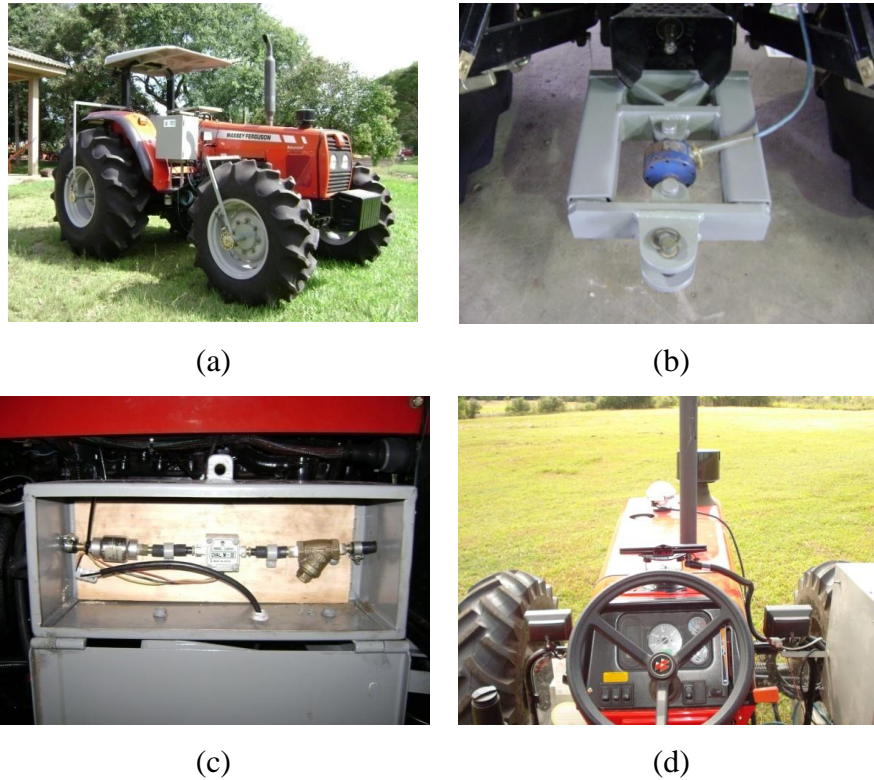
### 3.1.3 Parâmetros para modelagem do rendimento experimental dos conjuntos mecanizados

Para a obtenção dos parâmetros relativos ao rendimento experimental do conjunto mecanizado para modelagem foi necessária a utilização dos seguintes equipamentos apresentados no Quadro 2 e na Figura 7.

Avaliação	Equipamento	Especificações
Força de tração	Célula de carga	Marca Alfa, com capacidade de 5.000 a 10.000 N (Figura 11b).
Consumo de combustível	Fluxômetro	Marca Oval (LSN4IL8-M2), modelo Flowmate oval-M III, o qual é composto por duas engrenagens onde uma delas possui um ímã que sensibiliza um sensor indutivo a cada volta (1 ml de volume deslocado) (Figura 11c).
Patinagem das rodas motrizes	Sensores indutivos	Um sensor por roda modelo LM12-3004PC.
	Receptor de sinais de satélites (GPS)	Marca Trimble, sistema de barra de luzes (Figura 11d).
Eficiência em tração	Célula de carga, Sensores indutivos de rodas e receptor de sinais de satélites.	Determinada de forma indireta pela obtenção de dados de patinagem e força de tração.

**Quadro 2 - Parâmetros de rendimento dos conjuntos mecanizados e equipamentos utilizados na coleta dos dados.**

Cada parâmetro estudado foi processado em planilhas de cálculo e por sua vez analisado pelo programa estatístico “Software Científico SOC - NTIA/Embrapa (1989)”.



**Figura 7 - Instrumentação de aquisição eletrônica de dados instalada no trator (a), célula de carga (b), fluxômetro (c) e GPS (d).**

#### 3.1.4 Estimativa dos parâmetros de rendimento estimado dos conjuntos mecanizados

As teorias de predição de tração utilizadas neste trabalho foram as de Wismer e Luth (Cn), Brixius (Bn) e Gee-Clough (Mn).

Para comparar o desempenho das diferentes teorias, utilizou-se o programa informático Predição versão 1.0, disponível no Núcleo de Ensaios de Máquinas Agrícolas para predição da tração e patinação das rodas do trator utilizando modelos matemáticos.

Para selecionar o modelo representativo estatisticamente e a sua representação gráfica para os parâmetros estudados, realizou-se a simulação dos diferentes modelos matemáticos com auxílio do programa computacional Table Curve 2D v.2.03 (Jandel Scientific) e Table Curve 3D v.1.06 (Jandel Scientific), capazes de oferecer informações para a predição empírica.



### 3.1.5 Proposição de coeficientes de força de tração para os implementos

Utilizou-se o programa computacional Table Curve 2D v.2.03 (Jandel Scientific) para fornecer a análise da variância e modelos de melhor ajuste, com respectivos coeficientes A, B e C para a variável velocidade de deslocamento aplicados no modelo proposto pela ASAE D497-4 (2003) para a determinação da força de tração requerida pelo implemento.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Dimensionamento dos implementos

Os implementos foram dimensionados segundo o método técnico citado pela ASAE D497.4 (2003) com a aplicação da Equação 10 apresentada no capítulo anterior. Sendo as médias obtidas de forma geral, independentes dos diferentes tratamentos aplicados (profundidade de trabalho, massa da grade ou velocidade de deslocamento) para todos os implementos.

Foi utilizado como trator teste o modelo MF 292RA/16x8 Advanced da marca Massey Ferguson, com potência bruta no motor de 105 cv a 2200 rpm, uma caixa de seleção com 16 marchas e 8 velocidades à frente, com tração TDA. Segundo a disponibilidade de potência bruta no motor do trator, determinou-se a potência líquida e a potência disponível na barra de tração, desconsiderando alguma reserva de potência para todas as operações, ou seja, a potência líquida foi considerada a potência disponível na barra de tração.

Os valores de força de tração requerida pelos implementos estão apresentados na Tabela 2. A partir da força de tração determinou-se a potência requerida para cada implemento através da equação 03, citada no item 2.2 da revisão bibliográfica.

A seleção dos implementos foi realizada segundo dois critérios: a) disponibilidade de uso e, b) dimensionamento do trator.

**Tabela 2 - Parâmetros de força de tração para máquinas e implementos (ASAE D497.4, 2003), segundo as texturas de solo argilosa (F<sub>1</sub>) e média (F<sub>2</sub>), os parâmetros da máquina (A, B), a velocidade de deslocamento (S), a largura do implemento (W) e profundidade de trabalho (T).**

Implemento	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	Parâmetros da máquina		S (km/h)	W	T (cm)
			A	B			
Semeadora	-	0,96	3400	0	3,5	5 linhas	1
	-	0,96	3400	0	4,4	5 linhas	1
	-	0,96	3400	0	5,3	5 linhas	1
	-	0,96	3400	0	6,4	5 linhas	1
Grade aradora	-	0,88	364	18,8	3,4	2,00 metros	12
	-	0,88	364	18,8	4,5	2,00 metros	12
	-	0,88	364	18,8	5,6	2,00 metros	12
	-	0,88	364	18,8	6,9	2,00 metros	12
	1,0	-	364	18,8	3,2	2,42 metros	12
	1,0	-	364	18,8	4,2	2,42 metros	12
	1,0	-	364	18,8	5,3	2,42 metros	12
	1,0	-	364	18,8	6,4	2,42 metros	12
Escarificador	1,0	-	107	5,3	2,9	5 hastes	20
	1,0	-	107	5,3	3,8	5 hastes	20
	1,0	-	107	5,3	4,8	5 hastes	20
	1,0	-	107	5,3	6,4	5 hastes	20
	1,0	-	107	5,3	2,9	5 hastes	25
	1,0	-	107	5,3	4,0	5 hastes	25
	1,0	-	107	5,3	5,1	5 hastes	25
	1,0	-	107	5,3	5,9	5 hastes	25
	1,0	-	107	5,3	2,9	5 hastes	30
	1,0	-	107	5,3	3,9	5 hastes	30
	1,0	-	107	5,3	5,4	5 hastes	30
	1,0	-	107	5,3	5,8	5 hastes	30

Fonte: Extraído e adaptado da ASAE D497.4 (2003)

### 3.2.2 Instalação do experimento

Este trabalho foi desenvolvido em solos pertencentes à duas unidades de mapeamento do Estado do Rio Grande do Sul: Santa Maria e Passo Fundo, que apresentam texturas predominantemente arenosas e argilosas, respectivamente.

A primeira unidade de mapeamento do solo localiza-se na área experimental do Núcleo de Microirrigação (NUMIR), pertencente ao Departamento de Engenharia Rural, da UFSM, no município de Santa Maria, RS, latitude de 29°43' Sul, longitude de 53°43'

Oeste e altitude de 95 metros. O solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (EMBRAPA, 1999), de textura predominantemente arenosa (Tabela 3). O manejo da área experimental consistia em sistema de pastagem no inverno de aveia e azevém com carga animal de ovinos durante os últimos três anos. A área total utilizada foi de um hectare.

A segunda localiza-se no Centro de Extensão e Pesquisa Agropecuária da Universidade de Passo Fundo no município de Passo Fundo, uma região com altitude média de 700 m acima do nível do mar e com coordenadas 28° 12' Sul e 52° 23' Oeste. O solo da área experimental pertence à Unidade de Mapeamento Passo Fundo, classificado como C, relevo ondulado e substrato basalto, de textura predominantemente argilosa (Tabela 3). A área vinha sendo conduzida sob sistema plantio direto contínuo por um período de dez anos com a seguinte seqüência de culturas: 1997/98 azevém-soja, 1998/99 azevém-milho, 1999/00 cevada-soja, 2000/01 azevém-soja, 2001/02 azevém-milho, 2002/03 azevém-soja, 2003/04 azevém-soja, 2004/05 azevém-soja, 2005/06 azevém-milho, 2006/07 azevém-milho, 2007/08 aveia-soja, 2008/09 aveia-soja. Sendo utilizado um hectare da área experimental.

**Tabela 3 - Valores médios das características físicas do solo limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP) e análise granulométrica.**

Profundidade de coleta (cm)	LL	LP	IP	Areia	Silte	Argila
	----- % -----			----- g kg <sup>-1</sup> -----		
Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico						
0 - 20	30,50	22,25	6,5	386,9	395,3	217,7
20 - 40	30,25	23,25	6,75	350,7	372,3	276,8
Latossolo Vermelho Distrófico típico						
0 - 20	42,25	32,25	16,75	334,7	142,5	522,8
20 - 40	42,50	31,75	16,25	313,3	119,8	566,9

Para caracterizar as áreas foi coletado um total de oito pontos georreferenciados, sendo o mapeamento da mesma realizado com um GPS de navegação, com o qual se demarcou os vértices da área para posterior produção do mapa e da malha de amostragem. A malha de amostragem utilizada tinha um espaçamento de 25 x 25 metros, caracterizando oito pontos

por hectare, sendo o mesmo determinado e georreferenciado através do software “Sistema Agropecuário CR – Campeiro 6”.

Utilizou-se amostras com estrutura preservada, para a determinação da densidade aparente do solo e retenção de água, foram coletadas as amostras nas profundidades de 0 a 10 cm; 10 a 20 cm; 20 a 30 cm e 30 a 40 cm, visando caracterizar a profundidade trabalhada pelos implementos, com o auxílio de um amostrador do tipo “Uhland”, utilizando cilindros de aço inoxidável. Juntamente retiraram-se amostras com estrutura não preservada para a determinação da granulometria, limites de liquidez e índice de plasticidade, nas profundidades de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm, através da abertura de trincheiras. Previamente cada ponto amostrado na malha era limpo, retirando-se galhos, pedras e vegetação mais superficiais, para posterior amostragem do solo. As amostras deformadas foram coletadas com pá de corte nas duas profundidades citadas anteriormente, utilizando-se somente a terça parte central da largura da pá e retirando-se o excedente, com comprimento total de 20 cm por camada.

As medições da densidade aparente do solo (Tabela 4) foram realizadas pelo método do cilindro volumétrico, nas camadas de 0-10; 10-20; 20-30 e 30-40 cm, secas em estufa a 105°C durante 48 horas e após pesadas em balança de precisão para ser determinada através da seguinte equação:

$$D_a = \frac{M}{V} \quad (57)$$

Onde:  $D_a$  é a densidade aparente do solo em  $g/cm^3$ ;  $M$  a massa em gramas e  $V$  o volume de centímetros cúbicos ocupados pelas partículas e pelos poros.

**Tabela 4 - Valores médios de densidade aparente do solo, umidade do solo e índice de cone.**

Profundidade de coleta (cm)	Densidade do solo ( $kg\ dm^{-3}$ )	Umidade do solo (%)	Índice de cone (kPa)
Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico			
0 - 10	1,49	19,3	375,10
10 - 20	1,63	22,2	1346,58
20 - 30	1,67	24,7	1198,70
30 - 40	1,74	24,5	1049,65
Latossolo Vermelho Distrófico típico			
0 - 10	1,55	29,5	771,27
10 - 20	1,57	31,5	1551,86
20 - 30	1,39	34,5	1602,47
30 - 40	1,41	35,0	1865,55

A umidade gravimétrica das amostras foi obtida através da pesagem dos cilindros volumétricos utilizados para determinação da densidade aparente do solo, as amostras foram armazenadas nos cilindros e pesadas. Depois de 48 horas em estufa a 105° C, foram pesadas novamente e calculada e a umidade gravimétrica conforme EMBRAPA (1997), que estabelece a seguinte relação matemática para determiná-la:

$$U_g = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} \cdot 100 \quad (58)$$

Onde:  $U_g$  é o teor de água do solo (%);  $P_u$  é o peso da amostra úmida (g);  $P_s$  é o peso da amostra seca (g).

A composição granulométrica foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L<sup>-1</sup>) e agitação lenta por 16 horas (30 rpm), sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (Tabela 3), seguindo a rotina do Laboratório de Análises Físicas do Solo da UFSM.

Na camada de 0-20 e de 20 – 40 também se determinou o limite de liquidez, limite de plasticidade e o índice de plasticidade pelo método Casagrande (SOWERS, 1965).

Ao mesmo tempo com o auxílio de uma sonda TDR com eletrônica integrada foi feita uma malha de umidade com informações georreferenciadas do teor de umidade e resistência à penetração, constituída pela média de duas sub-amostras por ponto amostrado.

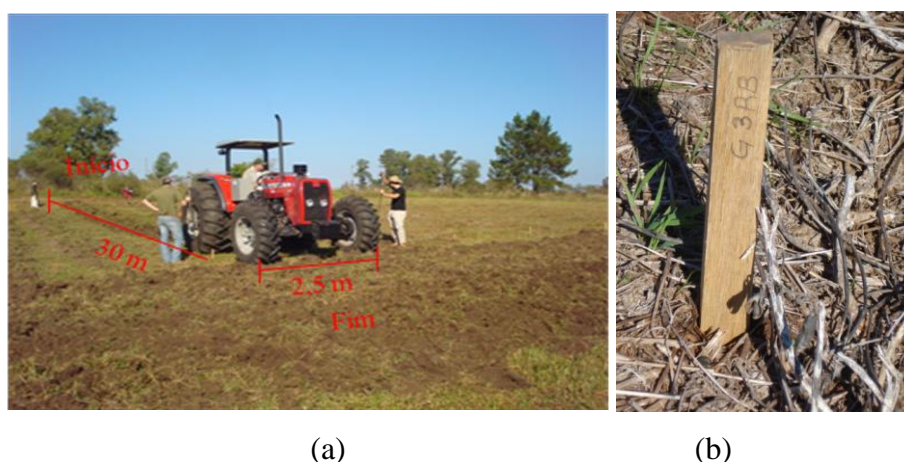
A resistência a penetração foi obtida para cada ponto georreferenciado através da obtenção do índice de cone (Figura 10g), por este ser o componente do solo na simulação matemática do comportamento do trator. A medida foi realizada através de um penetrômetro gráfico, conectado a um GPS, a uma profundidade máxima de penetração de 40 cm, com capacidade de memória de até 2.000 medições, comprimento total da haste de 870 mm e protocolo de comunicação com receptor GPS NMEA 0183, utilizando a mesma malha de amostragem da sonda TDR, para armazenar as coordenadas de cada ponto onde foram executadas as medições. De acordo com as dimensões, funcionamento e procedimento de medida dos dados estabelecidos pela norma ASAE S313.2. Após a tomada de campo, os gráficos foram analisados em escritório gerando os valores de esforços de penetração e os índices de cone. A medida foi realizada antecedendo a passada do conjunto mecanizado.

Cada uma das parcelas foi demarcada no campo segundo o sentido do trajeto do conjunto mecanizado (Figura 8a), com comprimento de 30 metros e largura de três metros. A orientação dos trajetos de trabalhos se deu no comprimento da parcela deixando uma área no início e outra no final da cabeceira, para recuperação de 10 metros, suficientes para a manobra dos conjuntos mecanizados. A identificação dos dados coletados no software PC400w® foi

possível através da cronometragem e indicação do período (horas, minutos e segundos) de duração da passagem de cada tratamento. Em cada extremidade da parcela permanecia um elemento da equipe experimental que registrava o momento da passagem total do conjunto mecanizado.

A disposição dos blocos foi selecionada segundo a maior homogeneidade dentro do bloco para as características índice de cone, umidade do solo e as resistências oferecidas ao conjunto motomecanizado durante o trajeto na parcela, sendo esta última característica aquela que mais influenciou na alocação dos blocos, evitando principalmente que um gradiente acentuado de nivelamento da área pudesse interferir na coleta de dados, sabendo-se que a resistência ao rolamento é uma das variáveis diretamente responsável pela relação solo-máquina.

A tomada de dados pela instrumentação do trator era interrompida ao chegar ao final dos 30 metros de trajeto pela parcela numa marca estabelecida por balizas, recomeçando a coleta de dados a partir da próxima marca inicial para a próxima repetição do tratamento em novo bloco. A interrupção da coleta de dados foi realizada ao desligar o receptor de sinais por satélite (GPS), tornando possível a identificação do período registrado pelos elementos da equipe responsáveis pela marcação do mesmo e a sua localização nos dados armazenados pelo datalogger. Sempre que todas as repetições para cada tratamento eram concluídas repetia-se o processo com outro tratamento ligando novamente o receptor de sinais e a sua estabilização. Cada parcela possuía em seu início de trajeto estacas com a identificação do tratamento aplicado, servindo também como orientação para o operador e demais participantes responsáveis pela coleta de dados (Figura 8b).



**Figura 8 - Parcela experimental seguindo o trajeto do conjunto mecanizado (a) e estaca demarcadora de tratamento/parcela (b).**

### 3.2.3 Modelagem do desempenho experimental do trator

#### 3.2.3.1 Variáveis pré-determinadas

Foram utilizados ensaios de campo auxiliares que serviram para medir a resistência ao rolamento. O Quadro 3 apresenta as características dos rodados utilizados. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de obter o valor da resistência ao rolamento do conjunto mecanizado nas condições de experimentação, peso do trator, deflexão dos pneus, o raio dinâmico das rodas e massa das rodas.

Rodas	Raio estático (m)	Raio dinâmico (m)	Perímetro (m)	Diâmetro da roda (m)	Largura (m)	Diâmetro do aro (m)	Peso (kg)	Pressão (bar)	Peso máx. roda (kg)
Traseiras	0,71	0,77	4,89	1,54	0,48	0,81	3200	1,6	1995,80
Dianteiras	0,59	0,61	3,7	0,8	0,2	0,4	1920	1,6	1360,00

**Quadro 3 - Características dos rodados dianteiros e traseiros.**

#### a) Massa do trator

O trator foi equipado com rodados dianteiros marca Pirelli, modelo 14.9-26R1, modelo TM95 e os traseiros de marca Firestone 23.1-30R1, modelo Shock Fortified. Foi feita a instalação dos equipamentos de aquisição dos dados e colocados os pneus selecionados para os ensaios, sendo que estes continham água até  $\frac{3}{4}$  do volume total. Prosseguindo, o trator foi levado para pesagem em uma balança com uma precisão de  $\pm 15$  kg. A pesagem se deu segundo a distribuição do peso sobre os eixos, sendo realizada a pesagem do eixo dianteiro, do eixo traseiro e do peso total do trator apresentada pela Figura 9.



**Figura 9 - Determinação da massa total (a), do eixo dianteiro (b) e do eixo traseiro (c) para dimensionamento da distribuição do peso.**

b) Deflexão dos pneus

A deflexão dos pneus varia conforme o peso que gravita sobre a roda e a pressão interna do pneu. As medidas estáticas estavam de acordo com a norma ASAE S296.3 (1995). Determinando a linha central do eixo, com o auxílio de uma régua específica, composta de uma haste vertical com escala métrica, fixa em uma base, com duas outras hastes horizontais móveis no sentido vertical (Figura 10). Mediram-se as distâncias dessa linha imaginária até o solo, e determinou-se o raio estático deflexionado. Mediu-se a distância da linha central até o topo do pneu, o que origina o raio estático não deflexionado. Correlacionando as duas medidas, tem-se a deflexão do pneu naquela determinada condição, dada pela seguinte relação:

$$\Delta = \frac{(\text{Rend} - \text{Red})}{\text{Rend}} \cdot 100 \quad (59)$$

Onde:

$\Delta$  = deflexão;

Rend = raio estático não deflexionado e

Red = raio estático deflexionado.





**Figura 10 - Equipamento auxiliar de medição dos parâmetros dos pneus.**

c) Massas das rodas

As massas das rodas foram igualadas, adicionando-se ou retirando-se o lastro líquido de maneira que as rodas não apresentaram diferenças de massas entre as rodas testadas. Este procedimento foi realizado antes do início dos testes, retirando as rodas do trator e pesando-as individualmente.

d) Raio dinâmico das rodas

Buscando maior segurança na tomada dos dados, o raio dinâmico das rodas foi medido para se obter uma comparação prática, além, daquelas apresentadas nas especificações técnicas (catálogos). Sua aplicação foi necessária para a predição da transferência de peso do eixo direcional (dianteiro) para o eixo motriz (traseiro) no ambiente do software Predição 1.0 e na determinação da patinagem. Essas medidas foram tomadas em uma condição padrão de alta resistência à penetração e com o mínimo de resistência ao rolamento, em uma estrada com superfície homogênea, praticamente em nível, aproximando-se a um solo compactado, conferindo-lhe baixa rugosidade superficial. Os procedimentos de mensuração foram: determinar uma marca sobre o pneu; com essa referência, mediu-se a distância percorrida em cinco voltas do pneu e dividiu-se a distância percorrida pelo número de voltas do pneu; com o

trator na primeira marcha e 1300 rpm, proporcionando uma velocidade de deslocamento bastante baixa para que ocorresse o mínimo de alterações possíveis no seu comportamento.

e) Resistência ao rolamento: Os valores de resistência ao rolamento foram obtidos com a célula de carga instalada no trator freio e na outra extremidade ligada ao cabo de aço que por sua vez foi acoplado no engate do trator de testes. O trator de teste ficava deslocado da linha central do trator freio, para que não ocorresse coincidência dos locais de passagem dos pneus dos dois tratores. Pelo sensor acoplado ao trator teste foi sendo realizado registro instantâneo pelas leituras de cargas, representando os valores de resistência ao rolamento do trator teste, que estava com o motor ligado, as marchas no neutro e diferencial bloqueado.

Depois de superar a fase pré-experimental, de preparação e caracterização do solo onde se desenvolveram os ensaios de resistência ao rolamento passou-se ao desenvolvimento dos ensaios de campo, exigindo um delineamento experimental capaz de permitir a análise posterior dos resultados obtidos em cada tratamento.

### 3.2.3.2 Aquisição de dados

Os dados captados pelos sensores instalados no trator foram transmitidos a uma central e posteriormente armazenados. O equipamento que foi utilizado é um datalogger, modelo CR 1000 da Campbell Scientific, sendo este um gravador de dados eletrônicos, que armazena os dados de sensores em um intervalo de tempo pré-definido ou conforme uma lógica de programação interna ou ainda conforme um comando externo. Após os dados de força de tração na barra, velocidade real, frequência de giro das rodas e consumo de combustível serem armazenados estes eram transmitidos a um computador e interpretados pelo software PC400W®, desenvolvido para este fim.

#### a) Patinação ( $\delta$ )

A medida da velocidade teórica das rodas foi realizada através da instalação de sensores para medida da rotação das rodas motrizes, composto por quatro rosetas com dez pinos cada que são fixadas pelo lado de fora do aro dos pneus através de suportes. Cada roseta

possuía um sensor de pulsos onde cada pino ao passar pelo sensor contava um pulso, e ao final de dez pulsos contava uma volta completa da roda.

A velocidade teórica de deslocamento em km/h se determinou mediante a seguinte expressão incluída também no programa.

$$V_t = 3,6 * \omega * r \quad (60)$$

Onde:  $\omega$  é a velocidade angular da roda, a qual se determinou pelo programa em função do número de pulsos que recebe do sensor e a constante que se introduz segundo o número de pares de ímãs que se colocam ao redor do cubo da mesma,  $s^{-1}$ ;  $r$  é o raio de referência o raio dinâmico da roda (condição de referência), m; 3,6 é o fator de conversão a km/h.

A velocidade real, ou seja, a velocidade de deslocamento foi medida por meio do receptor de sinais de satélites (GPS), da marca Trimble, pelo sistema de barra de luzes, instalado no trator e que enviava as informações ao datalogger para a aquisição de dados. A escolha pela instalação da barra de luzes neste trabalho ocorreu após estudo realizado por Russini (2009), que constatou quedas e aumentos muito rápidos na velocidade durante o deslocamento do conjunto mecanizado e conseqüentemente, a aceleração e desaceleração do trator, atenuantes no retardo da obtenção dos valores de velocidade pelo receptor de GPS, reduzindo sua precisão instantânea. Para conferir os valores tomados pela instrumentação foram tomados dados de velocidade que foram calculados de acordo com o tempo que o trator de ensaio demorou para percorrer 20 metros centrais das parcelas.

Para medição da patinagem das rodas foram utilizados quatro sensores indutivos modelo LM12-3004PC que medem a velocidade instantânea e real das rodas, sendo a patinagem calculada da seguinte forma:

$$\delta = \frac{V_t - V_r}{V_t} \cdot 100$$

(61)

Onde:

$V_t$  = velocidade teórica de deslocamento ( $km\ h^{-1}$ );

$V_r$  = velocidade real de deslocamento (sinal do GPS) ( $km\ h^{-1}$ );

$\delta$  = patinagem (%).

Também se utilizou de um segundo método de avaliação da patinação, com o objetivo de controlar a qualidade do experimento e ao mesmo tempo atuar como forma de medida auxiliar no caso de perda de dados.

Para isto foram utilizados jogos de balizas que permitiram fazer a medição de forma contínua dado que o conjunto de tratores não parasse a cada passada. A medida tomada foi distintamente na roda direita ou esquerda dado que em todos os casos o bloqueio do diferencial do trator estava ativado. Para a anotação dos valores de campo foram empregadas fichas para a tomada de dados.

b) Força de tração na barra ( $F_t$ )

Os valores registrados de força de tração pela célula de carga eram obtidos em unidade de kgf. A unidade quilograma-força (kgf) ainda é usada no Brasil porque a maioria das máquinas disponíveis possui escalas nesta unidade. Porém, após a realização dos ensaios, os valores de força foram transformados para N (Newton), unidade adotada pelo Sistema Internacional de Unidades (SI). Esta transformação foi realizada pela multiplicação do valor obtido em kgf pelo coeficiente 9,81 (Equação 62).

$$F_t (N) = F_t (kgf) \cdot 9,81 \quad (62)$$

c) Eficiência em tração ( $\eta_{BT}$ )

O valor da eficiência na transmissão ( $\eta_t$ ) foi arbitrado como referência o valor de 0,87, em função da transmissão mecânica do trator testado (SCHLOSSER, et al., 2004; ASAE, 2000).

A eficiência na resistência ao rolamento foi calculada através da seguinte fórmula:

$$\eta_k = \frac{F_t}{F_t + RR} \quad (63)$$

Onde:

$\eta_k$  = eficiência em relação à resistência ao rolamento;

$F_t$  = força de tração e

$RR$  = resistência ao rolamento.

A eficiência na patinação foi calculada através das eficiências de patinação nos eixos dianteiro e traseiro:

$$\eta\delta d = 1 - \delta d \quad (64)$$

$$\eta\delta t = 1 - \delta t \quad (65)$$

$$\eta\delta = \frac{(\eta\eta\delta + \eta\delta t)}{2} \quad (66)$$

Por fim, utilizando as informações calculadas e medidas acima foi possível demonstrar a eficiência em tração da seguinte maneira:

$$\eta_{BT} = \eta_t \cdot \eta_k \cdot \eta\delta \quad (67)$$

Onde:

$\eta_{BT}$  = eficiência na barra de tração;

$\eta_t$  = eficiência no sistema de transmissão;

$\eta_k$  = eficiência na resistência ao rolamento e

$\eta\delta$  = eficiência em relação a patinagem das rodas.

#### d) Consumo de combustível

Foi realizada por um fluxômetro, que emite pulsos que são interpretados e armazenados no datalogger, na medida em que um determinado fluxo de combustível passa por esse sensor, o que corresponde ao consumo do trator, ou seja, composto por duas engrenagens, sendo que uma delas possui um ímã que sensibiliza um sensor indutivo a cada volta (1ml de volume deslocado), gerando um pulso que é convertido e armazenado no datalogger.

#### e) Potência requerida (Pr)

Ao conhecer a força de tração na barra e a velocidade real instantânea determinou-se a potência requerida pelo implemento através da aplicação da equação 03.

Após a interpretação dos dados pelo software PC400W®, os mesmos foram tabulados em arquivos de dados formato do software Microsoft Excel, segundo o tipo de solo trabalhado e o implemento avaliado, além da distinção entre cada tratamento e bloco.

### 3.2.3.3 Análises estatísticas

Após a fase experimental de coleta dos parâmetros de desempenho do conjunto mecanizado, passou-se para a fase de análise dos dados.

O delineamento experimental aplicado foi de blocos casualizados, com três repetições e amostragem nas parcelas.

Como a coleta dos dados era realizada a cada segundo e armazenada pelo datalogger, cada segundo foi considerado uma amostra dentro da parcela, sendo o total de amostras analisados pelo software estatístico considerado o mínimo coletado, com a finalidade de igualar o número de amostragens para todos os tratamentos devido à diferença de velocidades avaliadas, isto é, tratamentos com maior velocidade de deslocamento do conjunto mecanizado, percorreram o trajeto de 30 metros em menos tempo, ocorrendo uma menor coleta de dados do que tratamentos com velocidades de deslocamento menores, assim fixou-se o número de amostragens na parcela pelo menor número de coletas dentro da parcela de maior velocidade, fixando este número para todos os tratamentos.

As análises estatísticas foram compostas pelos fatores velocidade de deslocamento, massa da grade e profundidade de trabalho segundo o tipo de implemento avaliado, sendo aplicados os seguintes arranjos experimentais e tratamentos:

- a) Semeadora: arranjo experimental unifatorial, estudando o efeito de diferentes velocidades de deslocamento, com velocidades médias de 3,5; 4,4; 5,3; e 6,4 km/h.
- b) Escarificador: arranjo experimental bifatorial 3 x 4, avaliando as diferentes profundidades de trabalho, sob níveis de 20, 25 e 30 cm de profundidade do solo para diferentes aplicações de velocidades de deslocamento, com velocidades médias entre 2,9 e 5,8 km/h.
- c) Grade aradora: este implemento foi testado sob duas condições de textura do solo, média e argilosa. Sob textura média foi possível avaliar seu desempenho com um arranjo experimental bifatorial 3 x 4, simulando-se três níveis de massas da grade, de 1200, 1448 e 1680 kg, com a adição de lastros metálicos e pesada a cada simulação, além da combinação desses três níveis de massa com quatro níveis de velocidade de deslocamento, trabalhando sob uma média de velocidade entre 3,4 a 6,9 km/h. Sob textura argilosa foi possível coletar dados para quatro diferentes velocidades de deslocamento, com valores médios de 3,2; 4,2; 5,3 e 6,4 km/h.

Durante as avaliações, o trator foi utilizado em marchas selecionadas segundo a necessidade de velocidade operacional desejada e procurando compreendê-las dentro das

faixas de velocidades recomendadas pela ASAE D230-4 (1988) com a rotação do motor em 1900 rpm, sendo elas: 2ª reduzida baixa, 2ª reduzida alta, 3ª reduzida baixa e 3ª reduzida alta.

Os valores dos parâmetros experimentais procedentes da instrumentação do trator foram importados a planilhas de cálculos separados por blocos e condição de solo em cada arquivo. Nestes distinguiu-se a divisão entre blocos o que permitiu encontrar os valores médios por parâmetros em cada tratamento e bloco. Os valores médios de cada tratamento foi o resultado médio, do conjunto das observações neste nível, para o solo analisado sem levar em conta a separação entre blocos.

Cada parâmetro estudado foi processado em planilhas de cálculo e por sua vez no programa estatístico “Table Curve 3D” e “Table Curve 2D”, estudou-se primeiramente a existência de interações significativas entre os fatores estudados para cada implemento (grade aradora em solo de textura média e escarificador em solo de textura argilosa), admitindo-se a probabilidade de ocorrência de erro em nível de 5%.

Posteriormente, para cada um dos parâmetros, ajustou-se o modelo considerado ideal através dos seguintes critérios:

- (i) A pressuposição de que a relação demanda da força de tração e velocidade real do trator siga uma curva equacional simples;
- (ii) O valor do teste de F da análise de regressão não linear;
- (iii) A magnitude da variância residual dos modelos; e
- (iv) Análise da dispersão dos pontos no gráfico.

Foi realizado o teste da normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov para o parâmetro patinagem, por suas características de não atendimento a essas pressuposições do modelo matemático.

#### 3.2.4 Desempenho preditivo x desempenho experimental

Para realizar as predições do desempenho dos conjuntos mecanizados em trabalho, necessita-se de dados do solo agrícola, onde os tratores desenvolvem tração, também as teorias preditivas necessitam de dados ponderais e dimensionais desses tratores. Além disso, os pneus que os equipam devem ser caracterizados para fornecer informações para as predições. Com essas informações procederam-se os cálculos para obterem-se os coeficientes de tração e a patinagem do trator no ambiente de trabalho determinado.

O solo onde foi realizado o trabalho dos tratores foi caracterizado através do índice de cone obtido pelo penetrômetro. A unidade de grandeza desse índice era de kPa para a utilização nos cálculos. Também foi referenciada a umidade do solo sempre quando era medido o índice de cone. O item 3.2.2 descreve a forma como foram obtidos os índices de cone no experimento de campo, os quais foram utilizados nas predições.

Os valores médios de índice de cone foram obtidos das planilhas de cálculo preparadas para isto, onde se importaram os arquivos de dados do penetrômetro. A partir do valor de resistência à penetração medido em cada ponto de um mesmo solo encontrou-se o valor médio até os 15 cm de profundidade (interesse de tração) para grade e até 30 cm para escarificador, obtendo-se assim o índice de cone deste ponto, posteriormente foi encontrada a média dos pontos de cada solo obtendo-se o valor deste parâmetro para cada solo. O coeficiente de variação foi encontrado entre estes últimos valores.

Os pneus foram caracterizados para as simulações por suas dimensões, sua pressão interna e capacidade de suportar cargas à determinada pressão. Esses parâmetros, para serem utilizados nas simulações matemáticas da forma tradicional, sem realizar alterações em fatores de conversão, devem ser expressos em determinadas unidades que são, para suas dimensões, o metro, a pressão interna em bar e a carga em quilogramas força. Como as predições foram realizadas com o mesmo trator que a fase experimental, essas medidas foram realizadas antes mesmo da realização do experimento, citadas no item 3.2.3, mesmo admitindo que a predição possua como uma de suas propostas não necessitar ir ao campo para realizá-la; no máximo, ela necessita da tomada dos índices de cone da área em questão.

A tomada de medidas dimensionais do pneu que foram necessárias para a predição foram a secção largura, diâmetro total da roda, raio estático sob carga, raio dinâmico e diâmetro do aro, além da pressão interna do pneu, que determina a sua capacidade de carga estão descritas no item 3.2.3.

Sobre o trator levantou-se informações do seu peso estático, bem como a distribuição deste sobre os eixos e, por consequência, sobre as rodas, dados estes fornecidos em kN. Além da condição estática, também se determinou as condições dinâmicas de distribuição do peso. Para tanto, foi necessário informar dados dimensionais do trator, a altura do ponto de engate e a distância entre os eixos do trator, ambas em metros. Também houve necessidade de informar a carga na barra de tração do trator teste, valores estes em kN. Todas essas informações foram retiradas do experimento em campo, coincidindo com os valores medidos nesse e criando uma condição de comparação.



As teorias de predição de tração utilizadas neste trabalho foram as de Brixius, Wismer e Luth e Gee-Clough visto a sua contribuição em estudos de desempenho em tração e reconhecimento pelas normas da ASAE e, portanto, servindo como parâmetro comparativo entre demais trabalhos. Para comparar o desempenho das diferentes teorias, utilizou-se o procedimento operacional para a predição foi baseado na rotina do Programa Informático “Predição” versão 1.0, desenvolvido pelo Núcleo de Ensaios de Máquinas Agrícolas para previsão da tração, coeficiente de força tangencial e patinagem das rodas do trator.

Os dados de força de tração, patinagem e coeficiente de força tangencial introduzidos são da análise experimental, onde se obteve os valores instantâneos de cada ensaio segundo o tratamento e o tipo de solo.

Aplicando estas informações realizou-se a predição dos parâmetros de desempenho a partir dos dados reais obtidos nos ensaios.

Realizou-se uma análise dos resultados da predição, para comparação entre os dados previstos e os obtidos experimentalmente, da seguinte forma:

- Foram comparados os valores de cada variável medida e calculada.
- Realizou-se análise de regressão entre a predição e a experimentação.
- Comprovação da boa relação dos valores medidos e calculados com os coeficientes modificados (experimentais).

As regressões entre predição e experimentação foram realizadas na seguinte ordem:

1º) Para cada valor de índice de cone, ou seja, por cada condição de solo comparando o comportamento da patinagem calculado pela predição, com relação aos valores experimentais através da reta de melhor ajuste sem passar pela origem do eixo de coordenadas.

2º) Para cada valor de índice de cone, comparando o comportamento da patinagem calculado, com relação aos valores experimentais através da reta de melhor ajuste passando pela origem do eixo de coordenadas.

3º) Comparação dos resultados gráficos obtidos com as planilhas de cálculo com as regressões feitas no “software” estatístico "Table Curve 3D" para comprovação entre ambos métodos.

4º) Foram comparados os resultados previstos com os experimentais separando-os por predições segundo a textura do solo com todas as condições de solo ao mesmo tempo.

5º) De forma igual ao passo anterior repetiu-se a análise, mas separados por cada condição de solo.

Isto é demonstrado através de gráficos onde se obteve a reta 1:1 com nuvens de pontos mais próximos ou mais afastados da mesma.

O tratamento estatístico dos dados experimentais foi realizado a partir do delineamento experimental proposto, os dados obtidos na experimentação foram submetidos a uma análise estatística onde o objetivo fundamental foi de comprovar a existência de diferenças significativas entre os diferentes tratamentos aplicados. Para isto realizou-se com o auxílio do programa estatístico Assistat, após a confirmação da normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson e determinou-se a significância das diferenças entre os dois métodos de desempenho, experimental x preditivo, pelo teste t pareado, a fim de verificar se os valores medidos no campo e simulados têm diferenças estatisticamente significativas, com nível de significância de 5%. A hipótese nula sendo testada é de que não existe diferença significativa entre as médias. A hipótese alternativa é de que existe diferença significativa entre as médias.

Para a estimativa dos parâmetros do modelo também foram utilizados os programas computacionais Table Curve 2D (experimentos unifatoriais) e Table Curve 3D (experimentos bifatoriais). Além das estimativas dos parâmetros, foram obtidos, para cada modelo, os graus de liberdade (GL) e o quadrado médio do erro ou variância da falta de ajuste (QME).

A comparação entre os dados de cada variável obtidos no campo e os simulados foi realizada confrontando o valor medido e o valor predito pelo modelo matemático considerado ideal, formando, assim, uma série de confrontos entre os dois valores. Em conjunto foram efetuadas umas séries de gráficos entre os valores medidos e preditos, procurando o melhor ajuste para as condições e dando uma idéia se a simulação estava ou não bem ajustada.

### 3.2.5 Proposição dos parâmetros de determinação da força de tração requerida

Para estimar os parâmetros empíricos do modelo de força de tração requerida pelo implemento através da ASAE D497-4, utilizou-se o procedimento iterativo para mínimos quadrados não lineares de Levenberg-Marquardt, com o auxílio do programa computacional Table Curve 2D v.2.03 (Jandel Scientific).

O experimento para grade aradora foi possível coletar dados em solo de textura média e argilosa, possibilitando também a comparação do fator  $F_i$  (coeficiente redutor segundo a textura do solo) aos valores recomendados pela ASAE.

A profundidade de trabalho foi medida na linha de trabalho do órgão ativo, com três repetições dentro da parcela por linha, com uma régua decimal dividindo-se a parcela em três porções (inicial, mediana e final), para obter a média por linha e por tratamento, tanto para o escarificador, quanto para a grade aradora. No entanto, como sugestiona a ASAE, o modelo admitido para semeadoras deve substituir a profundidade de trabalho por 1,0 (um), como valor adimensional, utilizado em operações com profundidade superficial, embora a semeadora utilizada, como em geral no Brasil, é projetada por hastes sulcadoras capaz de promover um sulco de semeadura de até cinco centímetros em média.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Dimensionamento dos implementos

Ao comparar os valores obtidos pela aplicação do modelo ASAE D497.4 (Equação 10) com os valores obtidos experimentalmente, observou-se a ocorrência de uma superestimativa da força de tração requerida pela semeadora-adubadora, enquanto os demais implementos apresentaram maior requerimento de força de tração em relação ao estimado pela Equação 10 (Tabela 5).

**Tabela 5 - Valores médios de força de tração (N), obtidas em ensaios de campo (Ft) e estimadas pela ASAE 497.4 (2003) (D).**

Implemento	Textura do solo	D (N) ASAE D497-4	Ft (N)
Semeadora	Média	16.320	12.844
Grade aradora	Média	9.712	12.036
	Argilosa	13.177	16.103
Escarificador	Argilosa	16.346	22.312

A subestimativa destes valores ao utilizar o modelo matemático da ASAE D497-4 (2003) pode ocasionar um sub-dimensionamento do trator, e conseqüentemente, uma seleção equivocada do conjunto mecanizado, tendo dentre as possíveis conseqüências os desgastes mecânicos, maior patinagem, o não cumprimento do ritmo operacional e maior consumo de combustível. Pois ao selecionar um implemento estimando menor força de tração àquela requerida no campo, ocorre a seleção de um trator de menor potência bruta do motor.

Serrano (2007) avaliando a demanda de força de tração em solos pertencentes aos distritos de Évora e Beja, na Região Sul de Portugal nos solos de textura arenosa, e especialmente no caso das grades com massa inferior a 2500 kg, verificou a existência de uma tendência para o mesmo modelo subestimar os valores de tração, O autor justifica tal fato devido ao modelo atribuir aos solos de textura média uma redução na força de tração prevista de cerca de 20% em relação aos coeficientes para solos de textura argilosa, confirmado pelos

resultados obtidos, enquanto no caso dos solos de textura arenosa, a redução prevista é da ordem dos 50%, quando os valores realmente medidos não confirmaram esta estimativa.

A condição de trabalho com escarificador sob profundidade de 30 cm e velocidade de deslocamento de 5,8 km.h<sup>-1</sup>, submetida ao modelo de predição da força de tração requerida pelo implemento subestima a potência necessária para tração. No entanto, sua aplicação foi realizada para comparar com os valores medidos em campo, desconhecendo esta diferença entre o estimado e o experimental. Caso ocorresse comportamento de tração contrário ao observado em campo (os valores experimentais fossem menores aos estimados) a operação de um escarificador de cinco hastes com velocidade de deslocamento de 5,8 km.h<sup>-1</sup> e profundidade de trabalho de 30 cm seria passível de utilização, o que não se observou.

#### 4.1 Modelagem dos parâmetros de desempenho experimental do conjunto mecanizado

##### 4.2.1 Análises para pressuposições dos modelos matemáticos

Foi verificada uma falta de normalidade da distribuição dos erros entre as patinagens de todos os tratamentos (Tabela 6). Nesses casos, a falta de normalidade dos erros é um fato previsível, sendo recomendada a transformação logarítmica dos dados (STORCK & LOPES, 1997). Concluindo, se  $\chi$  não tem distribuição normal, então não tem como haver distribuição de qui-quadrado, t e F sem viés ou prejuízos nas inferências.

**Tabela 6 - Valores para normalidade do modelo matemático segundo o tipo de implemento e textura do solo para o parâmetro patinagem das rodas motrizes do trator..**

Textura	Implemento	Valor	Vcrit.	p-valor	Normal
Média	Semeadora	0,8	0,10	p < 0, 01	Não
	Grade aradora	0,16	0,06	p < 0,01	Não
Argilosa	Escarificador	0,06	0,10	p < 0,01	Não
	Grade aradora	0,11	0,10	p < 0,00	Não

Quando os dados não possuem uma distribuição normal, o verdadeiro nível de significância torna-se usualmente maior (embora nem sempre) do que o nível crítico especificado. Como consequência deste fato tem-se a rejeição da hipótese da nulidade  $H_0$  (quando  $H_0$  é verdadeira) com mais frequência do que a probabilidade especificada, ou seja, diferenças não reais são erroneamente consideradas significativas. Sendo assim erros Tipo I são cometidos com probabilidade maior de que o especificado ou admitido pelo pesquisador (Nunes, 1998).

Existem situações em que as falhas nos pressupostos podem ser identificadas até sem a aplicação dos testes. Como neste caso, que se têm dados de percentagem, ajustados à distribuição binomial, foi necessário realizar a transformação de dados para distribuição arco seno visando normalizar os dados e assim posteriormente realizar a análise da variância. Sendo que os gráficos são representados pelos valores originais (não transformados), como recomenda STORCK et al. (2000).

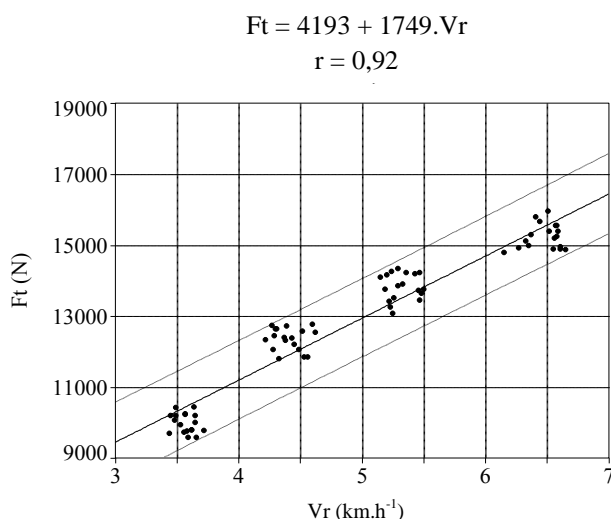
A diferença encontrada entre o modelo por dados medidos em campo e as estimativas das teorias preditivas para força de tração e a patinação estão apresentadas na Tabela 6, sendo que o teste t pareado acusou diferença significativa para todas as variáveis. Como, em média, a predição por teorias  $C_n$ ,  $B_n$  e  $M_n$  são significativamente superiores aos valores medidos em campo ( $p < 5\%$ ) é de interesse tentar quantificar esta diferença. Portanto, para verificar se a estimativa das teorias pode ser tão eficiente quanto a medida de dados em campo, considerou-se a regressão linear do valor do estimado sobre o medido experimentalmente na tentativa de quantificar esta relação. Desta forma verificou-se qual a capacidade da estimativa em “prever” a medida em campo e se existia uma relação matemática entre estas medidas. Estas relações estão descritas nos sub-itens a seguir.

#### 4.2.2 Semeadora-adubadora

No experimento em solo médio, verificou-se a diferença significativa, em nível de 5% de probabilidade de erro para os diferentes níveis de velocidade de deslocamento estudadas, em todos os parâmetros de desempenho experimental do conjunto trator-semeadora-adubadora (Apêndice 1).

O aumento da velocidade de deslocamento causa um efeito linear crescente sobre a demanda energética (Figura 11), com modelo para força de tração ( $F_t$ ) em função da

velocidade de deslocamento ( $V_r$ ). De acordo com o modelo proposto pela ASAE D497.2 (1995), esta é uma função linear.



**Figura 11 - Força de tração requerida na barra do trator ( $F_t$ ) por uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas, medida em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ), trabalhando em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.**

O aumento da velocidade de deslocamento de 3,5 para 6,5 km h<sup>-1</sup> proporcionou um aumento de 37 % da força de tração requerida na barra de tração, podendo interferir na capacidade de campo efetiva da semeadura.

Em acordo com trabalho realizado por Mahl et al. (2004), no estudo do efeito de aumento da velocidade na operação de semeadura de milho em solo argiloso, utilizando uma semeadora-adubadora de seis linhas espaçadas de 0,45 m, submetida a três velocidades de deslocamento (4,4; 6,1 e 8,1 km.h<sup>-1</sup>), verificando interferência da variação da velocidade sobre o desempenho do conjunto trator semeadora com relação à demanda energética.

A força de tração média requerida por linha de semeadura foi de 2,57 kN, superior aos recomendados pela (ASAE, 1996), a qual cita a faixa de 1,1 a 2,0 kN por linha de semeadura, e ainda, superiores aos encontrados por Mahl et al. (2002) de 2,05 kN/linha e Silva et al. (2002), que observaram força média de 1,22 kN/linha, utilizando mecanismo sulcador do tipo haste sulcadora em sistema de plantio direto, sendo o mesmo utilizado neste caso. Sendo esta diferença entre valores obtidos pela pesquisa brasileira possível indicativo do uso inadequado de coeficientes para estimativa da força de tração para as condições de solo e máquinas fabricadas no Brasil.

Pela configuração das semeadoras utilizadas atualmente no sistema plantio direto afastarem-se daquela inicial, com projetos que nada mais eram que adaptações de modelos Americanos, consideradas mais leves, também pode explicar a diferença entre os valores encontrados neste trabalho em força de tração serem superiores aos citados pela ASAE (1996).

Cepik et al. (2005) ao estudar o comportamento em tração de uma semeadora em mesmo tipo de solo deste trabalho (Argissolo Vermelho distrófico típico de textura franco-argilosa) e área submetida a pastagem durante os últimos anos, verificaram que o solo friável e úmido favoreceram um maior volume de solo mobilizado pela haste sulcadora, conseqüentemente, aumentando a demanda de força de tração.

Diferentes condições de compactação do solo podem ter influenciado sobre os diferentes valores de força de tração média citadas pelos trabalhos acima. A força de tração demandada por hastes sulcadoras que equipam semeadoras-adubadoras pode ser afetada, entre outros fatores, pelo estado de compactação do solo (SÁNCHEZ-GIRÓN et al., 2005). Entretanto, esta relação entre a força de tração e a compactação do solo sofre alterações com o uso de hastes com geometrias diferentes ou mediante alteração da profundidade de atuação, aumentando ainda mais a possibilidade de obtenção de forças de tração diferentes em solos brasileiros, pois esses são alguns dos fatores que influenciam na força de tração exigida pelas hastes sulcadoras (CONTE et al., 2007).

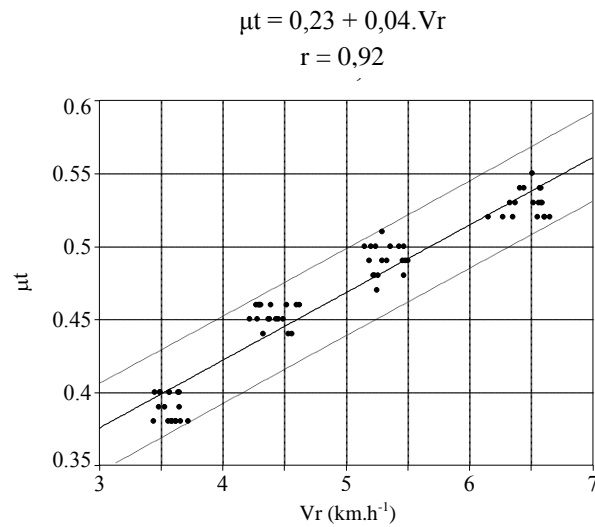
O coeficiente de força tangencial apresentou comportamento linear crescente (Figura 12) em relação ao acréscimo da velocidade.

A potência requerida na barra de tração é apresentada na Figura 13, demonstrando o aumento do requerimento de potência de acordo com o aumento da velocidade de deslocamento.

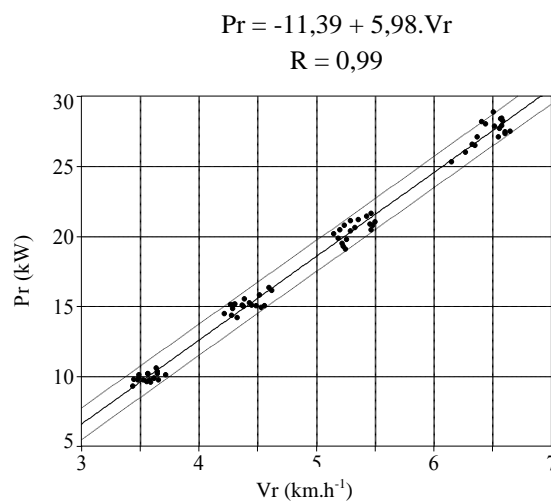
Oliveira (1997) trabalhando em Argissolo detectou incremento na demanda de potência com o aumento da velocidade de deslocamento na semeadura de 5,0 para 7,0 km.h<sup>-1</sup> e a ocorrência do aumento do consumo horário de combustível com o aumento da velocidade de deslocamento do conjunto trator-semeadora-adubadora.

O parâmetro consumo de combustível por unidade de área trabalhada foi menor nas maiores velocidades, o que pode ser explicado pelo menor número de horas trabalhadas por hectare, embora, maiores potências requeridas e velocidades de trabalho aumentem o consumo horário de combustível, sendo superada pelo aumento da capacidade de campo operacional (Figura 14). Furlani et al. (2006) apresentaram resultados semelhantes.

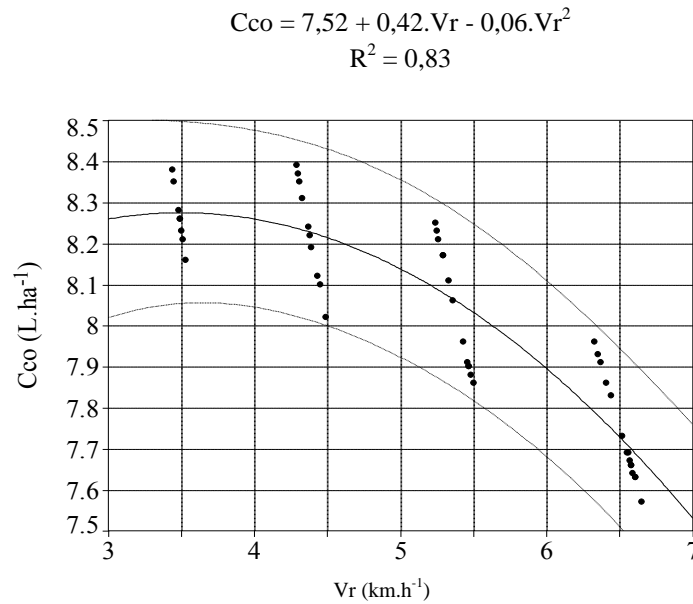




**Figura 12 - Coeficiente de força tangencial do trator ( $\mu_t$ ) determinado em função da sua velocidade de deslocamento ( $V_r$ ) ao tracionar uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas, trabalhando em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.**



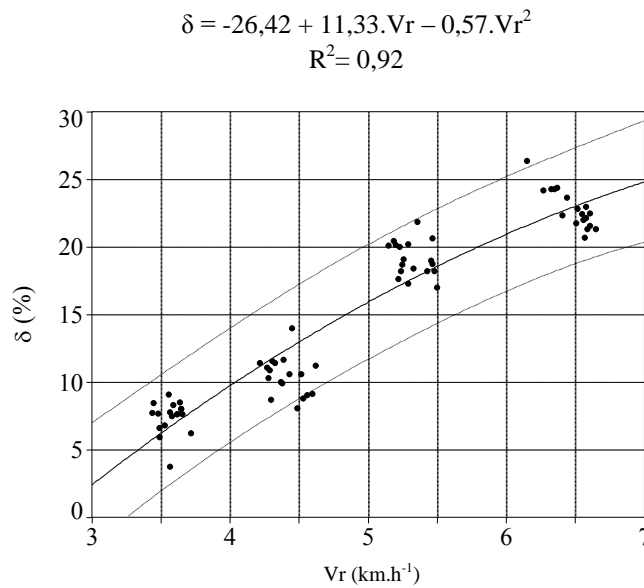
**Figura 13 - Potência requerida na barra de  $V_r$  (km/h) trator ( $Pr$ ) por uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas determinada em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.**



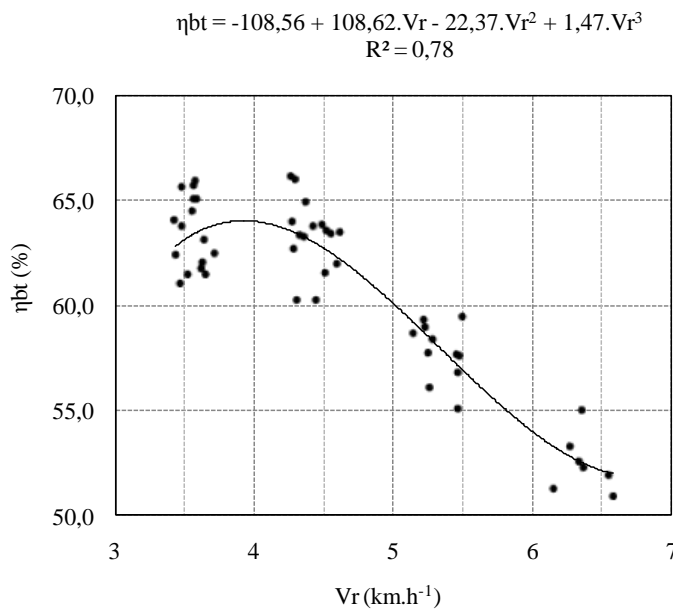
**Figura 14 - Consumo de combustível operacional do trator por área trabalhada (CCo) ao tracionar uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas, medido em função da velocidade de deslocamento do trator (Vr) em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.**

A patinagem também apresentou comportamento linear crescente à medida que se aumentou a velocidade de deslocamento (Figura 15), com valor médio de 14,91% dentro do valor máximo recomendado pela ASAE EP 496.2 (1999).

A eficiência em tração é reduzida significativamente à medida que se aumenta a velocidade de deslocamento (Figura 16), principalmente a partir de 4,5 km.h<sup>-1</sup> por possível consequência do aumento da patinagem (Figura 15). Indicando que se deve escolher a velocidade de deslocamento capaz de possibilitar a realização das atividades dentro do ritmo operacional desejado e ainda, permita menor patinagem (dentro dos valores de patinagem recomendados pela ASAE), para que não ocorra perda em eficiência pelo aumento da resistência ao rolamento e evitando o consumo excessivo de combustível, neste caso, compreendida pelas velocidades de até 5 km h<sup>-1</sup>.



**Figura 15 - Patinagem das rodas motrizes do trator ( $\delta$ ) determinada em função da sua velocidade de deslocamento ( $V_r$ ) ao tracionar uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas, trabalhando em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.**

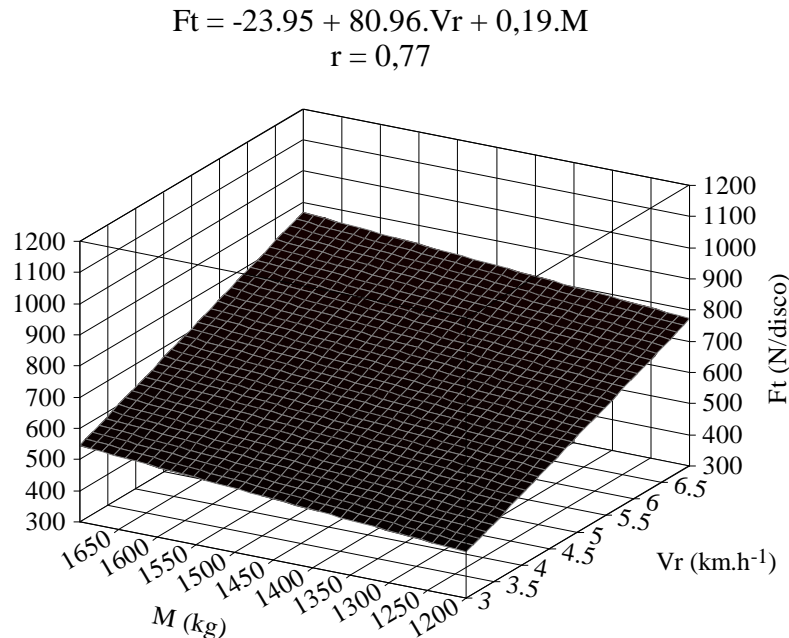


**Figura 16 - Eficiência em tração ( $\eta_{bt}$ ) determinada em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) ao tracionar uma semeadora-adubadora, composta por cinco linhas, trabalhando em solo de textura média.**

#### 4.2.3 Grade aradora

As avaliações realizadas em solo de textura média confirmam a ocorrência de interação significativa através do teste F entre os fatores de velocidade de deslocamento e massa da grade, para todos os parâmetros analisados, procedendo-se a análise conjunta destes fatores tanto para o ajuste do modelo que melhor represente cada variável, bem como na confecção de gráficos de superfície de resposta (Apêndice 2). Enquanto as avaliações realizadas sob solo de textura argilosa sem testar a ocorrência dessa mesma interação também comprovaram a influência da velocidade de deslocamento no desempenho de todos os parâmetros (Apêndice 3).

Os ensaios de campo, realizados com conjunto mecanizado trator-grade aradora sob a condição de mobilização primária do solo de textura média, permitiram estabelecer um modelo de previsão da força de tração na barra ( $F_t$ , em N) em função da massa da grade de discos ( $m$ , em kg) e da velocidade de deslocamento, verificando-se a interação entre estes fatores representados pela Figura 17.



**Figura 17 - Diagrama tri-dimensional da força de tração requerida na barra do trator ( $F_t$ ) medida por unidade de disco da grade aradora, em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e massa da grade ( $M$ ), sob solo de textura média.**

Este modelo de previsão não confirma o modelo apresentado pela ASAE (1995) pela equação  $F_t = 11,7.M$  para grades de discos offset, em mobilização primária de solo de textura média. A não utilização da velocidade de deslocamento como parâmetro determinante sobre a estimativa da força de tração requerida pela grade aradora através da ASAE D497.2 (1995), pode ser considerado até então um modelo redutor, pois não considera o diâmetro dos discos, o ângulo de abertura dos corpos da grade, a profundidade e a velocidade de trabalho. Enquanto a proposta da ASAE D497.4 (2003), apresentada com uma revisão da equação de previsão do esforço de tração requerido por grades de discos, com a inclusão da largura, da velocidade e da profundidade de trabalho seja mais próxima dos resultados encontrados neste trabalho. Embora, exista uma dificuldade nesta inclusão de parâmetros, principalmente quando se limita o conhecimento da profundidade de trabalho, parâmetro nem sempre previsível em implementos de arrasto desprovidos de rodas reguladoras da profundidade.

Em média, obteve-se valores de força de tração na barra de 8,34 N/kg de massa da grade em solo mobilizado em solos de textura média, valor enquadrado com os apresentados pela previsão da ASAE (entre 7,8 e 14,7 N/kg de massa, em função da textura do solo).

A força de tração máxima ocorreu com a aplicação da máxima velocidade de deslocamento, ou seja, 6,4 km/h, e massa da grade de 1680 kg, decrescendo linearmente à medida que se reduziram as mesmas nesta interação (Figura 17).

Keiralla et al. (2004) encontraram interação significativa para grades de disco de tipo tandem entre a velocidade de deslocamento e a profundidade de trabalho. Resultados como estes encontrados por autores de países não Europeus ou Norte-Americanos podem confirmar hipóteses de que tanto os coeficientes, como os parâmetros recomendados pela ASAE D497.2 (1995), tornam a mesma simplista ao desconsiderar o efeito de demais parâmetros como a velocidade de deslocamento e profundidade de trabalho no modelo de previsão.

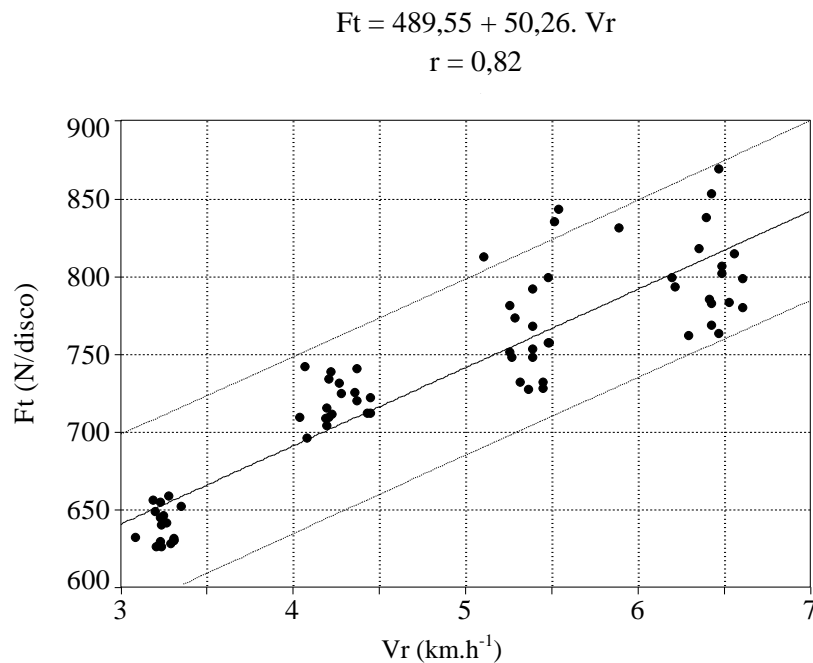
Segundo Serrano et al. (2007) o primeiro modelo proposto pela ASAE D497.2 é apontado na bibliografia como pouco rigoroso, uma vez que não considera o efeito da velocidade de trabalho e, no que respeita à profundidade apenas o valida para a profundidade de trabalho típica das grade de discos, justificando as razões para o desenvolvimento de muitos outros modelos, procurando aumentar a precisão para esta questão, considerando as diferentes formas de aproximação à realidade, com graus de complexidade de parâmetros. No entanto, estes mesmos autores encontraram para solos de textura média, um modelo de previsão da força de tração na barra ( $F_t$ , em N) em função da massa da grade de discos ( $m$ , em kg), expressa matematicamente pela equação 68:

$$F_t = 7.541,6 + 7,39M, \quad (68)$$

com coeficiente de determinação de 0,79, confirmando o modelo apresentado pela ASAE 497.2 (1995) para grades de discos offset, pois não foram verificadas possíveis interações com outros parâmetros.

Quando se avaliou as tentativas de modelagem conhecidas e adicionando a velocidade e profundidade de trabalho, resultaram em sistemas muito complexos e foram desenvolvidos a partir de condições de trabalho muito particulares (GRISSE et al., 1994; AL-JANOBI & AL-SUHAIBANI, 1998), não procurando a generalização, por esse motivo esses modelos não são considerados para esta validação.

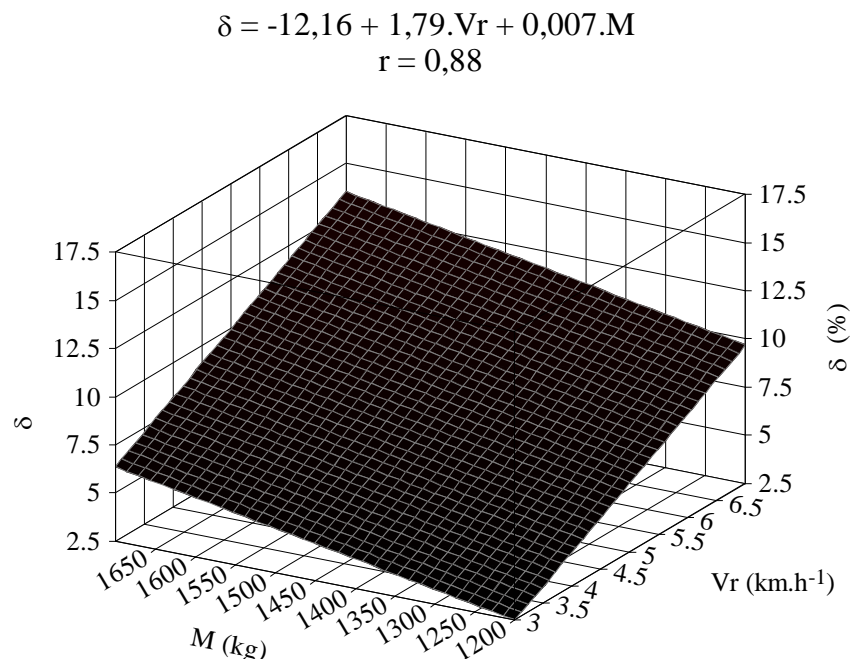
Visando confirmar a influência da velocidade de deslocamento sobre a estimativa da força de tração requerida na barra pelo implemento, sob condição independente do tipo de solo, visto ser a massa da grade um parâmetro considerado indispensável para tal estimativa, realizou-se a análise da variância para o experimento em solo de textura argilosa, a qual demonstrou efeito significativo deste parâmetro sobre a determinação da variável força de tração, de maneira linear, com coeficiente de determinação de 0,82 (Figura 18).



**Figura 18 - Força de tração requerida na barra do trator (Ft) medida por unidade de disco da grade aradora em função da velocidade de deslocamento do trator (Vr) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.**

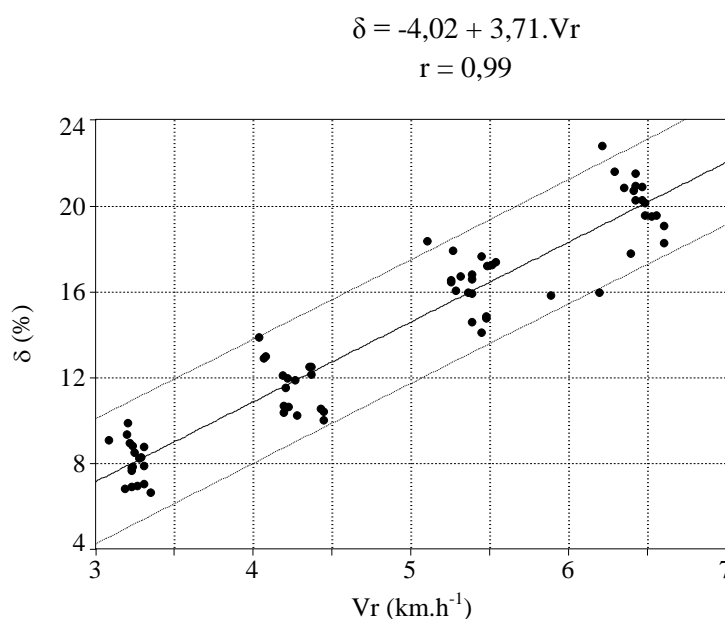
O solo de textura argilosa apresentou requerimento de força de tração na barra 9% maior que em solos de textura média, com médias de 668 a 731 N/disco, respectivamente, enquanto a ASAE (2003) determina que essa redução de força de um solo de textura argilosa para um solo de textura média seja de 12%, já para solos de textura grosseira essa diferença em requerimento seria de até 22%. Esta diferença de valores do coeficiente de redução para textura do solo ( $F_i$ ) pode ser considerada baixa, porém, é interessante que se realizem novos trabalhos com possibilidades de se avaliar esta diferença, que pode ser uma causadora da subestimativa dos valores estimados pela ASAE D497-4 (2003).

A patinação sob solo de textura média pode ser representada pelo modelo abaixo (Figura 19) com coeficiente de correlação de 0,88.



**Figura 19 - Patinação das rodas motrizes do trator ( $\delta$ ) ao tracionar uma grade aradora, composta por 18 discos, determinada em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e massa da grade ( $M$ ), em solo de textura média.**

Enquanto o modelo para solo de textura argilosa obteve o seguinte modelo ajustado e coeficiente de correlação de 0,84 (Figura 20).



**Figura 20 - Patinagem do trator ( $\delta$ ) operando uma grade aradora, composta por 22 discos, determinada em função da velocidade de deslocamento do trator ( $Vr$ ) em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.**

Com a média dos valores de patinagem de 10,21 e 13,89 % em solo de textura média e argilosa, respectivamente, os resultados situaram-se dentro da patinagem considerada aceitável pela ASAE EP 496.2 (1999), entre 10 e 15%, ocorrendo um equilíbrio entre a potência do motor utilizada para vencer a resistência ao rolamento e o patinagem, visto que estes dois parâmetros de relação solo-máquina apresentam comportamento inverso. Em solos de textura argilosa a patinagem tende a ser maior, pois a roda gira mais facilmente que em solo de textura mais grossa (arenosos), aumentando a eficiência em tração, quando a resistência ao rolamento não é fator limitante.

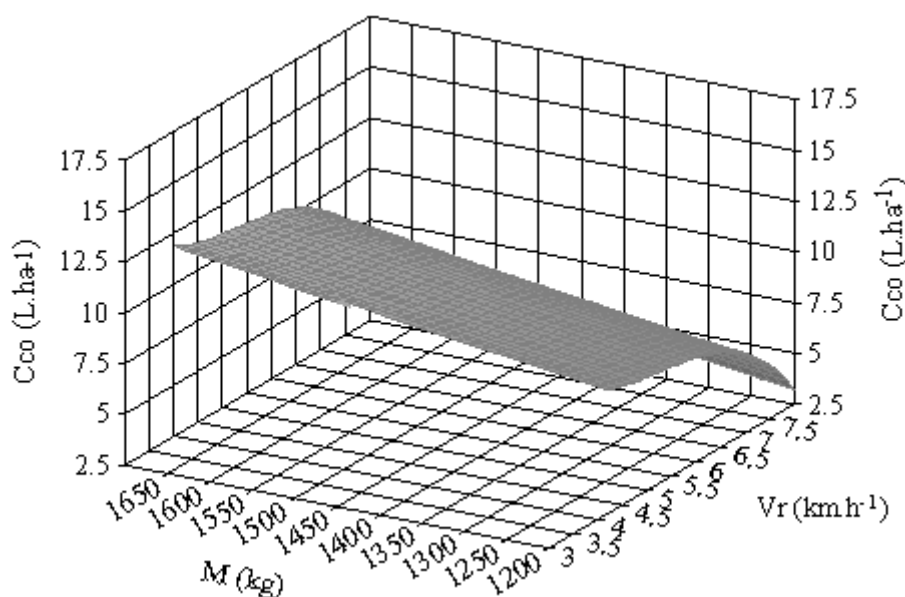
A literatura publicada nas décadas de 1980 e 1990 na perspectiva da análise sistemática de pneus mostra que, se o par lastro/pressão é adequado, refletido em valores de patinagem dentro do intervalo de 5 a 15%, correspondente a elevados rendimentos de tração e conseqüentemente na economia em consumo de combustível. Sendo a mesma considerada um agente causador da redução de eficiência na barra de tração, ocorrendo a perda de potência transmitida pelo motor na barra, enquanto que estas ocorrências de perda exigem maior torque do motor para deslocar e ainda tracionar o implemento, causando um consumo excessivo de combustível, tal como a Equação 10 apresentada demonstra tais relações. Assim, a interação verificada entre a velocidade de deslocamento e a massa da grade para o solo de textura



média, torna compreensível o comportamento crescente do modelo de consumo de combustível quando combinados os máximos níveis de cada fator entre si, como verificado na Figura 21, onde ocorre a maior patinagem aplicando-se a maior massa da grade e operando sob a velocidade de deslocamento mais alta (Figura 19).

$$Cco = 48,36 - 26,33.Vr + 5,0.Vr^2 - 0,3.Vr^3 + 0,004.M + 0,0000004.M^2$$

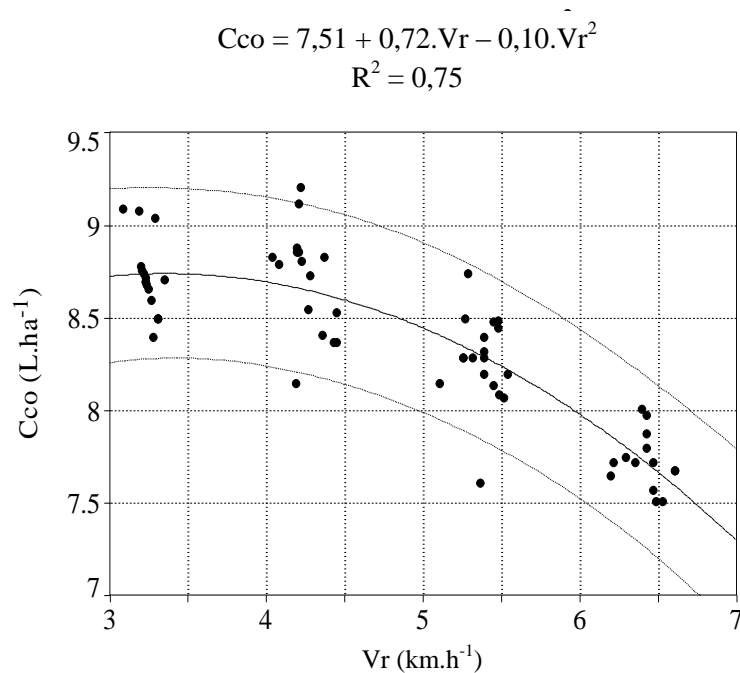
$$R^2 = 0,71$$



**Figura 21 - Consumo de combustível operacional do trator (Cco) tracionando uma grade aradora, composta por 18 discos, medido em função da velocidade de deslocamento do trator (Vr) e da massa da grade (M) em solo de textura média.**

Steinkampf (1988) resume o efeito de diversos parâmetros agrônômicos e técnicos, dentre os quais a patinagem sobre o consumo de combustível por hectare, verificando que variações de patinagem variam de forma direta sobre o consumo de combustível. De acordo com Finchi & Brandini (1980) o controle do índice de patinagem durante as operações agrícolas pode refletir na redução de consumo de ordem de 5% a 10%, justificando a importância da correta seleção de conjuntos trator-implemento.

Em solo de textura argilosa o consumo foi considerado maior (Figura 22), possivelmente devido à maior patinagem (Figura 20).

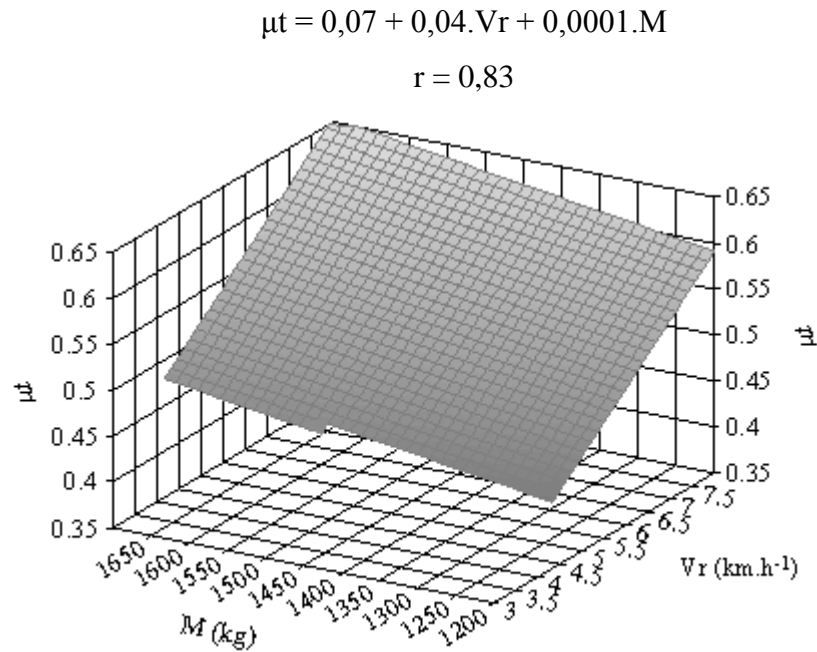


**Figura 22 - Consumo de combustível operacional do trator (Cco) tracionando uma grade aradora, composta por 22 discos, medido em função da velocidade de deslocamento do trator (Vr) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.**

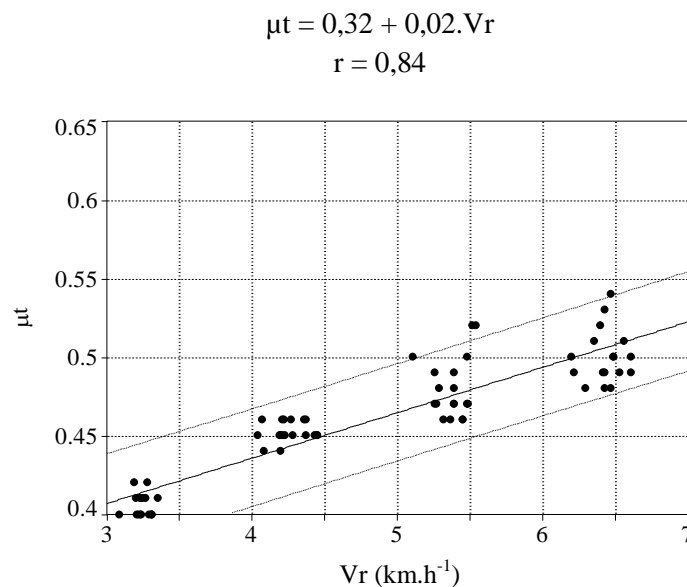
O coeficiente de força tangencial para o solo de textura média variou na faixa de 0,35 a 0,65 para velocidades entre 3,3 a 6,7 km.h<sup>-1</sup> em média (Figura 23). De mesma forma este resultado pode ser observado na Figura 24, em solo de textura argilosa, mesmo que em magnitudes diferentes.

O coeficiente de força tangencial em solo de textura argilosa obteve menor faixa correspondente a valores de 0,38 a 0,54, e ainda verifica-se uma menor velocidade de resposta do coeficiente quando houve aumento da patinagem, dentro de uma faixa de 6 a 23% de patinagem.

A eficiência na barra de tração mantém-se em valores próximos a 65% com velocidade de deslocamento de até 4,5 km.h<sup>-1</sup> (Figura 25 e Figura 26), após ocorre uma redução na eficiência à medida que a velocidade de deslocamento aumenta, após a velocidade de 6,5 km.h<sup>-1</sup> o decréscimo tende a ser maior em solo de textura argilosa (Figura 26) devido às resistências oferecidas pelo aumento da patinagem com o aumento da velocidade de deslocamento. Este resultado é expresso através de um modelo cúbico.



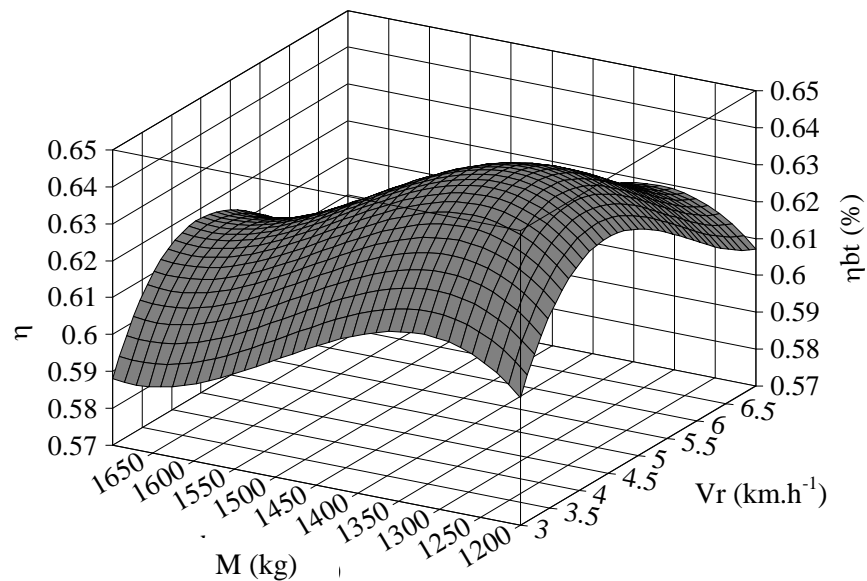
**Figura 23** - Coeficiente de força tangencial do trator ( $\mu_t$ ) ao tracionar uma grade aradora composta por 18 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da massa da grade ( $M$ ) em solo de textura média.



**Figura 24** - Coeficiente de força tangencial do trator ( $\mu_t$ ) ao tracionar uma grade aradora composta por 22 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.

$$\eta_{bt} = -3,92 + 0,23.Vr + 0,04.Vr^2 + 0,002.Vr^3 + 0,008.M - 0,00005M^2 + 0,000001.M^3$$

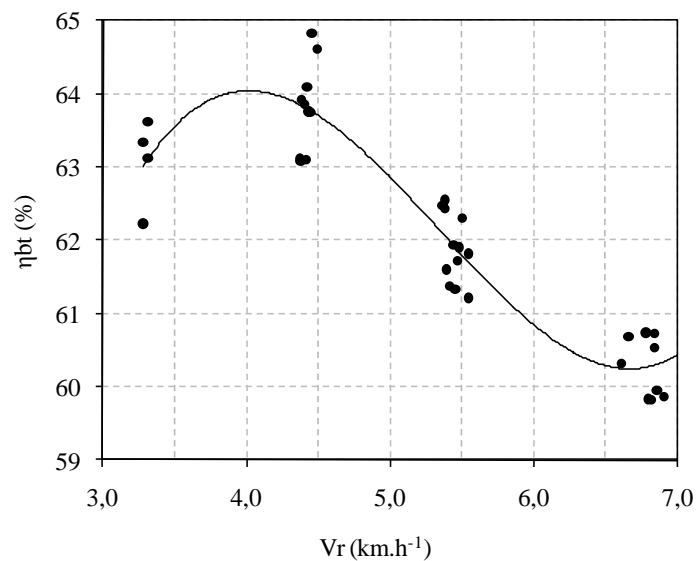
$$R^2 = 0,72$$



**Figura 25 - Eficiência em tração do trator ( $\eta_{bt}$ ) ao tracionar grade aradora, composta por 18 discos, em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da massa da grade ( $M$ ) em solo de textura média.**

$$\eta_{bt} = -6,98 + 48,18.Vr - 10,27.Vr^2 + 0,68.Vr^3$$

$$R^2 = 0,78$$



**Figura 26 - Eficiência em tração ( $\eta_{BT}$ ) operando uma grade aradora, composta por 22 discos, em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa.**

Comparando a eficiência de tração com a patinagem, observa-se que, nos tratamentos em que a patinagem foi maior, a eficiência foi menor, o que está de acordo com as observações de vários autores, entre os quais, Wismer & Luth (1973), Zoz (1987) e Maziero et al. (1997), embora este comportamento em eficiência não possa ser representado linearmente, e sim através de uma equação polinomial de segundo grau.

#### 4.2.4 Escarificador

O escarificador apresentou diferente desempenho experimental operando sob solo argiloso, alterando as combinações entre os níveis de velocidade de deslocamento e profundidade de trabalho, verificando-se interação entre estes fatores, significativa estatisticamente (Apêndice 4).

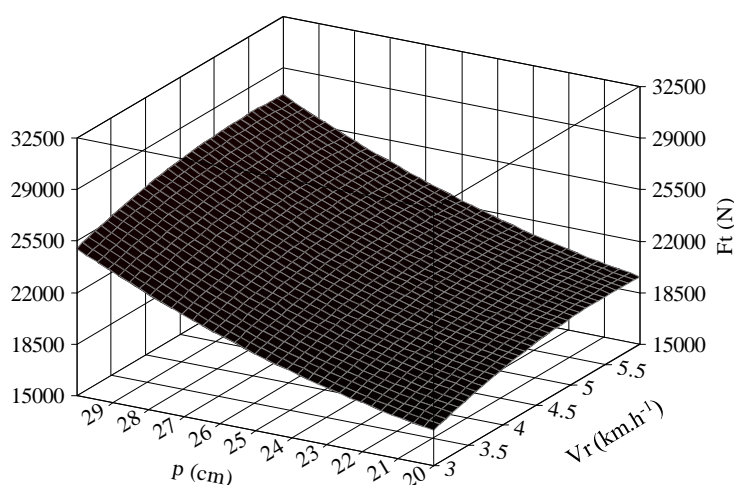
A representação da força de tração pode ser realizada eficientemente, com coeficiente de correlação acima de 95% através de uma equação quadrática, tanto para velocidade de deslocamento quanto para a interação desta variável com a profundidade de trabalho (Figura 27). Várias referências demonstram que a variação da força de tração, em função da profundidade de trabalho, é representada por uma expressão quadrática (Kiss & Bellow, 1981; Perumpral et al., 1983 e American Society of Agricultural Engineer, 1995; Bianchini et al., 1999). Observando-se que embora ocorra variação da força de tração demandada na barra com o aumento da velocidade, maior é a expressão desse acréscimo quando varia-se a profundidade no eixo Y, esta variação apresenta uma ordem de 28% sobre a combinação da menor profundidade de trabalho com a menor velocidade trabalhada. Considerando-se que estes efeitos profundidade e velocidade estão em interações de um sobre o efeito do outro, ou seja, seus resultados não podem ser distintamente.

Bianchini et al. (1996) em trabalho realizado em solo aluvial, com aproximadamente 60% de argila, que obtiveram variação significativa na força de tração, de 12,77 kN para 18,16 kN, quando a profundidade de trabalho de um escarificador de cinco hastes variou apenas 60 mm (de 270 para 330 mm), no entanto, ao avaliarem as velocidades de 1,0 m.s<sup>-1</sup> e de 1,6 m.s<sup>-1</sup> não encontraram diferença significativa entre as mesmas.

O modelo ajustado para esta condição pode ser expresso através de:

$$F_t = 17680 + 3843.V_r - 347.V_r^2 - 1226.p + 39.p^2$$

$$R^2 = 0,96$$

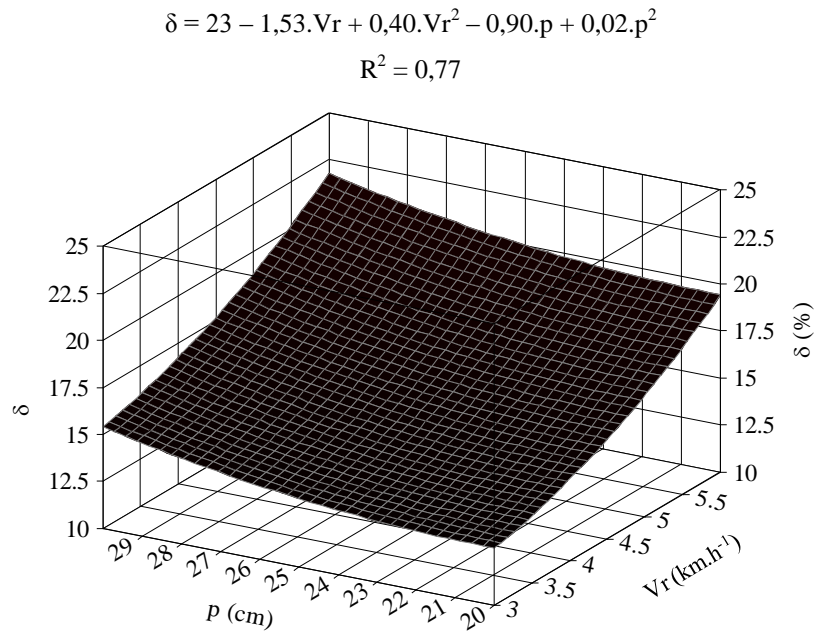


**Figura 27 - Diagrama tri-dimensional da força de tração (Ft) medida em função da variação da velocidade de deslocamento do trator (Vr) e da profundidade de trabalho (p) tracionando um escarificador, composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa.**

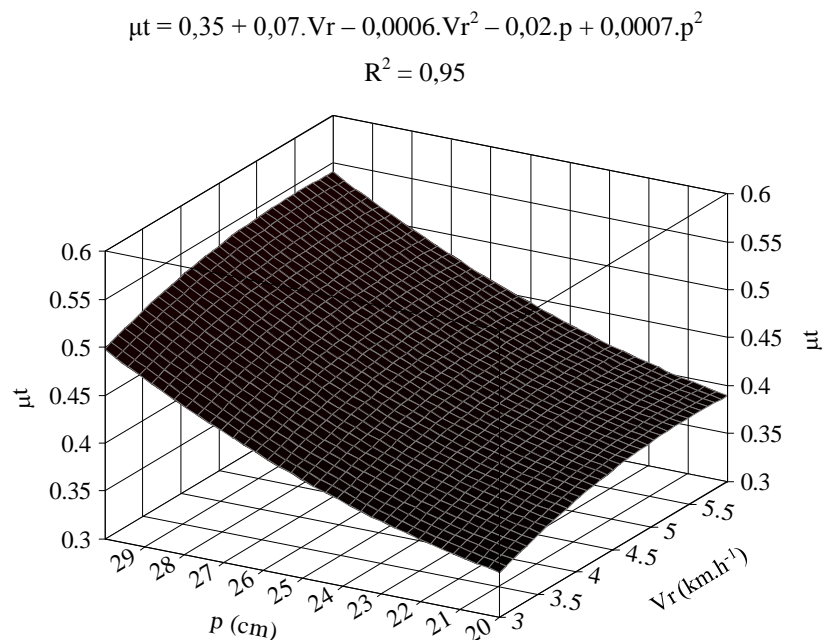
Os demais parâmetros, como patinagem (Figura 28) e coeficiente de força tangencial (Figura 29) podem ser representados por modelos quadráticos, assim como a força de tração.

Os coeficientes de correlação para patinagem e coeficiente de força tangencial foram 0,77 e 0,95, respectivamente.

Com o aumento da profundidade e da velocidade de deslocamento, a diferença de potência exigida foi de aproximadamente 38 kW, crescendo rapidamente a demanda, até atingir 65 kW na profundidade de 30 cm e velocidade de deslocamento de 6 km.h<sup>-1</sup> (Figura 30). Bianchini et al. (1996) encontraram diferenças significativas entre os valores de 17,91 kW e 22,02 kW para a potência, quando a profundidade de trabalho variou de 270 para 330 mm. Esses valores são estatisticamente diferentes pelo teste t–student, a nível de 0,05 de probabilidade, e mostram, ainda, que a energia requerida na barra de tração do trator, para preparar 1 ha de solo, diminui com o acréscimo da velocidade. Evidenciando, desta forma, a importância do fator velocidade no planejamento da operação de escarificação, não só pelo aumento da capacidade operacional, mas, também, pela redução da energia gasta no processo através do consumo de combustível gasto por unidade de área (Figura 31).



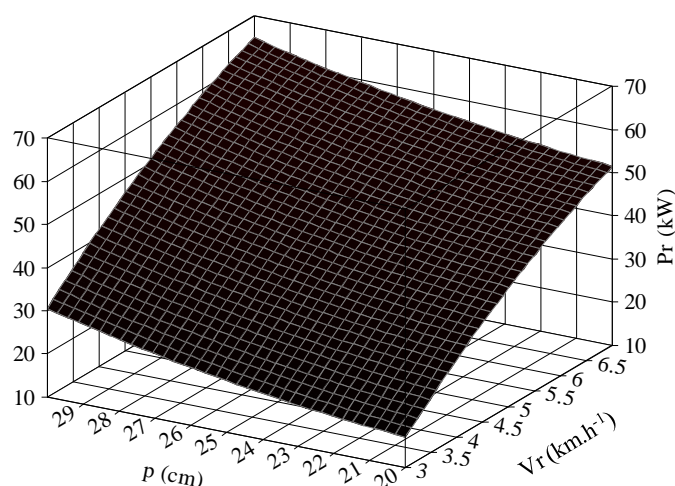
**Figura 28** - Diagrama tri-dimensional da patinagem do trator ( $\delta$ ) determinada em função da variação da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho de um escarificador ( $p$ ), composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa.



**Figura 29** - Diagrama tri-dimensional do coeficiente de força tangencial de um trator ( $\mu_t$ ) determinado em função da variação da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho de um escarificador ( $p$ ), composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa.

$$Pr = -10,61 + 16,93.Vr - 0,83.Vr^2 - 2,19.p + 0,07.p^2$$

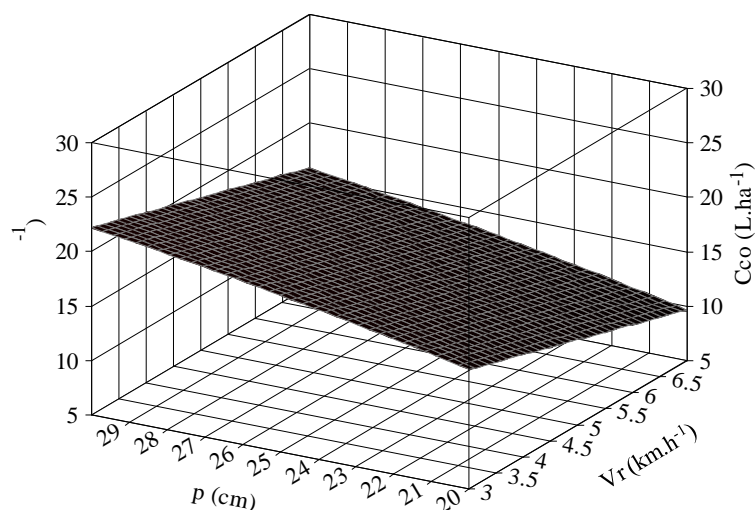
$$R^2 = 0,95$$



**Figura 30 - Diagrama tri-dimensional da potência requerida na barra de tração medida (Pr) em função da variação da velocidade de deslocamento do trator (Vr) e da profundidade de trabalho (p) ao tracionar um escarificador composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa.**

$$Cco = 1,40 - 1,58.Vr + 1,19.p + 0,01.p^2$$

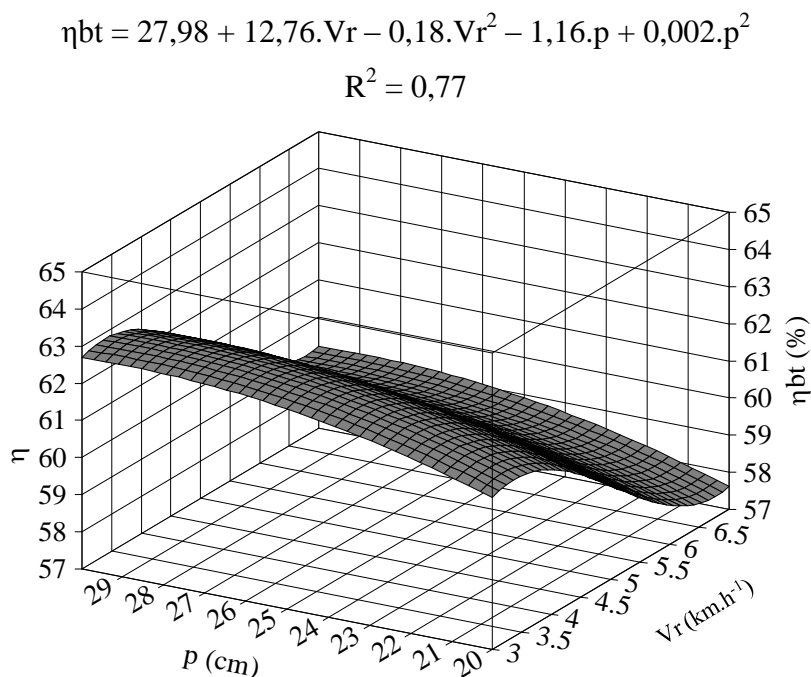
$$R^2 = 0,69$$



**Figura 31 - Diagrama tri-dimensional do consumo de combustível de um trator por unidade de área (Cco) medido em função da variação da velocidade de deslocamento do trator (Vr) e da profundidade de trabalho ao tracionar um escarificador (p), composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa.**



A melhor eficiência obtida neste trabalho, de 62,8 %, ocorreu na maior profundidade e na menor velocidade de deslocamento; no entanto, na menor profundidade combinada à maior velocidade o escarificador apresentou eficiência de 58,3 % que pode, a nível prático, ser considerada aceitável. A pequena diferença, embora significativa, encontrada nos ensaios, é observada na Figura 32, que mostra uma inclinação do modelo obtido pela regressão, em relação ao eixo da variável independente.



**Figura 32 - Diagrama tri-dimensional da eficiência em tração de um trator ( $\eta_{bt}$ ) determinado em função da variação da velocidade de deslocamento do trator ( $Vr$ ) e da profundidade de trabalho ao tracionar um escarificador ( $p$ ), composto por cinco hastes, em solo de textura argilosa.**

Estes resultados valorizam a recomendação da regulagem do escarificador como atividade capaz de maximizar o seu desempenho, devendo ser realizada observando-se criteriosamente os fatores profundidade de trabalho e velocidade de operação.

#### 4.2.5 Considerações finais sobre o desempenho em tração dos conjuntos mecanizados

Em geral, os modelos do comportamento dos parâmetros medidos e determinados em campo foram bons para todos os conjuntos mecanizados, com valores superiores a 70% no ajuste dos modelos. Como se optou em utilizar os dados coletados a cada um segundo, com amostragens na parcela, possibilitando a visualização na nuvem de dados graficamente sobre o modelo, aumentou-se a variância entre os dados, embora os valores acima de 70% em coeficiente de correlação para equações lineares e coeficientes de determinação em equações não lineares sejam precisos, pois representam melhor o comportamento da variável do que valores médios.

Equações lineares explicam com boa precisão a maioria dos comportamentos em demanda energética em solos de textura média e argilosa, além da facilidade em aplicá-la.

A grade aradora e o escarificador possuem influência de diferentes condições de trabalho, ao variar a velocidade de deslocamento e diferentes massas, e a velocidade de deslocamento e profundidade de trabalho, respectivamente. Descordando dos modelos publicados pela ASAE D497.2 (1995).

A demanda energética da semeadora é influenciada pela variação da velocidade de deslocamento, diferindo das indicações realizadas pela ASAE quanto a sua determinação.

A realização de experimentos com a grade aradora em diferentes texturas de solo possibilitou a constatação de que solos com textura média necessitam em média 12 % menos força de tração que solos argilosos, em acordo com a ASAE D497.4 (2003).

O consumo de combustível é significativamente sensível à variação da velocidade de deslocamento, em consequência da variação dos fatores estudados para cada implemento, no entanto, quando a capacidade operacional é aumentada com o aumento da velocidade aproveita-se melhor o combustível. No entanto, com o aumento da velocidade aumenta-se a patinagem e conseqüentemente reduz-se a eficiência em tração, demandando maior potência do trator, semelhante a resultados verificados em demais trabalhos científicos.

### **4.3 Desempenho experimental x desempenho preditivo**

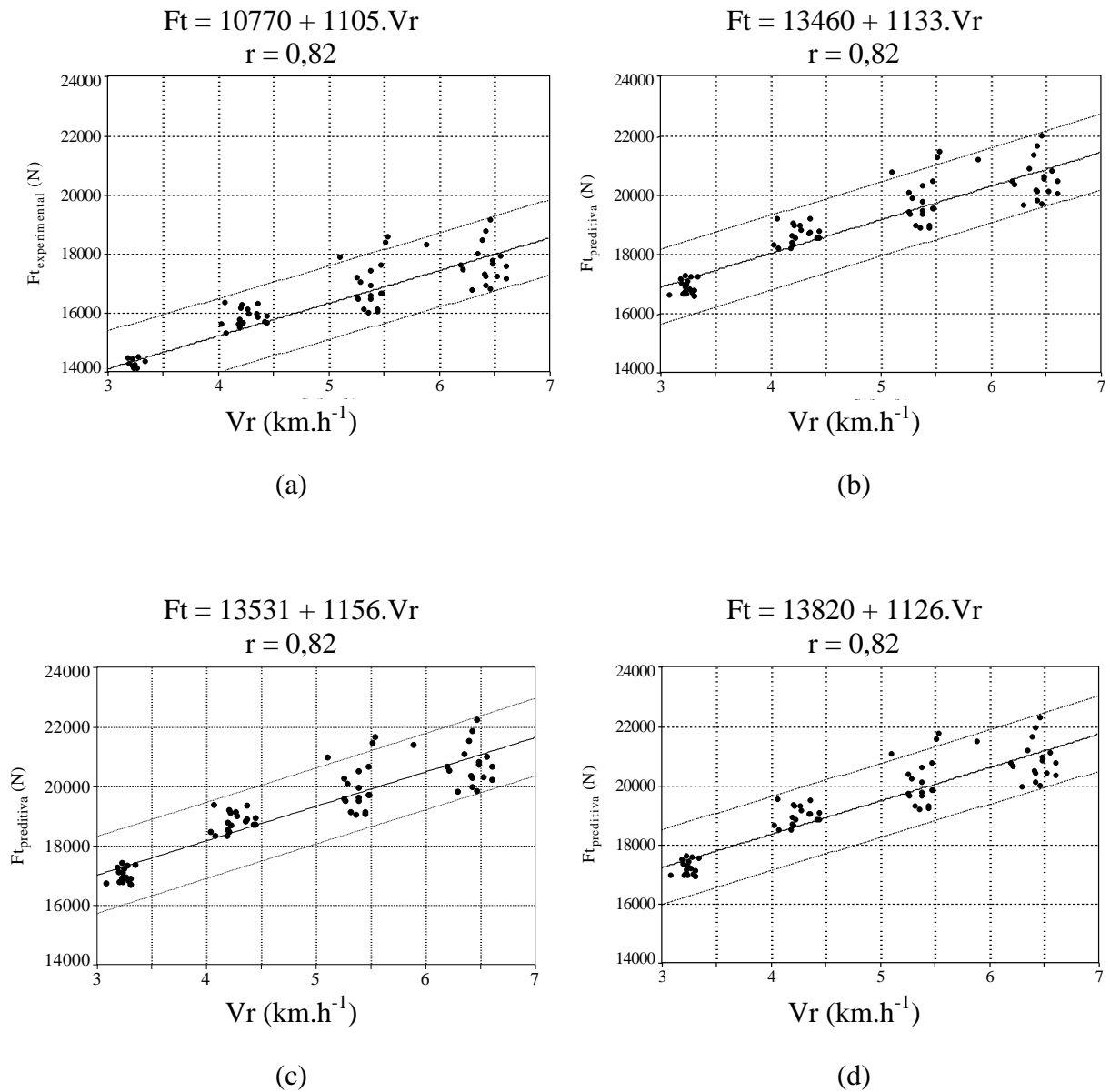
#### **4.3.1 Semeadora**

A força de tração medida em campo foi 17%, 18% e 19% inferior que a estimada pela teoria de predição Cn, Bn e Mn, respectivamente (Tabela 7), com valores para ajuste dos modelos lineares, tanto o medido quanto os preditivos acima de 90% (Figura 33). Embora os coeficientes de correlação sejam considerados altos (Tabela 7) apresentados pela Figura 34.

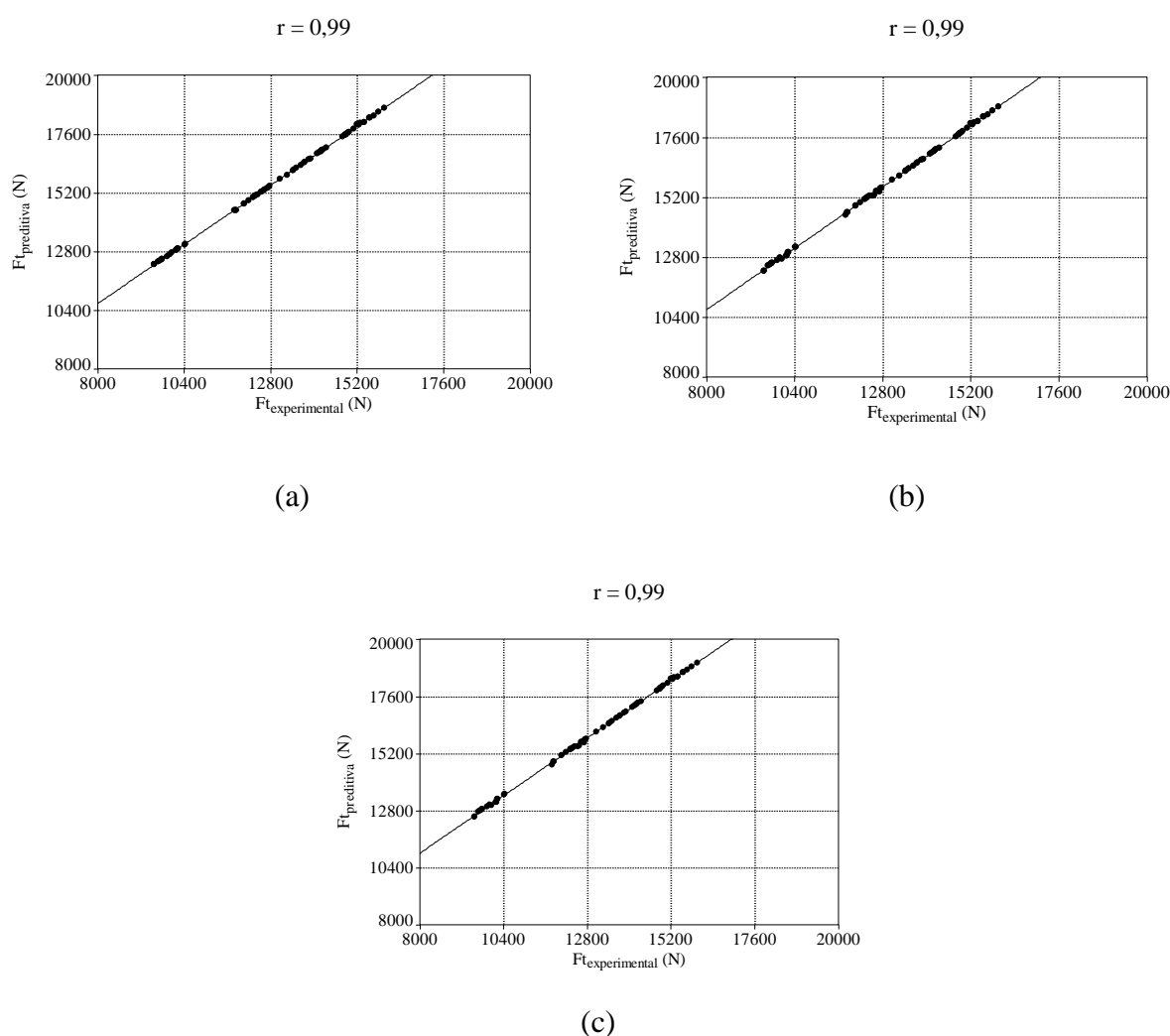
**Tabela 7 - Médias de variáveis de desempenho para o conjunto trator-semeadora-adubadora e respectivos coeficiente de correlação entre valores experimentais e valores preditivos pelas teorias de para solo de textura média.**

Modelo	Médias (%)	r
Força de Tração (N)		
Experimental	12.844,10	-
Cn	15.498,38	0,99
Bn	15.630,80	0,99
Mn	15.866,83	0,99
Patinagem (%)		
Experimental	14,91	-
Cn	10,92	0,63
Bn	8,45	0,84
Mn	8,37	0,84
Coeficiente de força tangencial		
Experimental	0,79	-
Cn	0,65	0,99
Bn	0,66	0,99
Mn	0,67	0,99

Através do teste t realizou-se a aceitação da hipótese alternativa, isto é, a média dos desvios é diferente de zero, o que permitiu concluir que a força de tração medida e a preditiva pelas Teoria Cn, Bn e Mn diferem significativamente, com 5% de probabilidade de erro, todavia que as análises de correlação demonstraram uma ótima relação entre os modelos ajustados para a variável força de tração medida e para as teorias preditivas, permitindo concluir que a magnitude seja diferentemente significativa estatisticamente em nível de 5% de probabilidade de erro entre os valores medidos e estimados, ainda que o comportamento do modelo seja o mesmo.



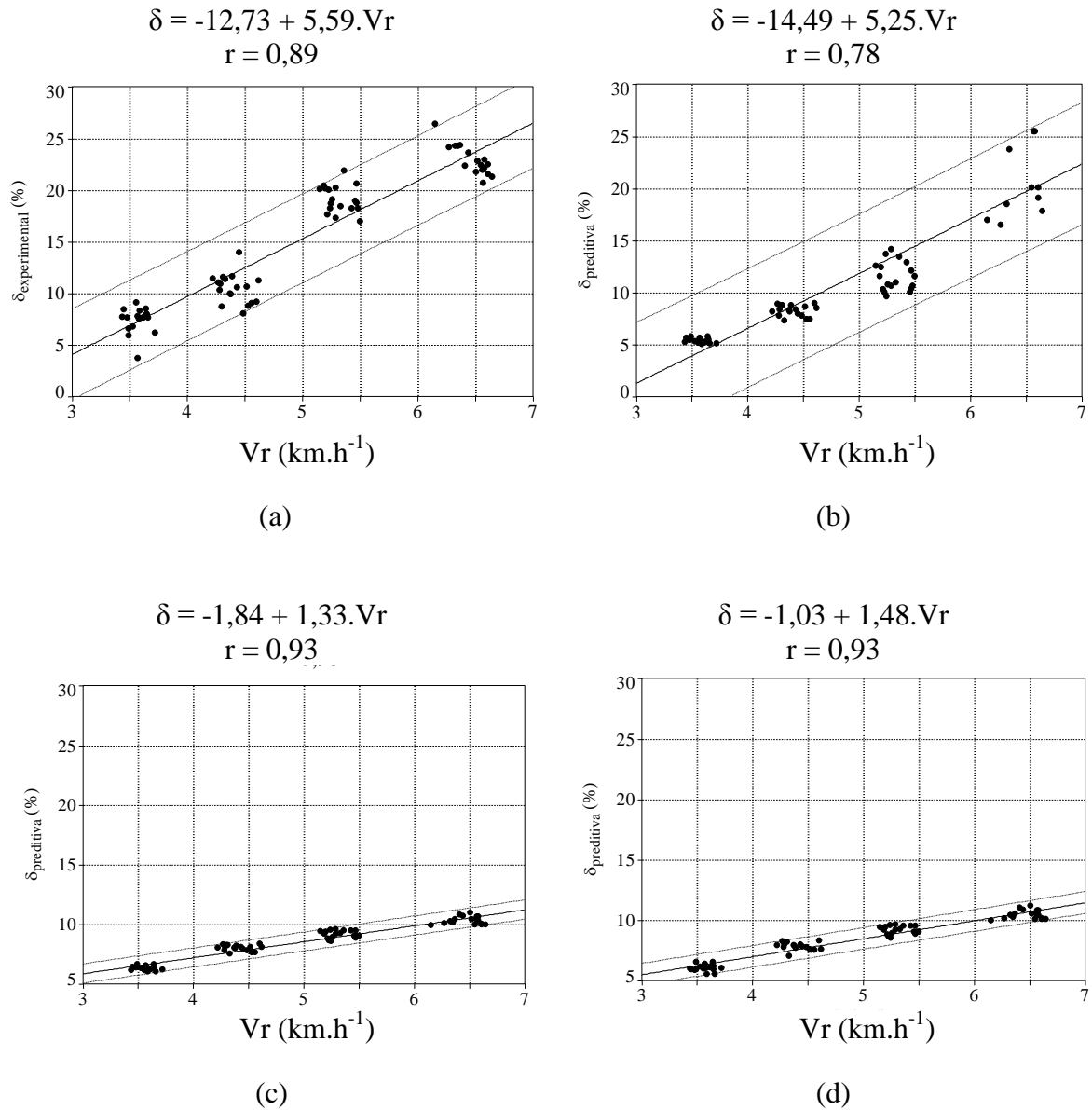
**Figura 33 - Diagrama tri-dimensional da força de tração medida na barra ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) (a) e preditivas ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar uma semeadora-adubadora de cinco linhas em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa.**



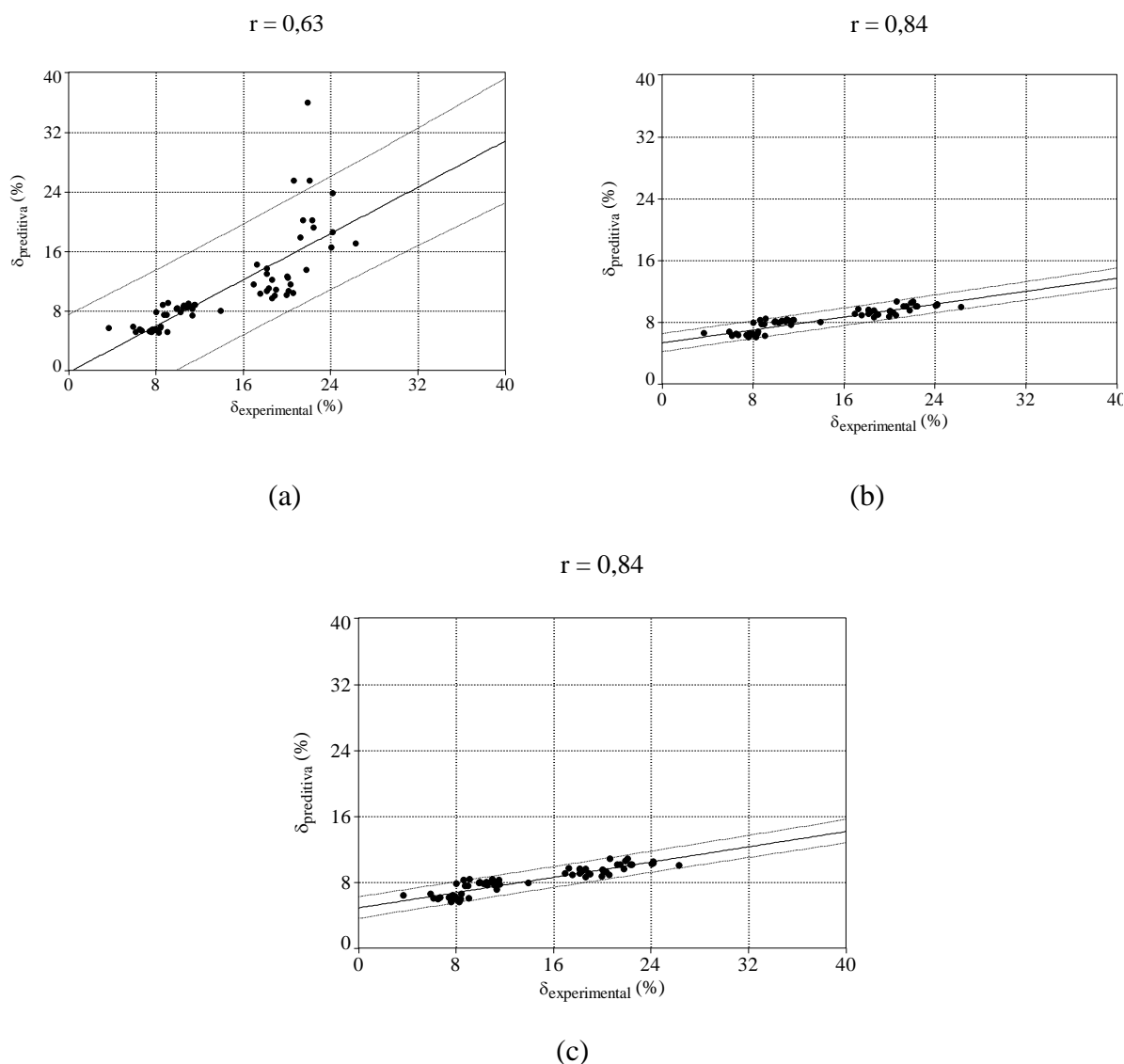
**Figura 34 - Diagrama de dispersão da força de tração medida ( $F_{t\_experimental}$ ) em função da força de tração preditiva das teorias preditivas ( $F_{t\_preditiva}$ ) Cn (a), Bn (b) e Mn (c) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-semeadora-adubadora composta por cinco linhas, em solo de textura média.**

Pode-se observar que os valores médios de patinagem medidos foram 26 % superiores aos valores preditivos pela teoria Cn, enquanto as teorias Bn e Mn apresentaram valores preditivos 43% inferiores ao experimental, respectivamente (Tabela 7) e a representação gráfica é apresentada na Figura 35.

Este acréscimo de patinagem quando utilizado para estimar a força de tração causa uma subestimativa da mesma, determinando conseqüentemente, uma menor necessidade de potência disponível. Obtiveram-se bons coeficientes de correlação (Figura 36).



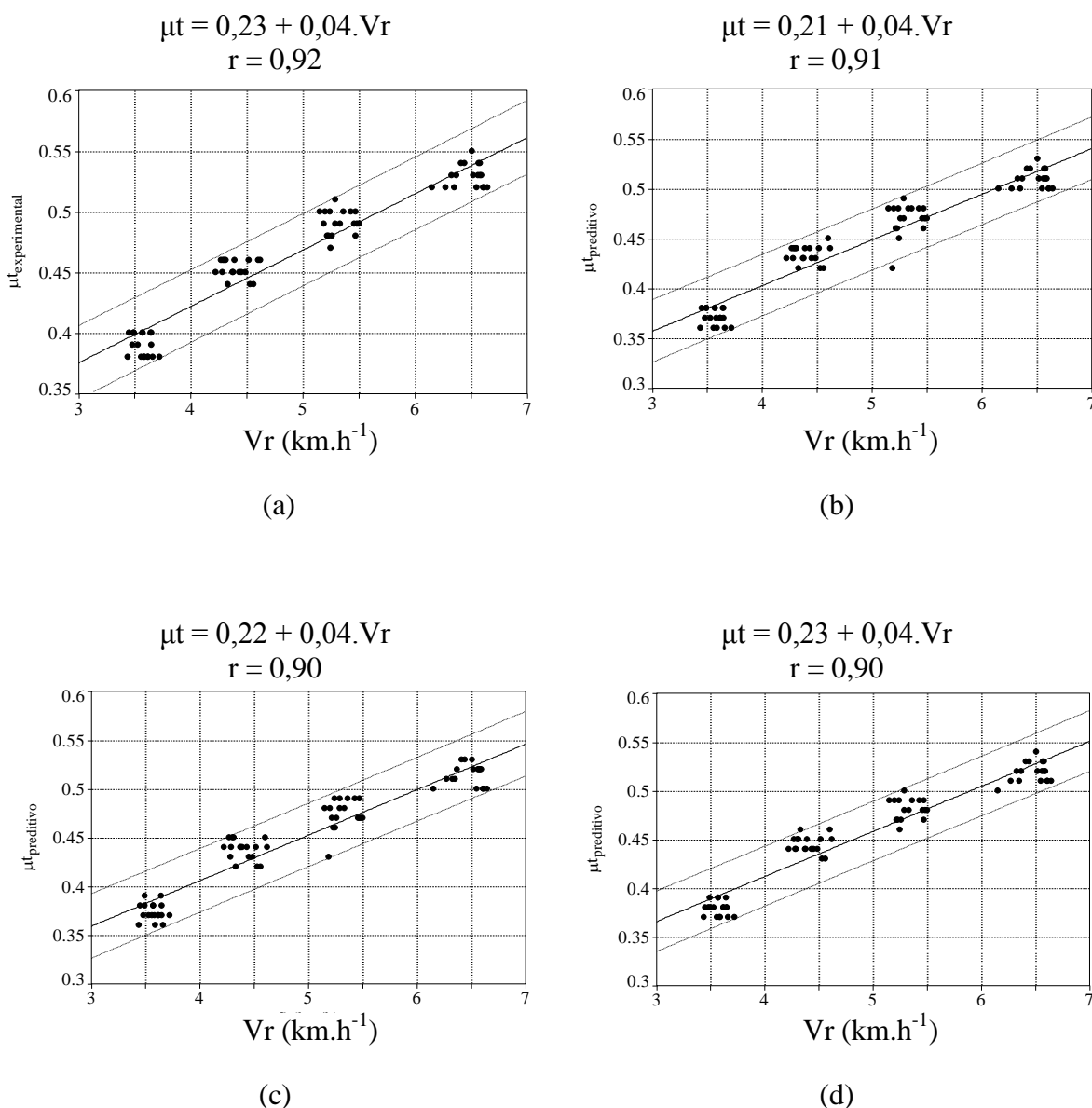
**Figura 35 - Patinagem das rodas motrizes do trator medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) (a) e preditivas ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) de um trator ao tracionar uma semeadora-adubadora de cinco linhas em função da variação de velocidade de deslocamento do trator (Vr) em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.**



**Figura 36 - Diagrama de dispersão da patinagem das rodas motrizes medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) em função da patinagem obtida através da aplicação das Teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\delta_{\text{predictiva}}$ ) em valor percentual e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-semeadora-adubadora composta por cinco linhas, em solo de textura média.**

Na Figura 37 pode-se observar que em todos os modelos com bons ajustes, o coeficiente de força tangencial apresenta comportamento exponencial positivo à medida que se aumentou a patinagem, bem como para a velocidade de deslocamento. Enquanto o modelo

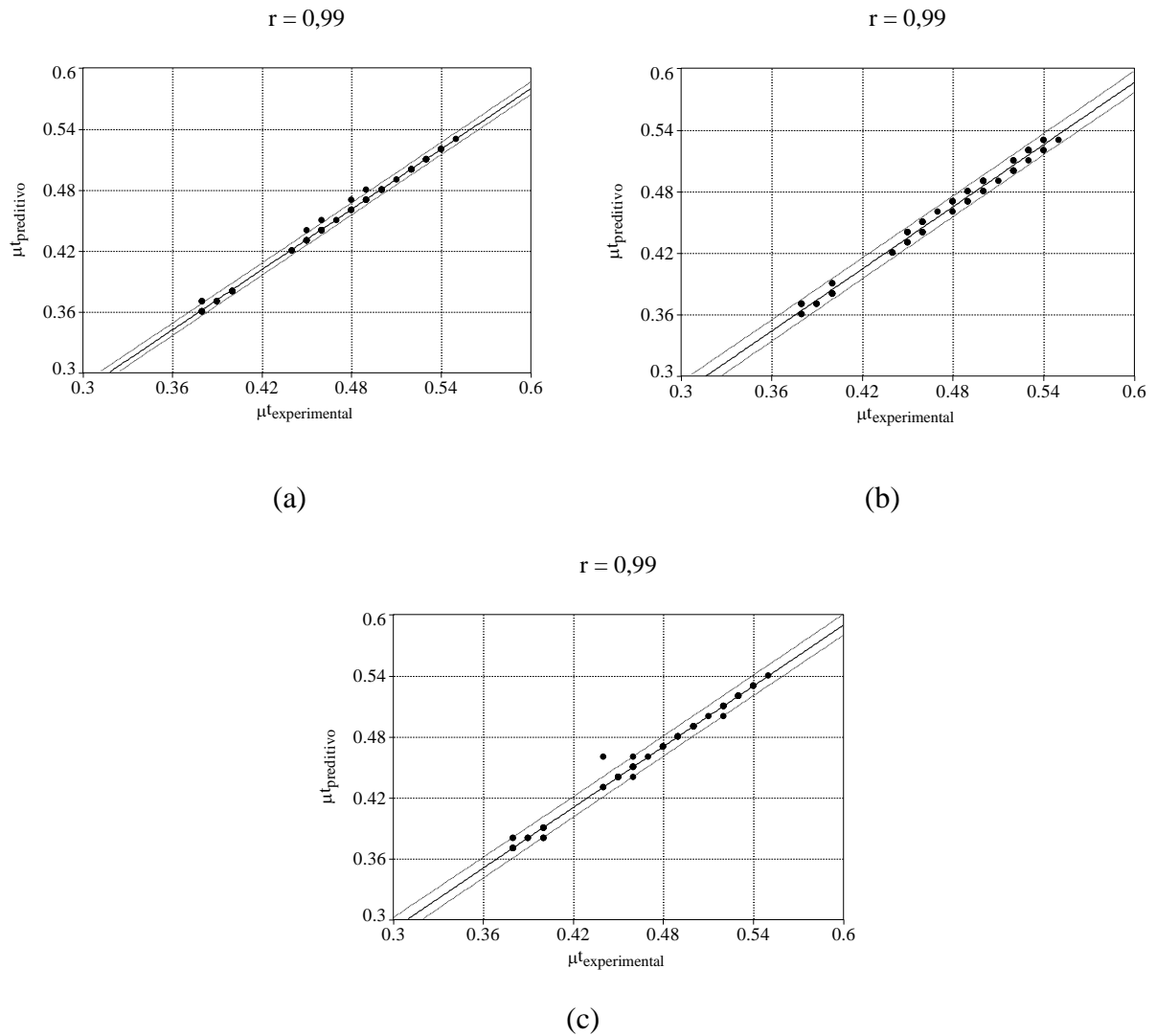
de estimativa Cn apresentou baixa correlação, e as teorias preditivas Bn e Mn apresentaram coeficientes de correlação melhores, acima de 85%. Como a patinagem está relacionada com a velocidade de deslocamento, o coeficiente de força tangencial também acompanha crescimento exponencial positivo à medida que a velocidade de deslocamento foi aumentada.



**Figura 37 - Coeficiente de força tangencial do trator medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivos ( $\mu_{t_{\text{predictivo}}}$ ) estimados pelas teorias de previsão Cn (b), Bn (c) e Mn (d) de um trator ao tracionar uma semeadora de cinco linhas em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.**



A teoria Cn apresentou menor ajuste ao modelo do que as teorias Bn e Mn, relacionados aos valores observados para os dados experimentais, ou seja, a sua variação é menos explicada pela teoria Cn (Figura 38).



**Figura 38 - Diagrama de dispersão do coeficiente de força tangencial medido ( $\mu_{\text{experimental}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\mu_{\text{preditivo}}$ ) em valor decimal e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-semeadora-adubadora composta por cinco linhas, em solo de textura média.**

## 4.3.2 Grade aradora

A Tabela 8 apresenta um resumo das regressões obtidas para a grade aradora, demonstrando o efeito da velocidade de deslocamento em solo de textura argilosa e da interação significativa para a velocidade e massa da grade em solo de textura média. Os resultados segundo a análise de regressão mostram efeito linear para a velocidade e massa da grade altamente significativo ( $F < 0,05$ ).

**Tabela 8 - Coeficientes de regressão para determinação da força de tração do conjunto trator-grade-aradora ao trabalhar em solo de textura argilosa e média e respectivos coeficientes de correlação para os parâmetros força de tração, patinagem e coeficiente de força tangencial.**

Variável	Modelo	Coeficientes de regressão		r
		Símbolo	Valor	
Textura média				
Força de tração	Medido em campo	$C_0$	- 431	0,77
		$C_1 (Vr)$	1.457	
		$C_2 (M)$	3,44	
	Teoria Cn	$C_0$	902	0,58
		$C_1 (Vr)$	1.478	
		$C_2 (M)$	3,44	
	Teoria Bn	$C_0$	2.114	0,77
		$C_1 (Vr)$	1.484	
		$C_2 (M)$	3,51	
	Teoria Mn	$C_0$	2.549	0,77
		$C_1 (Vr)$	1.484	
		$C_2 (M)$	3,51	
Patinagem	Medido em campo	$C_0$	- 12,16	0,88
		$C_1 (Vr)$	1,79	
		$C_2 (M)$	0,007	
	Teoria Cn	$C_0$	- 1,23	0,64
		$C_1 (Vr)$	0,49	
		$C_2 (M)$	0,001	
	Teoria Bn	$C_0$	- 1,48	0,76
		$C_1 (Vr)$	1,08	
		$C_2 (M)$	0,002	
		$C_2 (M)$	0,003	

	Modelo	Coeficientes de regressão		r
		Símbolo	Valor	
Coeficiente de força tangencial	Teoria Mn	C <sub>0</sub>	- 2,52	0,75
		C <sub>1</sub> (Vr)	1,18	
		C <sub>2</sub> (M)	0,003	
	Medido em campo	C <sub>0</sub>	0,07	0,83
		C <sub>1</sub> (Vr)	0,04	
		C <sub>2</sub> (M)	0,0001	
	Teoria Cn	C <sub>0</sub>	0,04	0,63
		C <sub>1</sub> (Vr)	0,03	
		C <sub>2</sub> (M)	0,0001	
	Teoria Bn	C <sub>0</sub>	0,05	0,76
		C <sub>1</sub> (Vr)	0,03	
		C <sub>2</sub> (M)	0,00001	
Teoria Mn	C <sub>0</sub>	0,06	0,77	
	C <sub>1</sub> (Vr)	0,03		
	C <sub>2</sub> (M)	0,0001		
----- Textura argilosa -----				
Força de tração	Medido em campo	C <sub>0</sub>	10.770	0,82
		C <sub>1</sub> (Vr)	1.105	
	Teoria Cn	C <sub>0</sub>	13.460	0,82
		C <sub>1</sub> (Vr)	1.113	
	Teoria Bn	C <sub>0</sub>	13.531	0,82
		C <sub>1</sub> (Vr)	1.156	
Teoria Mn	C <sub>0</sub>	13.820	0,82	
	C <sub>1</sub> (Vr)	1.126		
Patinagem	Medido em campo	C <sub>0</sub>	- 4,02	0,91
		C <sub>1</sub> (Vr)	3,71	
	Teoria Cn	C <sub>0</sub>	2,06	0,77
		C <sub>1</sub> (Vr)	0,87	
	Teoria Bn	C <sub>0</sub>	6,30	0,82
		C <sub>1</sub> (Vr)	1,02	
Teoria Mn	C <sub>0</sub>	5,74	0,81	
	C <sub>1</sub> (Vr)	1,31		
Coeficiente de força tangencial	Medido em campo	C <sub>0</sub>	0,32	0,84
		C <sub>1</sub> (Vr)	0,02	
	Teoria Cn	C <sub>0</sub>	0,39	0,81
		C <sub>1</sub> (Vr)	0,02	
	Teoria Bn	C <sub>0</sub>	0,39	0,82
		C <sub>1</sub> (Vr)	0,03	
Teoria Mn	C <sub>0</sub>	0,40	0,82	
	C <sub>1</sub> (Vr)	0,03		

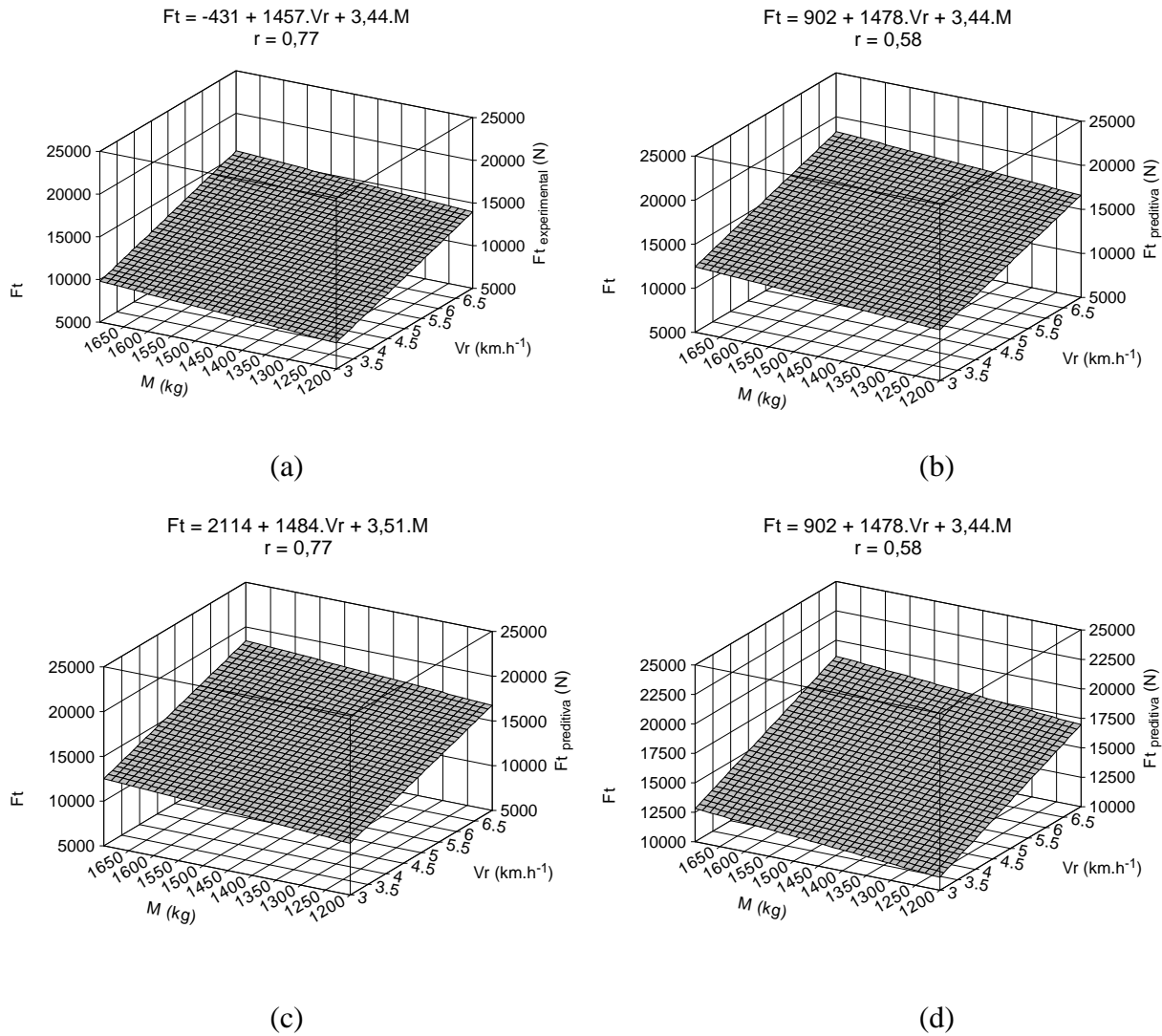
A alta correlação entre os modelos ajustados para os valores experimentais e preditivos fornecem uma indicação da proporção da variância dos valores estimados que possam ser explicados pelo conhecimento da variação do comportamento da força de tração medida experimentalmente, observando-se uma tendenciosidade positiva (Figura 39). Neste caso, a raiz quadrada do coeficiente de determinação, que é o coeficiente de correlação ( $r$ ) em equações lineares, foi testada estatisticamente, pois está incluída em uma estatística de teste que é distribuída segundo uma distribuição  $t$ , quando a correlação populacional  $\rho=0$

Na Figura 40 pode-se verificar que a força de tração média medida em campo é inferior frente aos resultados apresentados pelas teorias Cn, Bn e Mn, sendo esta última teoria, aquela que mais distanciou-se dos resultados obtidos em campo.

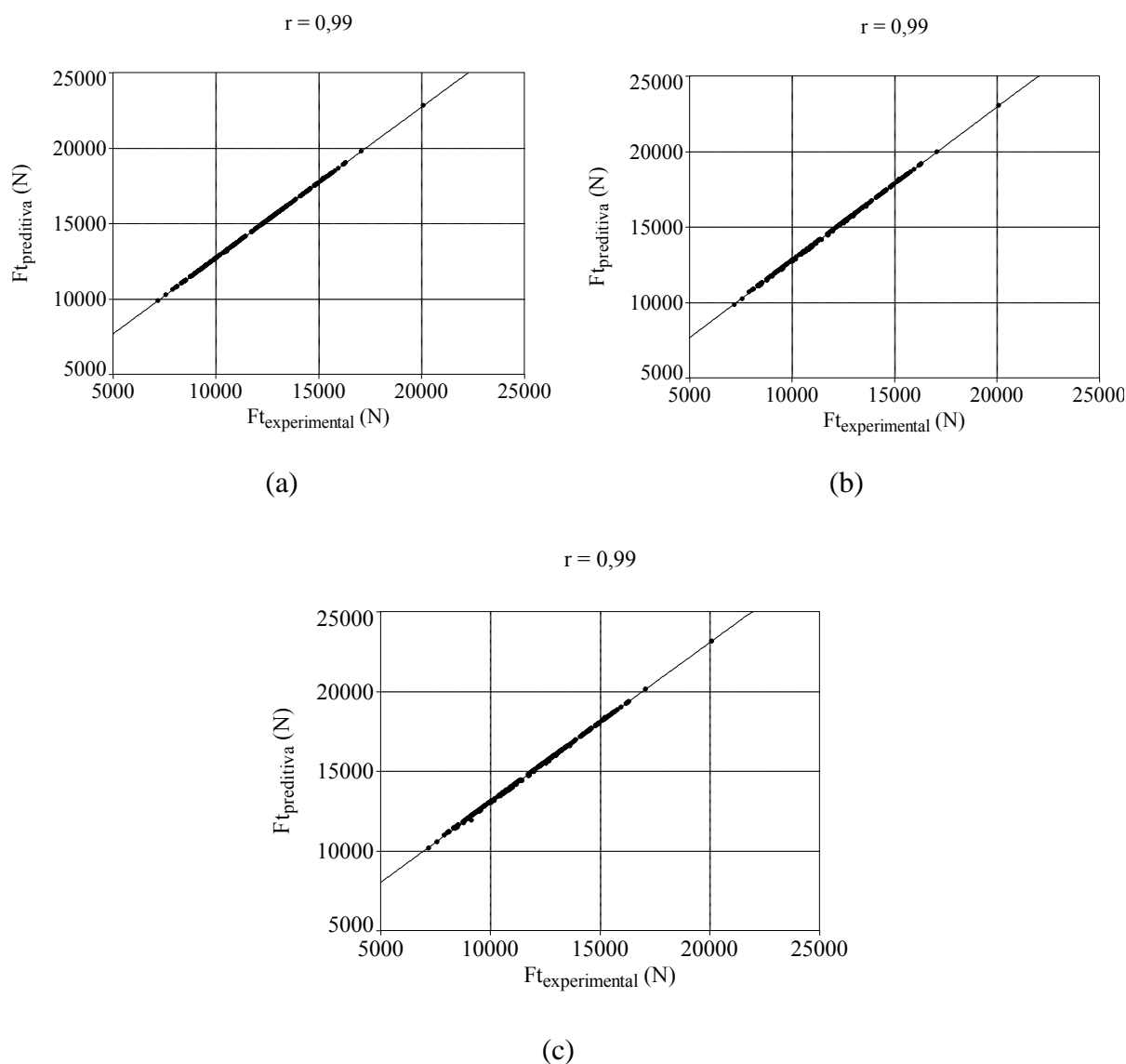
Ao observar a Tabela 9, verifica-se a tendência das teorias preditivas de superestimarem os valores de força de tração, na ordem de 15 % para teoria Cn e 16% para as teorias Bn e Mn superiores aos valores medidos experimentalmente. Já em solos argilosos esses valores ficam entre 18% para as teorias Cn e Bn e de até 20% para a teoria Mn.

**Tabela 9 - Médias de força de tração do conjunto trator-grade-aradora e análise de correlação ( $r$ ) entre valores medidos em campo (experimental) e valores estimados pelas teorias de previsão Cn, Bn e Mn para solos de textura argilosa e média.**

Modelos	Médias (N)	$r$
----- Textura média -----		
Experimental	12.036,8	-
Teoria Cn	14.725,38	0,99
Teoria Bn	14.822,37	0,99
Teoria Mn	15.069,82	0,99
----- Textura argilosa -----		
Experimental	16.104,71	-
Teoria Cn	18.929,38	0,99
Teoria Bn	19.109,95	0,99
Teoria Mn	19.251,22	0,99

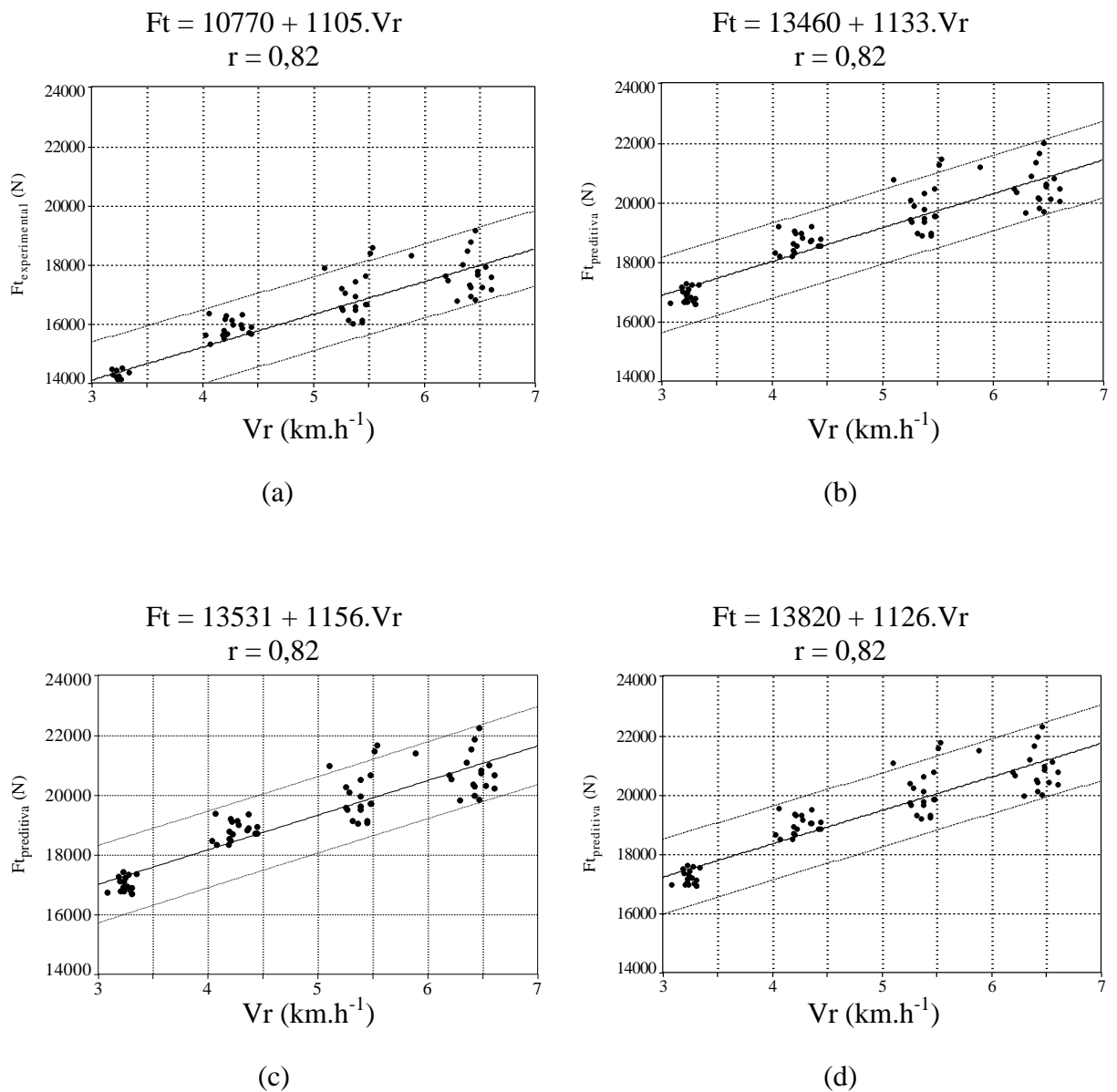


**Figura 39 - Diagrama tri-dimensional da força de tração medida na barra do trator ( $F_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivas ( $F_{t_{\text{preditiva}}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar uma grade aradora composta por 18 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da massa da grade (M) trabalhando em solo de textura média.**



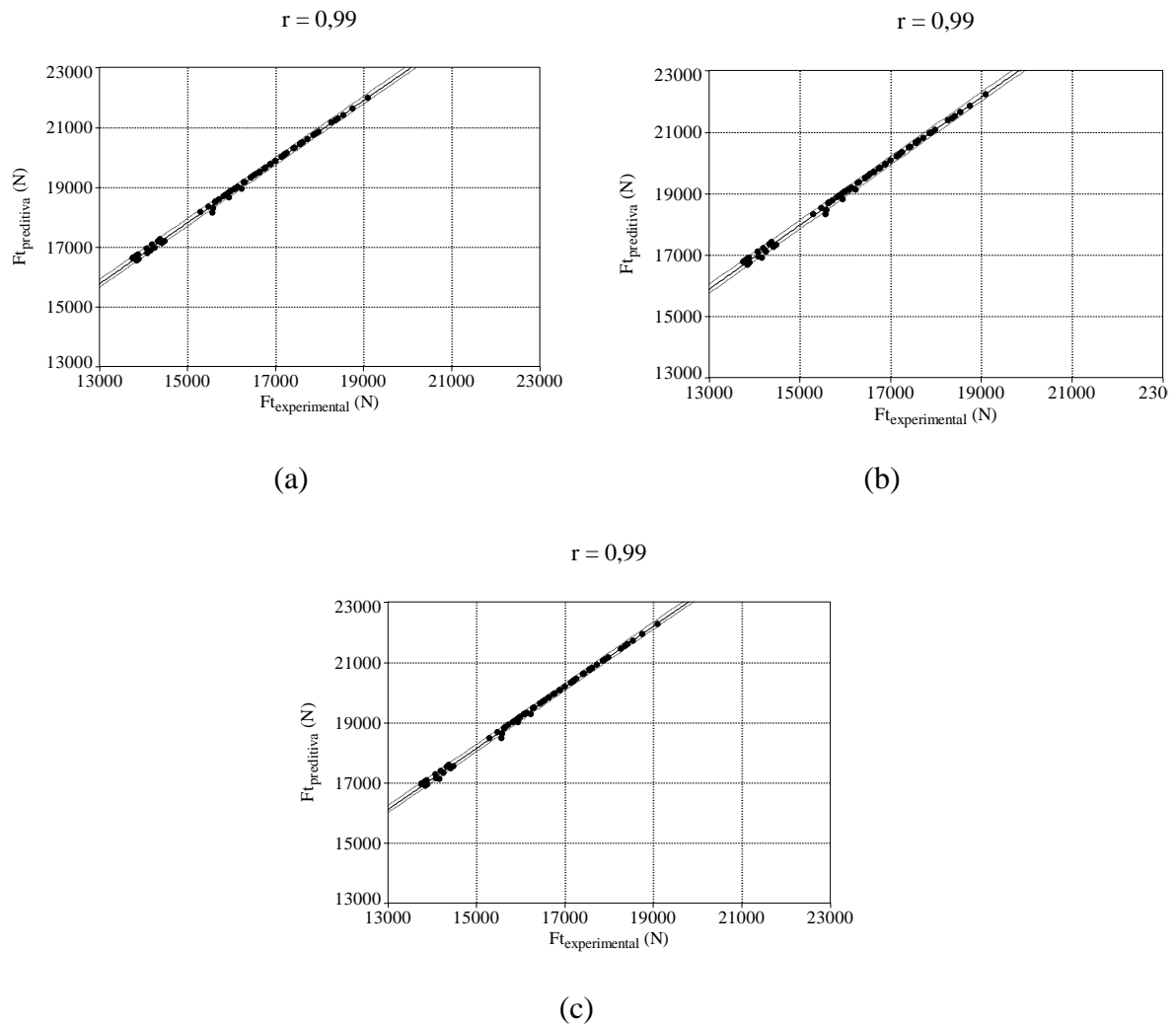
**Figura 40 - Diagrama de dispersão da força de tração medida na barra do trator ( $F_{t_{\text{experimental}}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $F_{t_{\text{predictiva}}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradadora composta por 18 discos, em solo de textura média.**

Na Figura 41 é possível verificar o comportamento linear da força de tração em função da velocidade de deslocamento em solo de textura argilosa, cujo coeficiente de correlação foi maior ao utilizar o modelo com ajuste dos dados experimentais.



**Figura 41 - Força de tração medida na barra do trator ( $Ft_{\text{experimental}}$ ) (a) e preditivas ( $Ft_{\text{predictiva}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar uma grade aradora composta por 22 discos em função da velocidade de deslocamento do trator (Vr) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.**

Abaixo, na Figura 42, segue a representação do ótimo relacionamento entre o preditivo e o experimental.



**Figura 42 - Diagrama de dispersão da força de tração medida ( $F_{t\_experimental}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de previsão Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $F_{t\_preditiva}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradora composta por 22 discos, em solo de textura argilosa.**

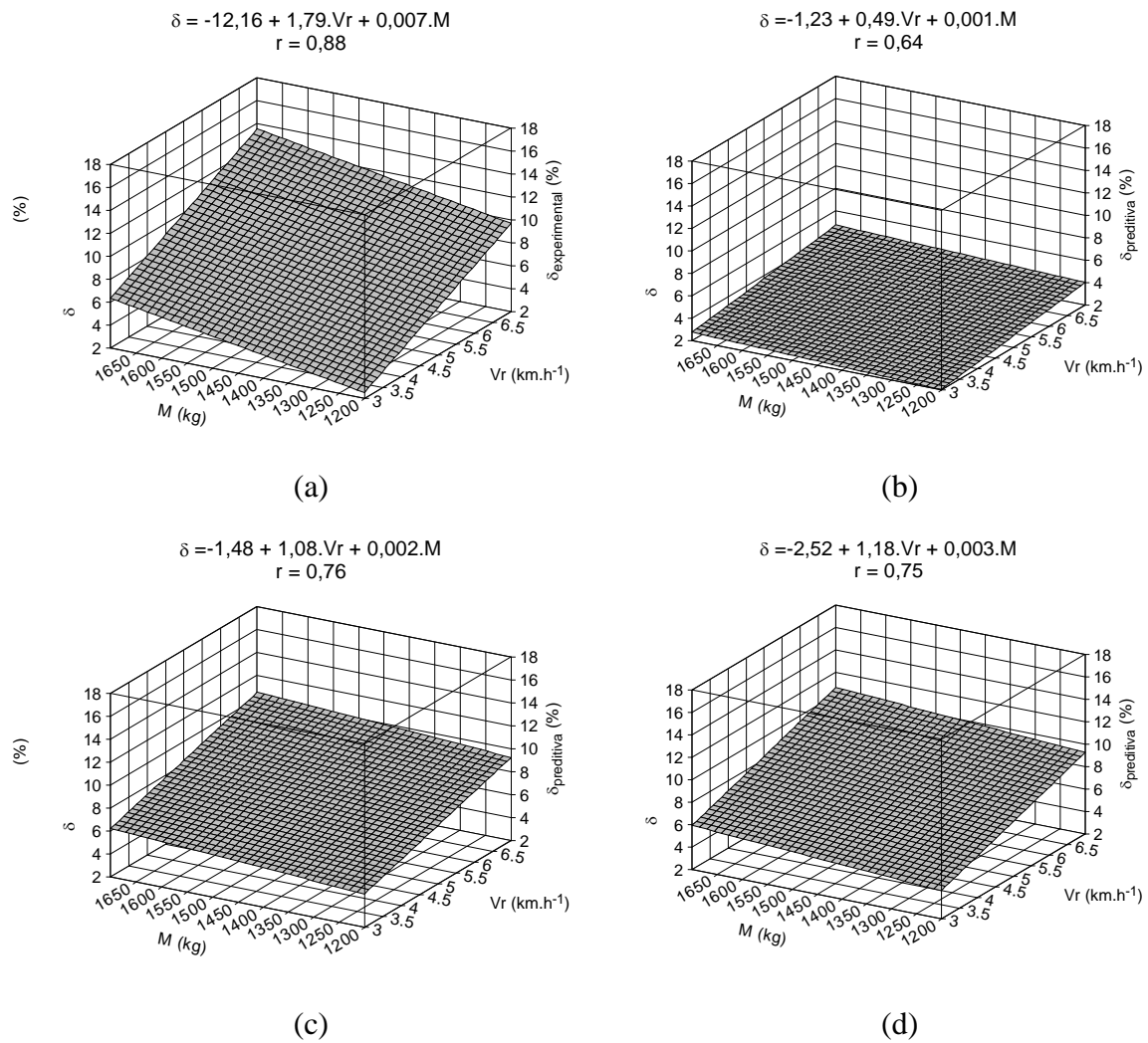
A Tabela 10 apresenta os valores médios de patinagens experimentais e preditivas com o coeficiente de correlação entre os modelos (Figura 44 e Figura 44).



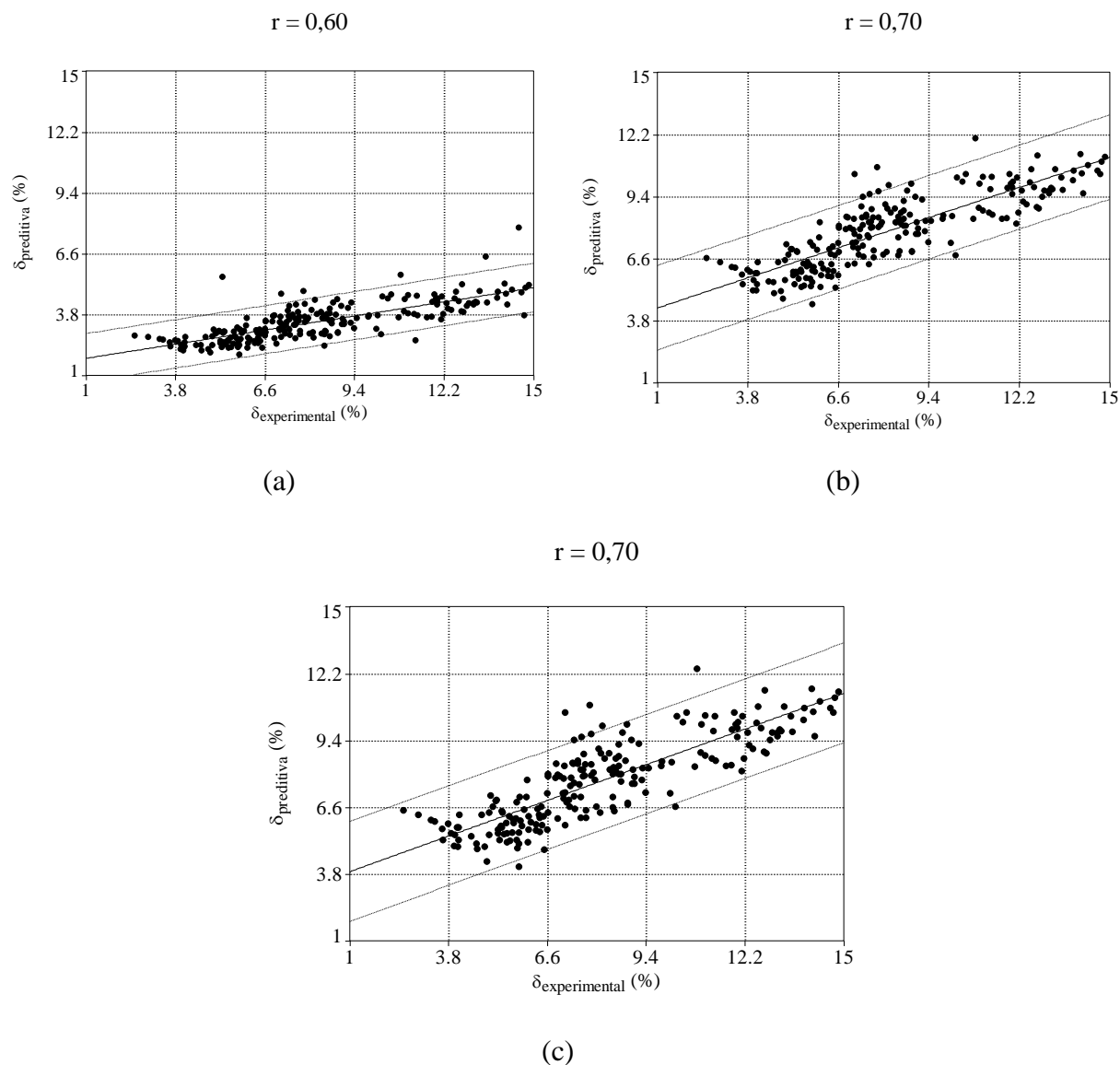
**Tabela 10 - Médias de patinagem das rodas motrizes do trator ao tracionar uma grade-aradora e análise de correlação entre valores experimentais e valores preditivos em solos de textura argilosa e média.**

Modelos	Médias (%)	r
----- Textura média -----		
Experimental	10,21	-
Teoria Cn	3,46	0,60
Teoria Bn	7,87	0,70
Teoria Mn	7,74	0,70
----- Textura argilosa -----		
Experimental	13,89	-
Teoria Cn	6,29	0,69
Teoria Bn	11,28	0,74
Teoria Mn	12,06	0,74

Ao aplicar o teste t verificou-se a aceitação da hipótese alternativa sob solo de textura média e argilosa, tal como para força de tração, também permitindo concluir que a patinagem medida experimentalmente e a preditiva pelas Teorias Cn, Bn e Mn diferem significativamente, com 5% de probabilidade de erro. Além disso, as análises de correlação demonstraram baixa relação entre os modelos ajustados para esta variável na comparação entre os modelos ajustados experimentalmente e os estimados através das teorias preditivas, tornando possível concluir que além da magnitude dos valores serem diferentemente significativos estatisticamente em nível de 5% de probabilidade de erro entre os valores medidos e estimados, o comportamento da patinagem não foi o mesmo, apesar de todos os modelos ajustados, tanto experimentais, quanto os preditivos para patinagem apresentarem modelos lineares de  $\delta = A + (B*S) + (C*M)$ , com coeficientes de determinação bons, pode-se observar na Figura 50 que a patinagem varia em menor magnitude em função da velocidade no eixo X que os demais modelos estimados pelas teorias, enquanto para a variação da massa da grade no eixo Y foi obtido maior patinagem na gradagem em solo de textura argilosa.



**Figura 43 - Diagrama tri-dimensional da patinagem das rodas motrizes do trator medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) (a) e preditivas ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar uma grade aradora composta por 18 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $Vr$ ) e da massa da grade ( $M$ ) em solo de textura média.**



**Figura 44 - Diagrama de dispersão da patinagem das rodas motrizes do trator medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) em função da predita através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradora composta por 18 discos, em solo de textura média.**

No solo de textura argilosa a patinagem também se comporta de maneira linear crescente. Os valores medidos em campo a partir de 4 km/h passam a ser maiores que os modelos de predição, com diferença sob máxima velocidade trabalhada de 61, 36 e 30% respectivamente, para as teorias Cn, Bn e Mn (Figura 45). O maior coeficiente de correlação

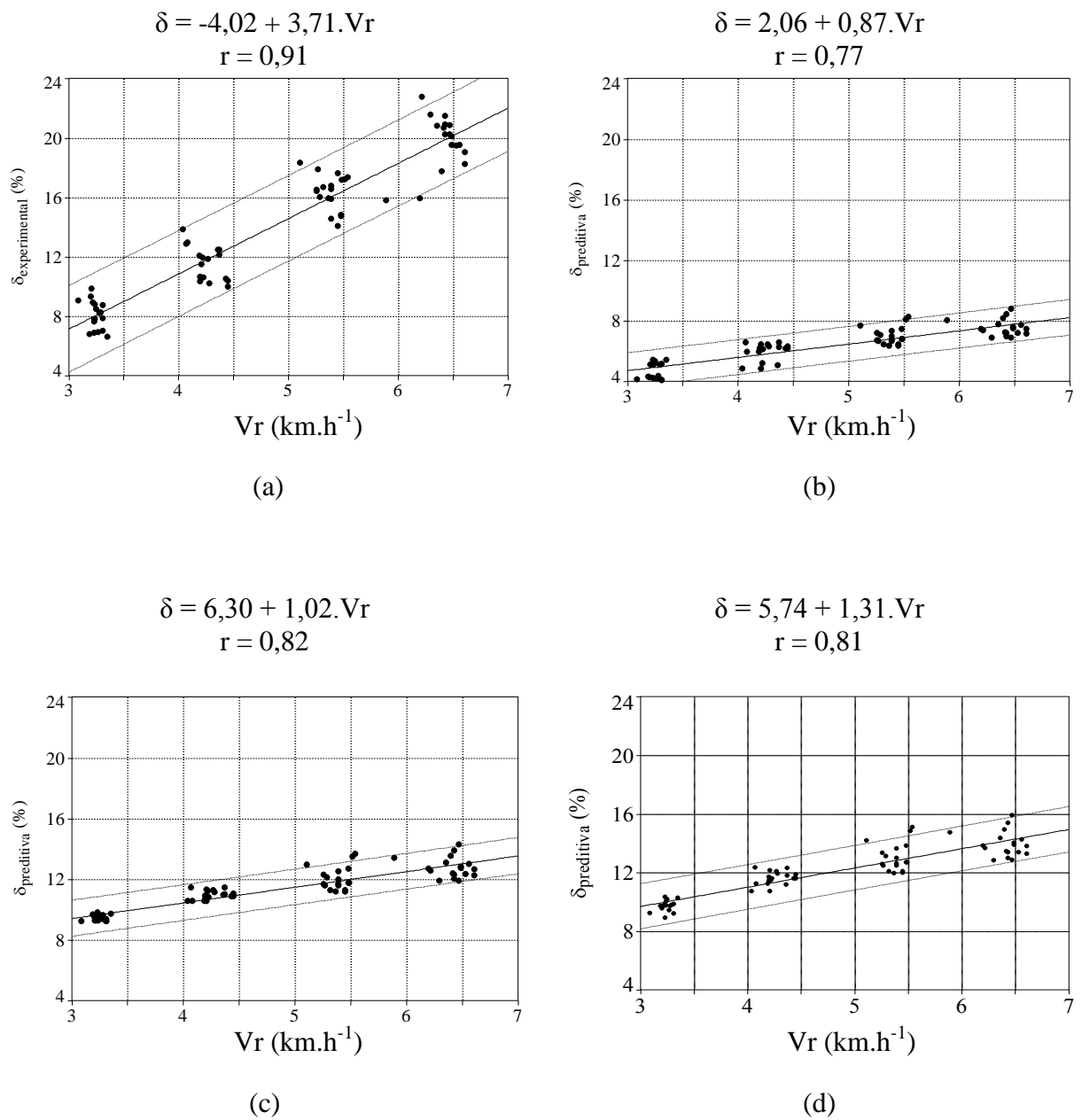
encontrado ao compará-los com os valores preditos foi através da aplicação da teoria Mn (Figura 46), porém essa relação pode subestimar os valores reais, tornando a seleção de um trator com menor potência disponível inadequado para a realização da gradagem.

Embora o coeficiente de força tangencial seja muito similar para as condições de simulações, pois o peso que gravita na roda e a carga na barra de tração são os mesmos para cada teoria de predição, variando apenas a resistência ao rolamento para cada condição, o patinagem verificado foi maior para as Teoria Bn e Mn, possivelmente devido ao ajuste realizado para estas últimas teorias preditivas, com a modificação e adição de novos coeficientes nos modelos Bn e Mn para o parâmetro patinagem na determinação do coeficiente de força tangencial, mais específicos para cada tipo de solo.

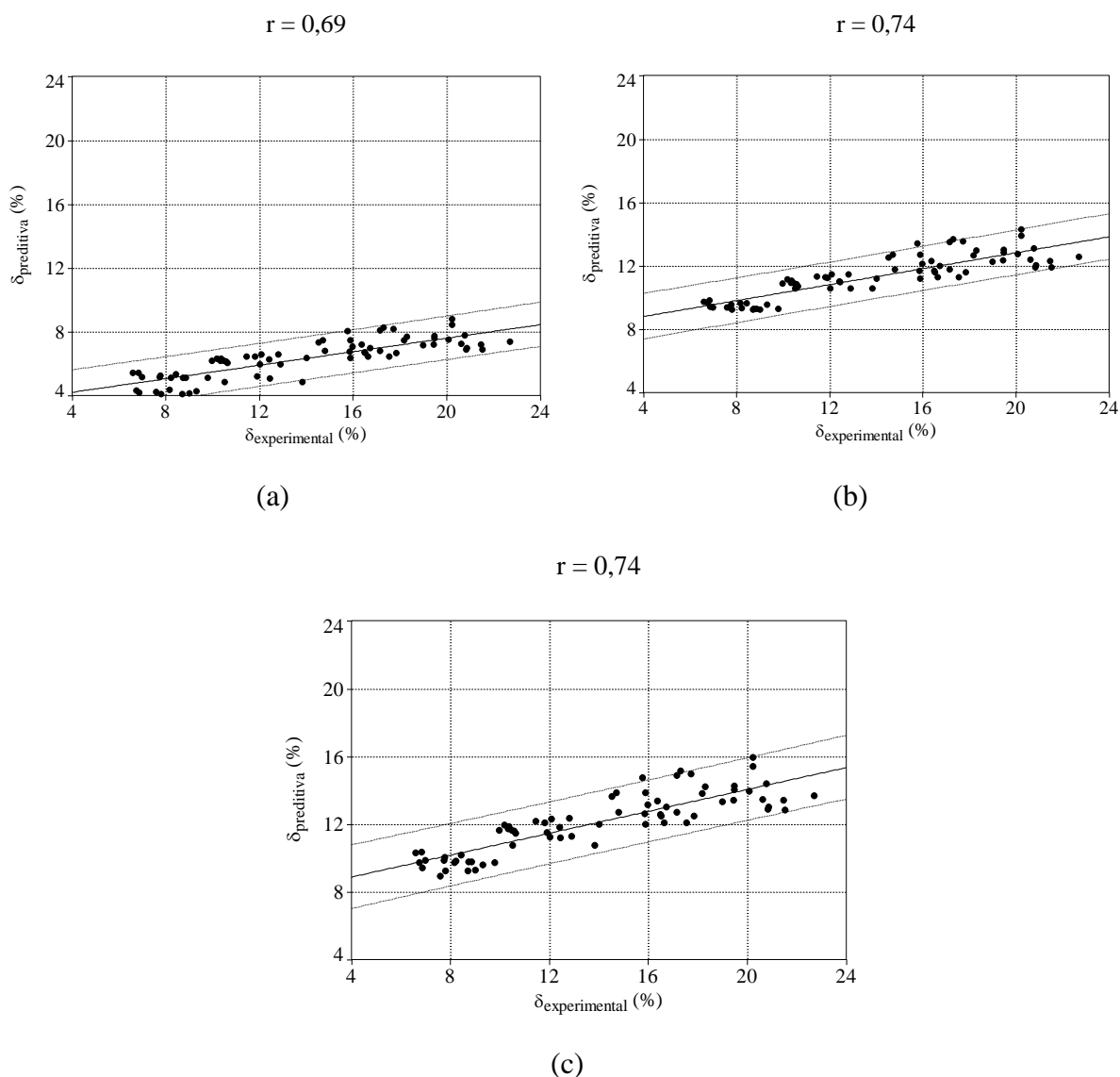
Em solo caracterizado como de textura média, a interação entre as diferentes massas da grade combinadas com diferentes níveis de velocidade de deslocamento quanto ao coeficiente de força tangencial medido em campo não se verificou nenhuma melhora nos ajuste dos modelos preditivos (Figura 52), com coeficientes de correlação de 0,76, 0,63, 0,76 e 0,77, para o modelo com valores experimentais, pela aplicação da teoria Cn, Bn e Mn, respectivamente. Sendo a teoria Cn aquela que mais se distancia dos valores medidos, principalmente por verificar a pouca variação do coeficiente quando se aumenta a massa da grade e a velocidade de deslocamento. Enquanto nos demais modelos esta variação foi mais expressiva, apresentando uma maior influência do aumento da velocidade. Os valores experimentais ainda foram mais elevados que os preditivos, com média de 0,44, enquanto os demais obtiveram média de 0,43. Também é possível observar na Figura 61 que o maior coeficiente de força tangencial é obtido sob máxima velocidade de deslocamento e massa da grade, resultando em valor próximo a 0,65, enquanto os demais modelos não atingiram a 0,55, compreendidos numa faixa de 0,3 a 0,52.

Em solo de textura média a interação entre a velocidade de deslocamento e a massa da grade é verificada, podendo-se questionar se tal diferença estaria relacionada com o estudo de diferentes massas da grade. A maior variação do coeficiente de força tangencial ocorre com diferentes velocidades, no entanto, essa variação também ocorre quando se combinam os diferentes níveis de velocidade com massa da grade diferente (Figura 54). Como no solo de textura argilosa não foi possível estudar esta interação, supõe-se que esta diferença também possa ter ocorrido pela adição de massas sobre a estrutura da grade.

Bem como a força de tração medida experimentalmente, o coeficiente de força tangencial apresentou valores inferiores àqueles estimados pelas teorias de predição em solo de textura argilosa (Figura 47 e Figura 48).

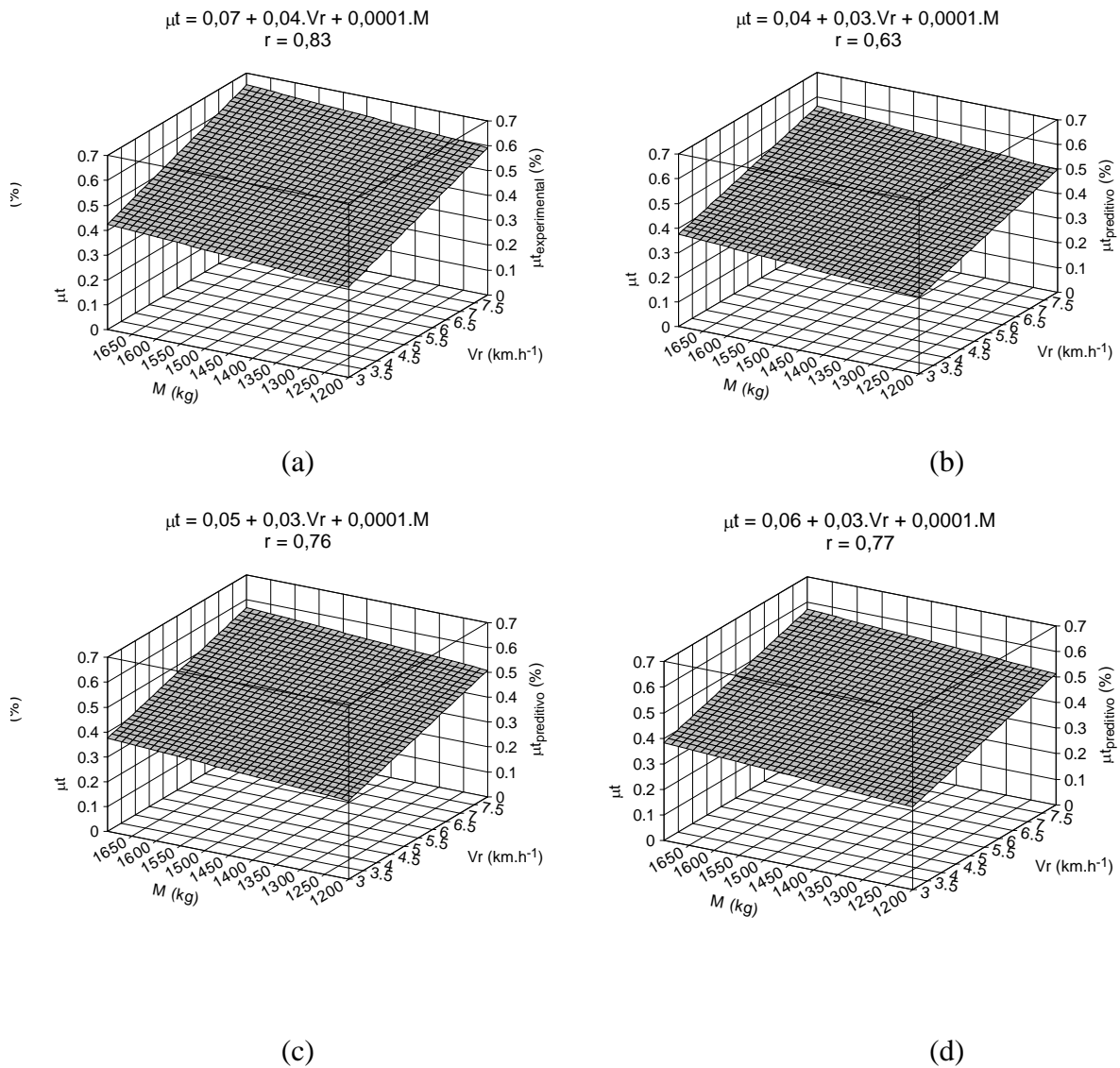


**Figura 45 - Patinagem das rodas motrizes do trator medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) (a) e preditivas ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) estimadas pelas teorias de previsão Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar uma grade aradora composta por 22 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $Vr$ ) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.**

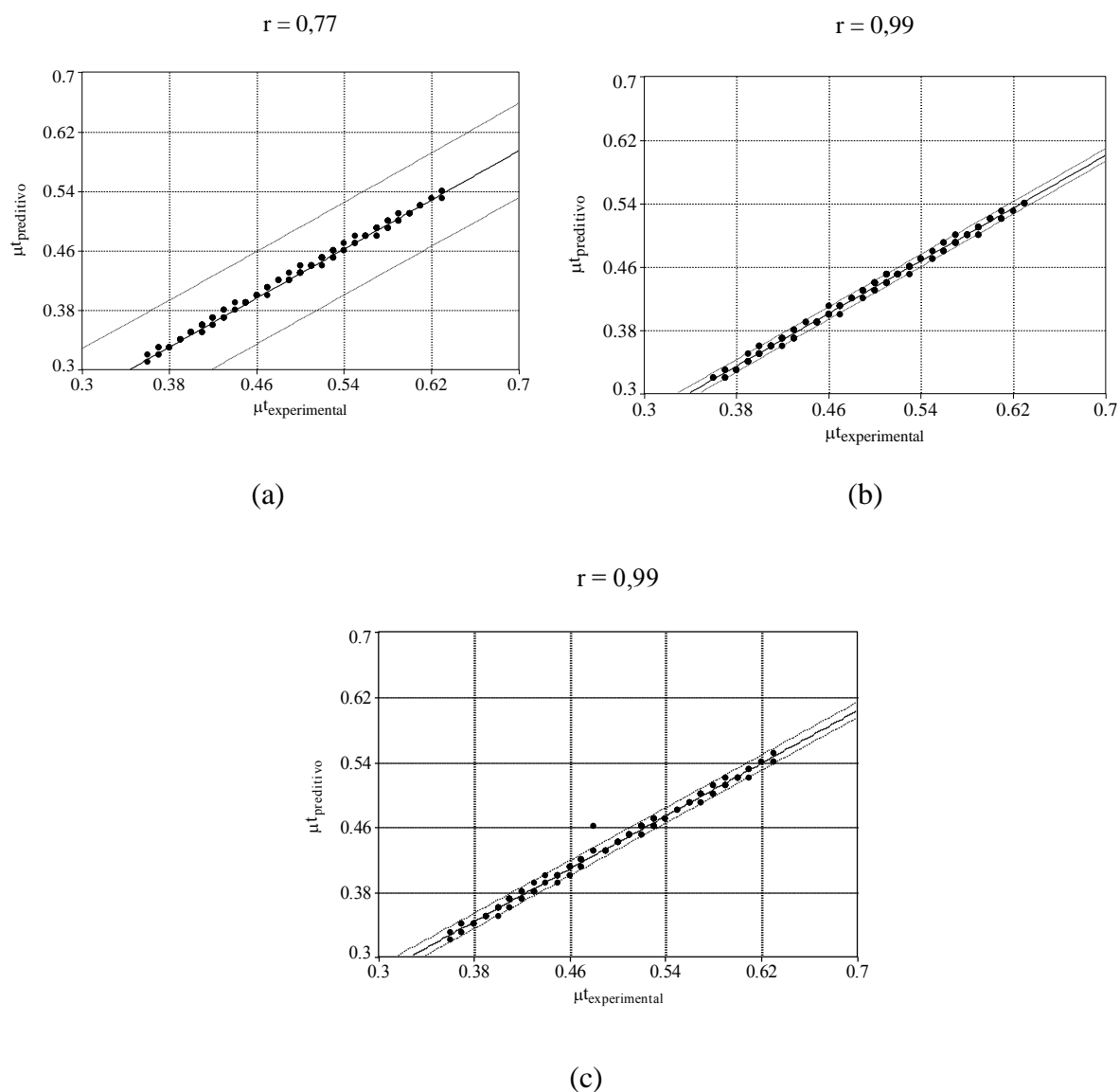


**Figura 46 - Diagrama de dispersão da patinagem medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) em função da predita através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\delta_{\text{predictiva}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradora composta por 22 discos, em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.**

O grau de correlação entre a teoria Mn e Bn com o modelo obtido experimentalmente são de ótima relação, próximos de 1,0 tanto para solo de textura média, quanto argilosa, embora a teoria Cn também possua boa correlação, porém com  $r = 0,77$  em solo de textura média (Figura 49 e Figura 50).

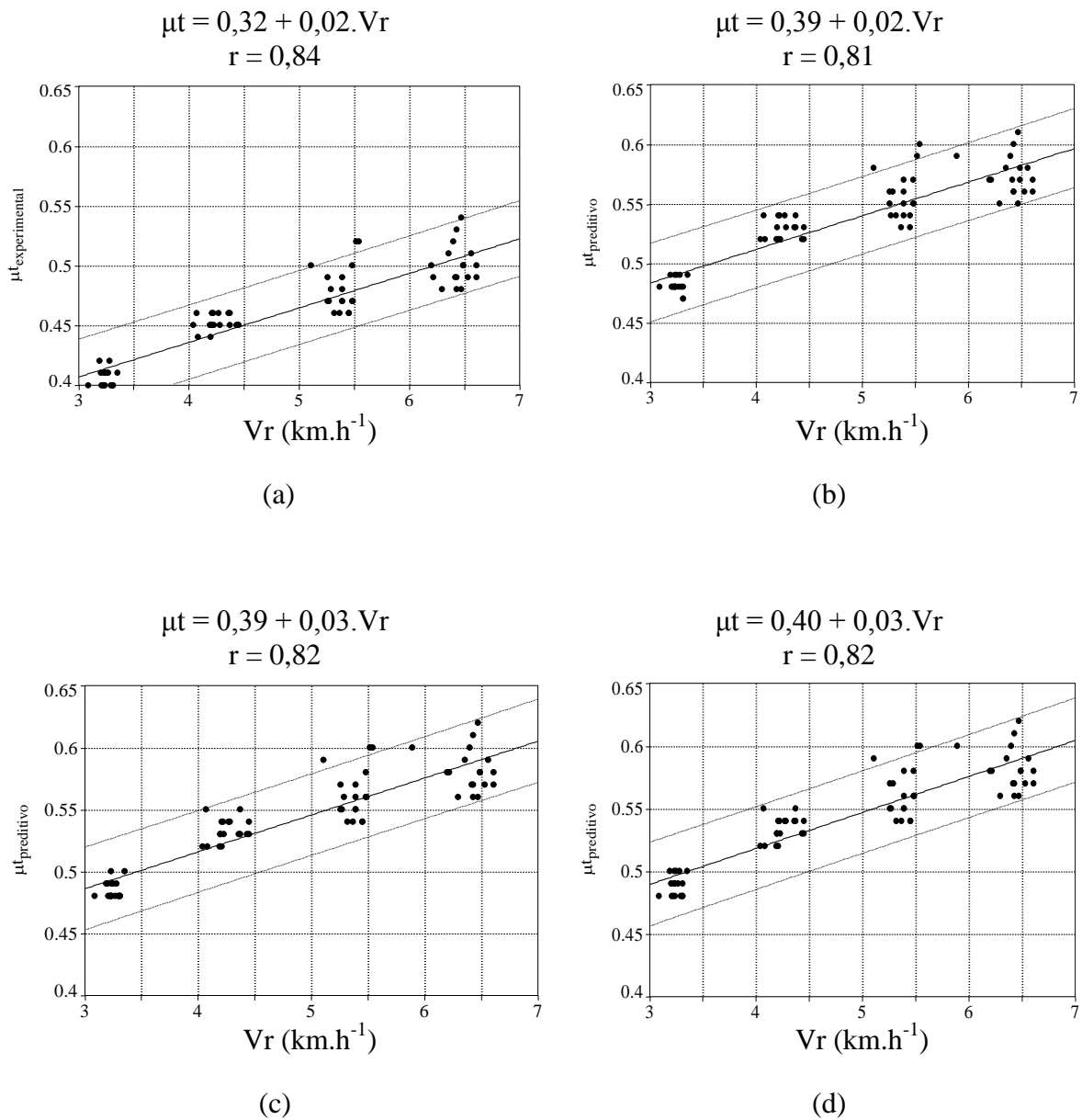


**Figura 47 - Diagrama tri-dimensional do coeficiente de força tangencial medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivos ( $\mu_{t_{\text{preditivo}}}$ ) estimados pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) de uma grade aradora composta por 18 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da massa da grade ( $M$ ) trabalhando em solo de textura média.**

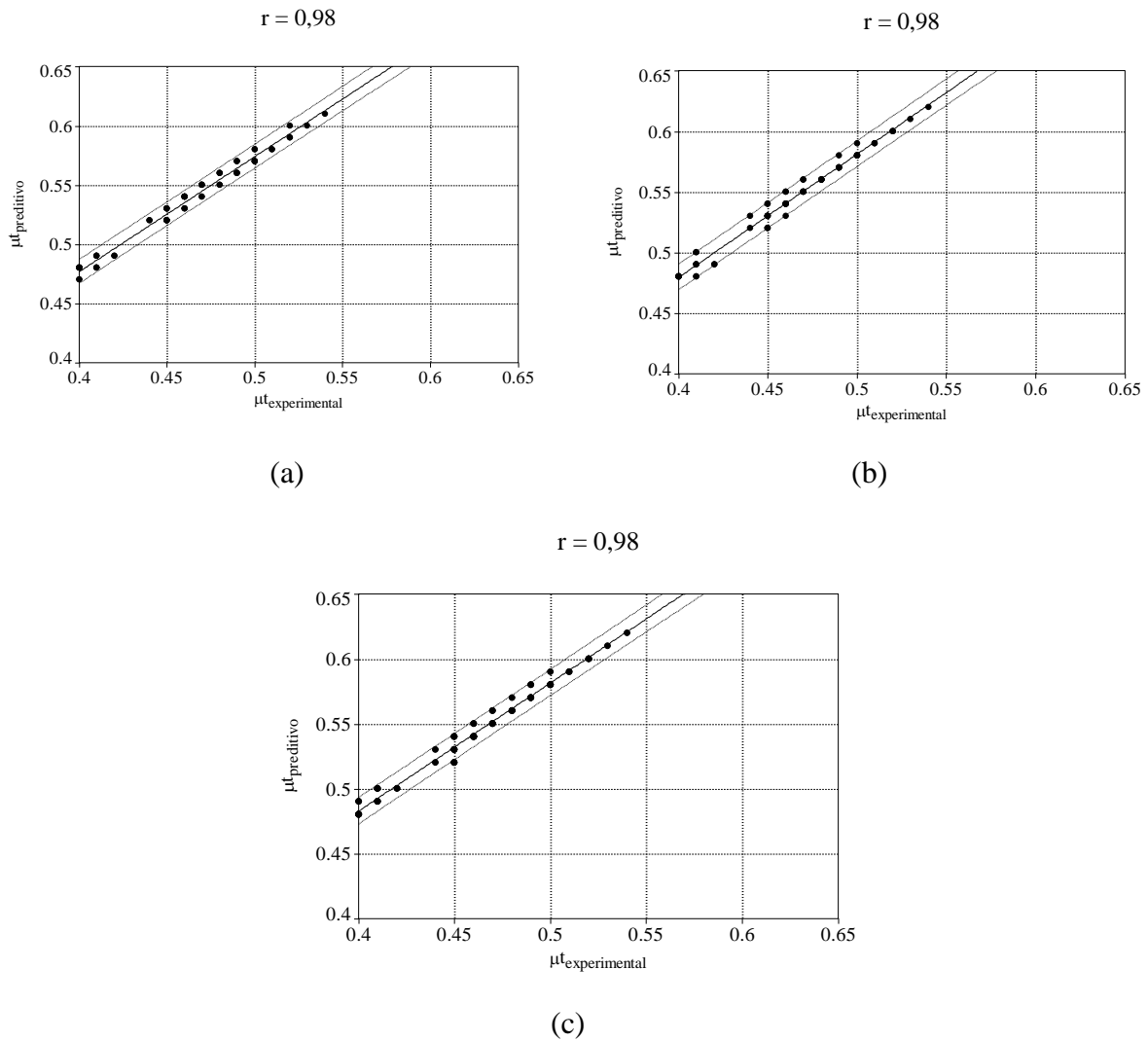


**Figura 48 - Diagrama de dispersão do coeficiente de força tangencial medido experimentalmente ( $\mu_{\text{experimental}}^t$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\mu_{\text{predictiva}}^t$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradora composta por 18 discos, em solo de textura média, com intervalo de confiança de 95%.**





**Figura 49 - Coeficiente de força tangencial do trator medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivos ( $\mu_{t_{\text{preditivo}}}$ ) estimados pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) de um trator ao tracionar uma grade aradora composta por 22 discos em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.**



**Figura 50 - Diagrama de dispersão do coeficiente de força tangencial medido ( $\mu_{\text{experimental}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e Mn (c) ( $\mu_{\text{preditiva}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-grade-aradora composta por 22 discos, em solo de textura argilosa, com intervalo de confiança de 95%.**

#### 4.3.3 Escarificador

As regressões obtidas para escarificador estão apresentadas no Apêndice 4 em formato de resumo da interação significativa entre a velocidade de deslocamento e a profundidade de

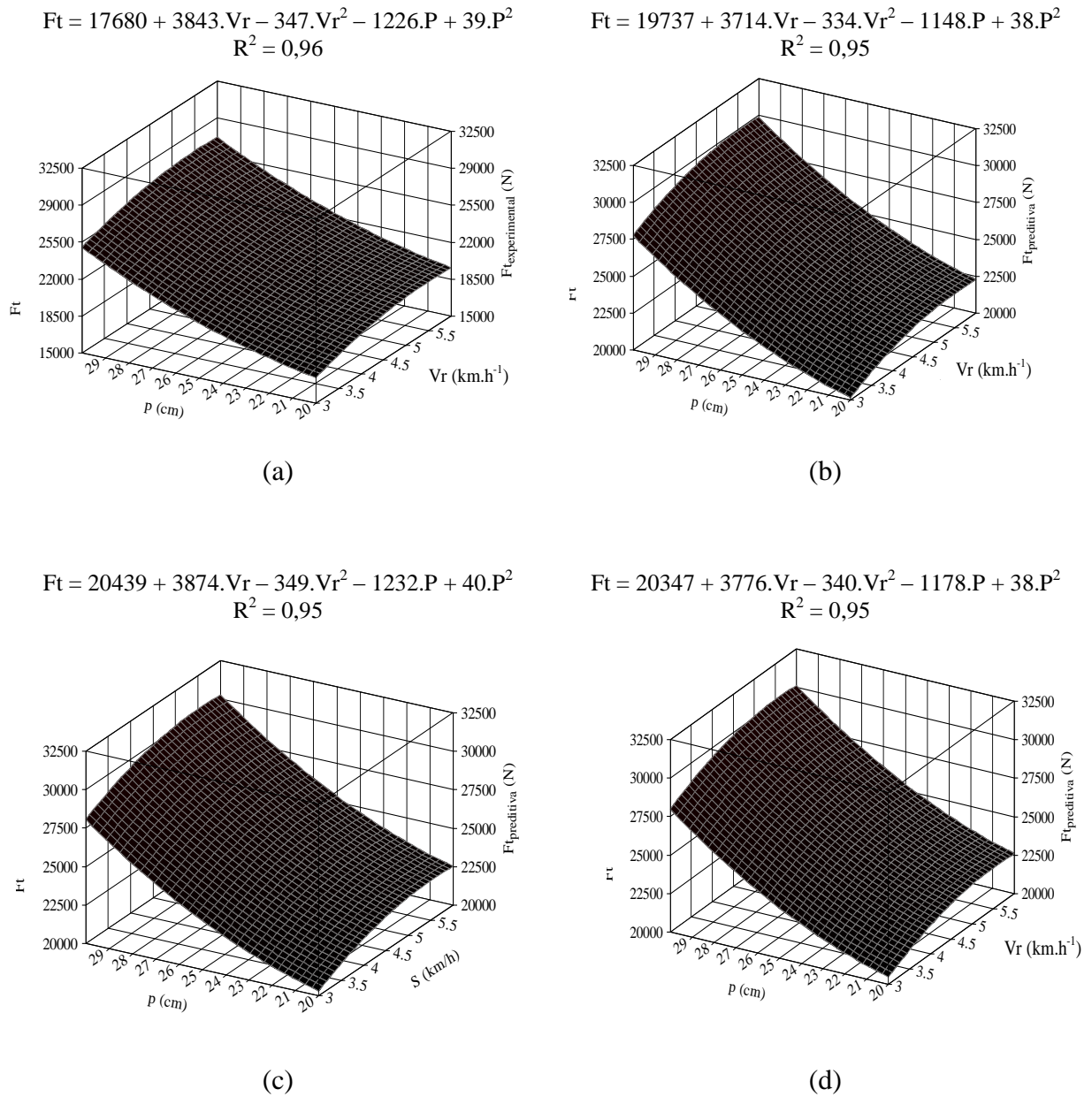
trabalho. As equações quadráticas foram de elevada eficiência no ajuste dos dados ao modelo com a maioria dos coeficientes de determinação de 0,95 (Tabela 12).

**Tabela 11 - Coeficientes de regressão para determinação da força de tração do conjunto trator-escarificador ao trabalhar em solo de textura argilosa e respectivos coeficientes de correlação para os parâmetros força de tração, patinagem e coeficiente de força tangencial.**

Variável	Modelo	Coeficientes de regressão		r	
		Símbolo	Valor		
Força de Tração	Medido experimentalmente	C <sub>0</sub>	17.680	0,96	
		C <sub>1</sub> (S)	3.843		
		C <sub>2</sub> (S <sup>2</sup> )	-347		
		C <sub>3</sub> (p)	-1.226		
		C <sub>4</sub> (p <sup>2</sup> )	39		
	Teoria Cn	C <sub>0</sub>	19.737	0,95	
		C <sub>1</sub> (S)	3.714		
		C <sub>2</sub> (S <sup>2</sup> )	-369,78		
		C <sub>3</sub> (p)	-1.148		
	Teoria Bn	C <sub>0</sub>	20.439	0,95	
		C <sub>1</sub> (S)	3.874		
		C <sub>2</sub> (S <sup>2</sup> )	-349		
		C <sub>3</sub> (p)	-123		
	Teoria Mn	C <sub>0</sub>	20.347	0,95	
		C <sub>1</sub> (S)	3.776		
		C <sub>2</sub> (S <sup>2</sup> )	-340		
C <sub>3</sub> (p)		-1.178			
Patinagem	Medido experimentalmente	C <sub>0</sub>	23,00	0,77	
		C <sub>1</sub> (S)	-1,53		
		C <sub>2</sub> (S <sup>2</sup> )	0,40		
		C <sub>3</sub> (p)	-0,90		
		C <sub>4</sub> (p <sup>2</sup> )	0,02		
	Teoria Cn	C <sub>0</sub>	-9,29	0,78	
		C <sub>1</sub> (S)	-0,24		
		C <sub>2</sub> (S <sup>2</sup> )	0,07		
	Teoria Bn	C <sub>0</sub>	35,30	0,93	
		C <sub>1</sub> (S)	5,9		
		C <sub>2</sub> (S <sup>2</sup> )	-0,52		
		C <sub>3</sub> (p)	-3,85		
			C <sub>4</sub> (p <sup>2</sup> )	0,10	

Modelo	Coeficientes de regressão		r
	Símbolo	Valor	
Teoria Mn	$C_0$	76,23	0,87
	$C_1 (S)$	10,56	
	$C_2 (S^2)$	-0,92	
	$C_3(p)$	-8,74	
	$C_4 (p^2)$	0,21	
Medido experimentalmente	$C_0$	0,35	0,95
	$C_1 (S)$	0,07	
	$C_2 (S^2)$	-0,0006	
	$C_3(p)$	-0,02	
	$C_4 (p^2)$	0,0007	
Teoria Cn	$C_0$	0,56	0,95
	$C_1 (S)$	0,09	
	$C_2 (S^2)$	-0,008	
	$C_3(p)$	-0,02	
	$C_4 (p^2)$	0,0009	
Teoria Bn	$C_0$	0,53	0,95
	$C_1 (S)$	0,007	
	$C_2 (S^2)$	-0,008	
	$C_3(p)$	-0,02	
	$C_4 (p^2)$	0,0008	
Teoria Mn	$C_0$	0,54	0,95
	$C_1 (S)$	0,08	
	$C_2 (S^2)$	-0,008	
	$C_3(p)$	-0,02	
	$C_4 (p^2)$	0,0008	

Mais uma vez, confirma-se a tendência em teorias de predição de superestimarem a força de tração. Sendo que a teoria Cn apresenta menor diferença de resultados que as demais comparada à força de tração média medida em campo (Tabela 12), de acordo com Souza (2001) que observou os resultados da predição pela teoria Cn apresentarem uma tendência em subestimar os valores de patinagem. Embora, a patinagem de Cn explique em menor grau a patinagem medida em campo, com menor coeficiente de correlação e tenha-se verificado que o uso das teorias Bn e Mn podem explicar pouco mais de 50% da patinagem ocorrida em campo (Figura 51). Possivelmente a utilização de coeficientes determinados em condições de trabalho Européias, onde foram levantados os dados para a elaboração destas teorias sejam os fatores que interferem na qualidade de seu uso para trabalhos realizados no Brasil.



**Figura 51 - Diagrama tri-dimensional da força de tração pedida ( $F_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivas ( $F_{t_{\text{preditiva}}}$ ) estimadas pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) de um conjunto trator-escarificador de cinco hastes em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho do escarificador ( $p$ ) em solo de textura argilosa.**

**Tabela 12 - Médias de força de tração requerida pelo escarificador, patinagem e análise de correlação (r) entre valores medidos experimentalmente e valores estimados pelas teorias de predição para solos de textura argilosa.**

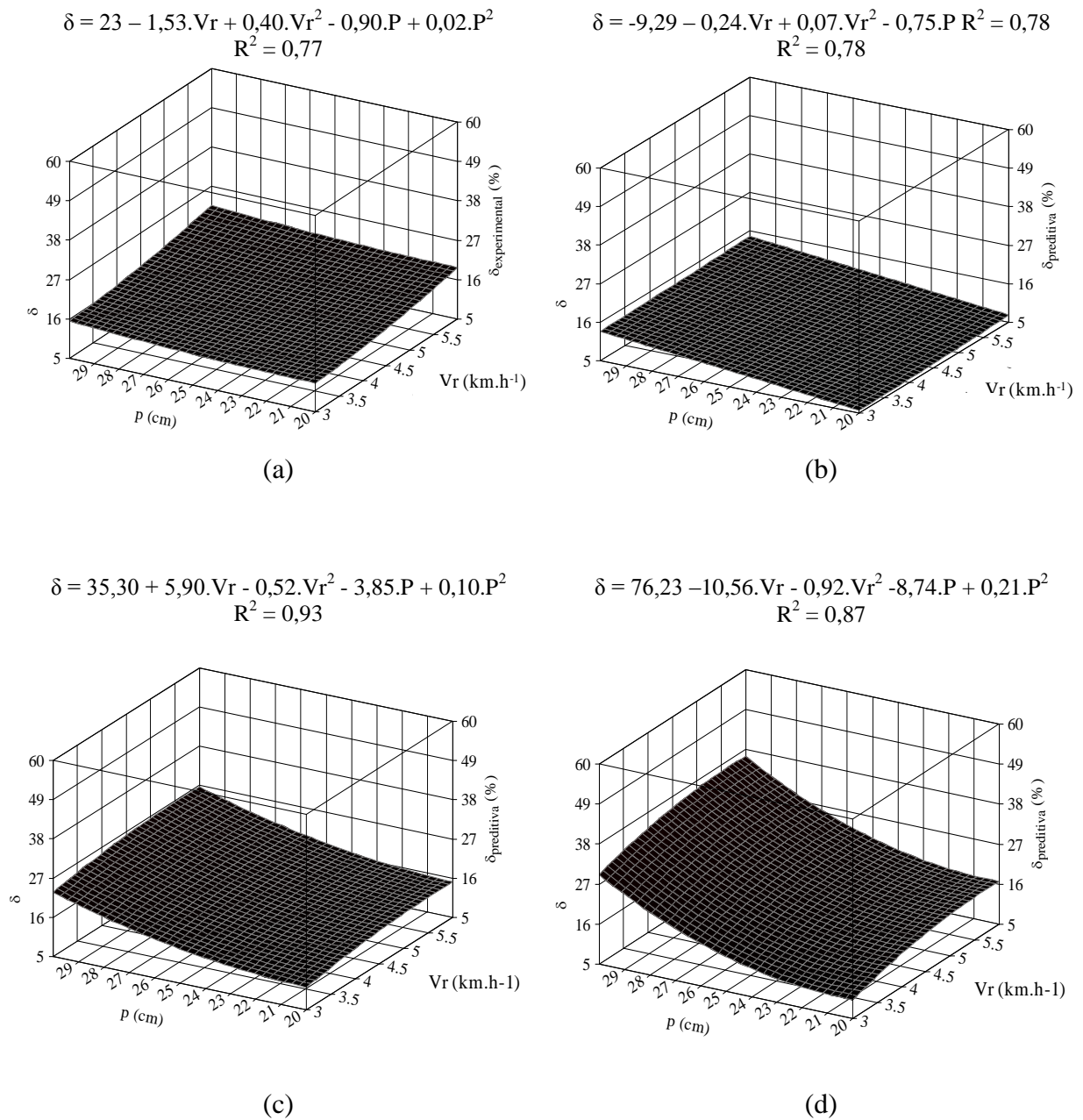
Modelos	Médias	r
Força de tração (N)		
Experimental	22.312,09	-
Teoria Cn	25.034,76	0,99
Teoria Bn	25.300,13	0,99
Teoria Mn	25.317,22	0,99
Patinagem (%)		
Experimental	17,81	-
Teoria Cn	9,53	0,11
Teoria Bn	19,38	0,55
Teoria Mn	22,61	0,53

O escarificador trabalhando sob solo de textura argilosa demonstrou comportamento quadrático da força de tração requerida em função da variação da velocidade de deslocamento e da profundidade de trabalho, tanto em campo, como para todas as teorias avaliadas, com coeficientes de determinação ótimos apresentados na Figura 51 através da representação tri-dimensional dos modelos de regressão utilizando os coeficientes apresentados na Tabela 12.

Ao aplicar o teste t verificou-se a aceitação da hipótese alternativa sob solo de textura argilosa, tal como para força de tração, também permitindo concluir que os valores medidos experimentalmente e os preditivos pelas teorias Cn, Bn e Mn diferem significativamente, com 5% de probabilidade de erro. Além da magnitude dos valores serem diferentemente significativos estatisticamente em nível de 5% de probabilidade de erro entre os valores medidos e estimados, o comportamento da patinagem não foi o mesmo, apesar de todos os modelos ajustados, tanto experimentais, quanto os preditivos para patinagem apresentarem modelos quadráticos, com coeficientes de determinação bons, sendo que a patinagem experimental varia em maior magnitude em função da velocidade de deslocamento no eixo X que os demais modelos estimados pelas teorias (Figura 52), pois apresentaram maior variação com o aumento da profundidade de trabalho no eixo Y.

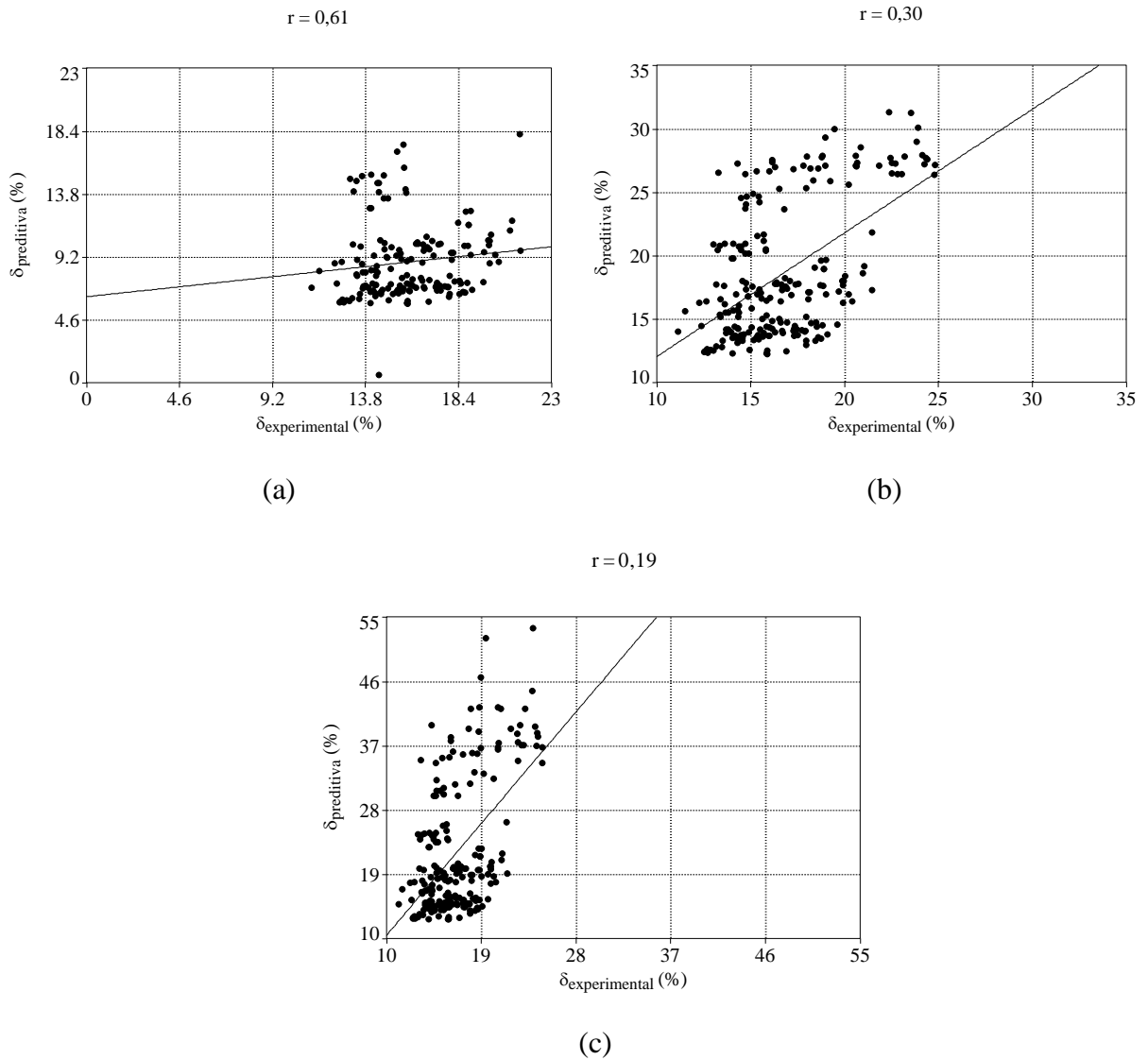
Na estimativa dos valores de patinagem verificam-se na Figura 52 que seus coeficientes de determinação foram maiores, ou seja, melhor ajuste dos modelos aos dados, pois estes valores são estimados através de simulações, que tem em suas deduções matemáticas coeficientes específicos para este ajuste, enquanto a patinagem medida experimentalmente apresentou o menor coeficiente de determinação, pois este parâmetro possui um comportamento de maior dispersão entre os dados, sofrendo a interferência de resistências ao deslocamento no campo, diferentemente de teorias preditivas.

Como verificado anteriormente, o coeficiente de força tangencial é muito similar para as condições de simulações e também experimental (Figura 55), pois o peso que gravita na roda e a carga na barra de tração são os mesmos para cada teoria de predição, variando apenas a resistência ao rolamento para cada condição.

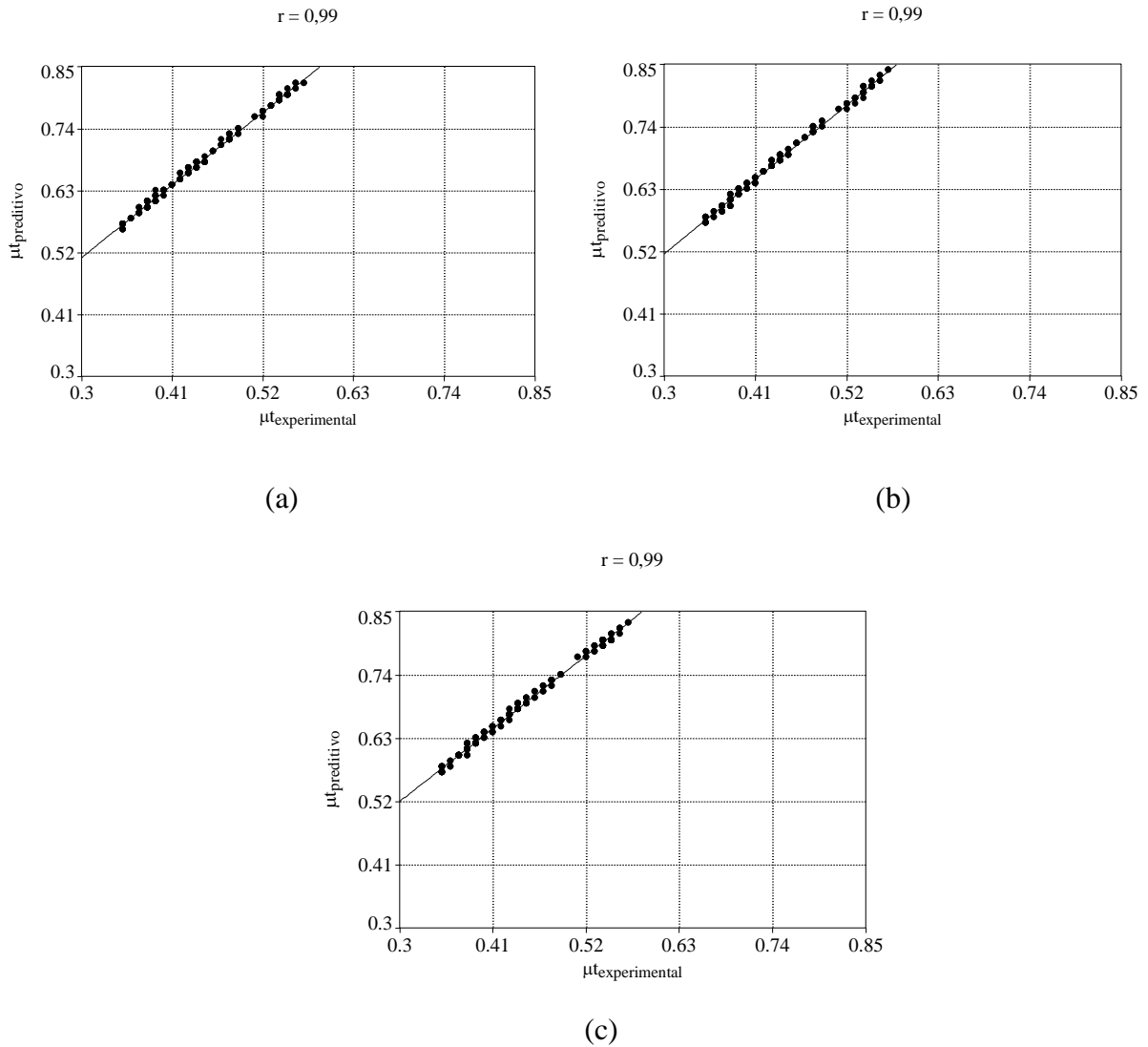


**Figura 52 - Diagrama tri-dimensional da patinagem de um trator medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) (a) e preditivas ( $\delta_{\text{preditiva}}$ ) estimadas pelas teorias de predicção Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar um escarificador de cinco hastes em função da velocidade de deslocamento (S) e da profundidade de trabalho (p) em solo de textura argilosa.**





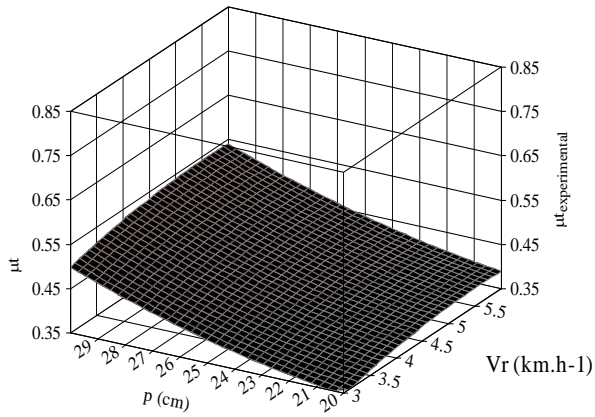
**Figura 53 - Diagrama de dispersão da patinagem medida ( $\delta_{\text{experimental}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de previsão Cn (a), Bn (b) e MN (c) ( $\delta_{\text{predictiva}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-escarificador com cinco hastes, em solo de textura argilosa.**



**Figura 54 - Diagrama de dispersão do coeficiente de força tangencial medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) em função do predito através da aplicação das teorias de predição Cn (a), Bn (b) e MN (c) ( $\mu_{t_{\text{preditiva}}}$ ) e reta de regressão linear estimada do conjunto trator-escarificador com cinco hastes, em solo de textura argilosa.**

$$\mu_t = 0,35 + 0,07.Vr - 0,02.Vr^2 - 0,02.p + 0,0007.p^2$$

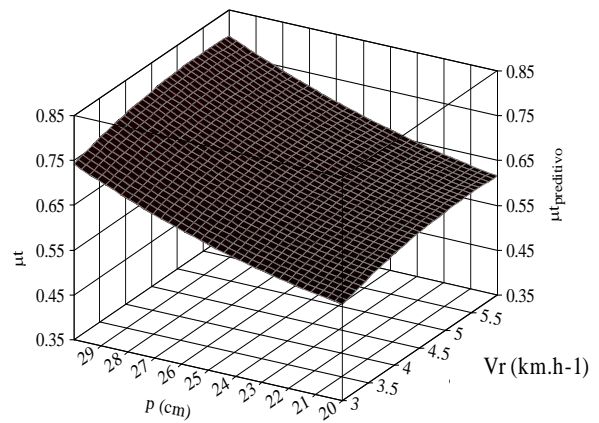
$$R^2 = 0,95$$



(a)

$$\mu_t = 0,56 + 0,09.Vr - 0,008.Vr^2 - 0,02.p + 0,0009.p^2$$

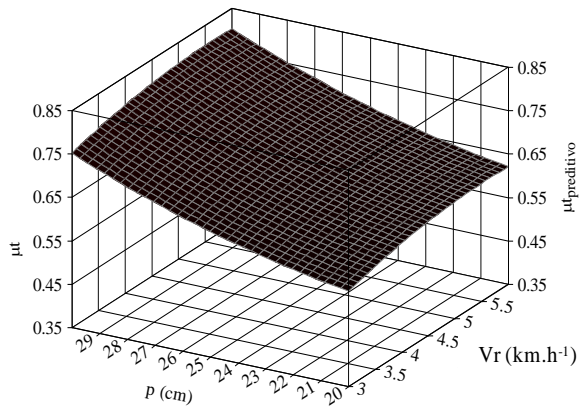
$$R^2 = 0,95$$



(b)

$$\mu_t = 0,53 + 0,007.Vr - 0,0006.Vr^2 - 0,02.p + 0,0008.p^2$$

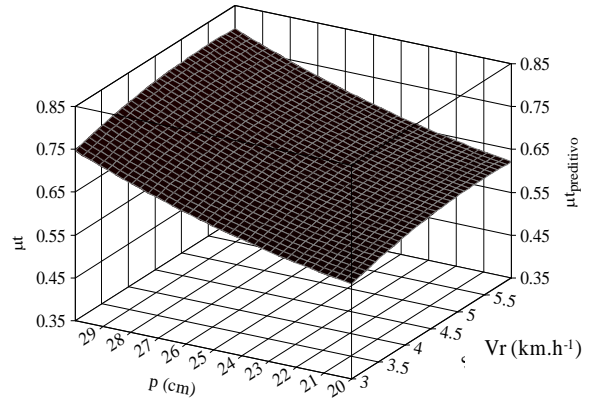
$$R^2 = 0,95$$



(c)

$$\mu_t = 0,54 + 0,08.Vr - 0,008.Vr^2 - 0,02.p + 0,0008.p^2$$

$$R^2 = 0,95$$



(d)

**Figura 55 - Diagrama tri-dimensional do coeficiente de força tangencial de um trator medido ( $\mu_{t_{\text{experimental}}}$ ) (a) e preditivos ( $\mu_{t_{\text{preditivo}}}$ ) estimados pelas teorias de predição Cn (b), Bn (c) e Mn (d) ao tracionar um escarificador de cinco hastes em função da velocidade de deslocamento do trator ( $V_r$ ) e da profundidade de trabalho do escarificador ( $p$ ) em solo de textura argilosa.**

#### 4.3.4 Considerações finais sobre a utilização de teorias preditivas

As variáveis força de tração e patinagem medidas e determinadas, respectivamente, são estatisticamente diferentes se comparadas às estimativas das teorias de predição Cn, Bn e Mn quanto aos seus valores, porém existe uma correlação alta entre elas, ou seja, a representação do modelo experimental possui o mesmo comportamento que o predito. No entanto, a determinação de modelos experimentais sob condições brasileiras permite uma predição mais aproximada dos valores reais.

A teoria de predição Cn apresentou a menor correlação com os valores medidos experimentalmente para as variáveis força de tração, patinagem e coeficiente de força tangencial, enquanto a teoria Mn obteve melhores resultados entre as teorias estudadas. Souza (2001) obteve resultados semelhantes ao trabalhar em solos consolidados.

Segundo Linares et al. (2006) os dados aplicados em modelos de predição da tração são referentes ao veículo, ao solo sobre o qual a operação é realizada, e sob esta condição a força de tração é desenvolvida. Para isso, foram calculados os índices característicos das rodas: Cn, Bn e Mn, citados no item 2.3.2, buscando compreender as diferenças verificadas entre as teorias preditivas de força de tração estudadas neste trabalho. Observa-se na Tabela 13 que dentre os índices calculados, os menores resultados foram obtidos pela teoria Mn. Como este índice é utilizado como denominador para o cálculo da resistência ao rolamento e posteriormente no coeficiente de tração líquida, resultando na predição do coeficiente de força tangencial podendo ser uma das razões pelas quais esta teoria obteve os maiores valores preditivos. Ocorrendo os menores valores preditivos para a teoria Cn que utiliza os valores característicos das rodas de maiores índices, ou seja, quanto maior o denominador utilizado (índice), menor a resistência ao rolamento e menor será a estimativa do coeficiente de força tangencial.

**Tabela 13 - Número característico da roda (Cn), número característico de mobilidade (Bn) e número de mobilidade (Mn) determinados em solos de textura média e argilosa.**

Textura do solo	Cn	Bn	Mn
Média	16,65	16,45	6,35
Argilosa	29,60	29,25	11,28

Os valores de força de tração e patinagem medidos experimentalmente são menores ao estimados pelas teorias de predição  $C_n$ ,  $B_n$  e  $M_n$ , sendo que os resultados das estimativas pelas teorias apresentam tendência a superestimar estes valores e conseqüentemente super dimensionar os conjuntos mecanizados ao utilizar-se das mesmas.

Sempre que os valores do coeficiente de força tangencial excederam o valor de 0,75, estando fora das faixas previstas pelas teorias, ocasionou perdas de algumas condições de comparação.

#### **4.4 Proposição dos parâmetros característicos das máquinas no modelo de determinação da força de tração requerida**

Os ensaios em campo realizados para obter valores reais de demanda de força de tração em campo tiveram como um dos objetivos específicos buscar o valor recomendado de coeficientes e conseqüentemente, a utilização de parâmetros característicos desta demanda para três tipos de implementos, sendo estes: semeadora, grade arodora e escarificador. A partir desses ensaios determinaram-se os modelos de estimativa da força de tração tropicalizados para as condições brasileiras, que foram utilizados para as predições a seguir.

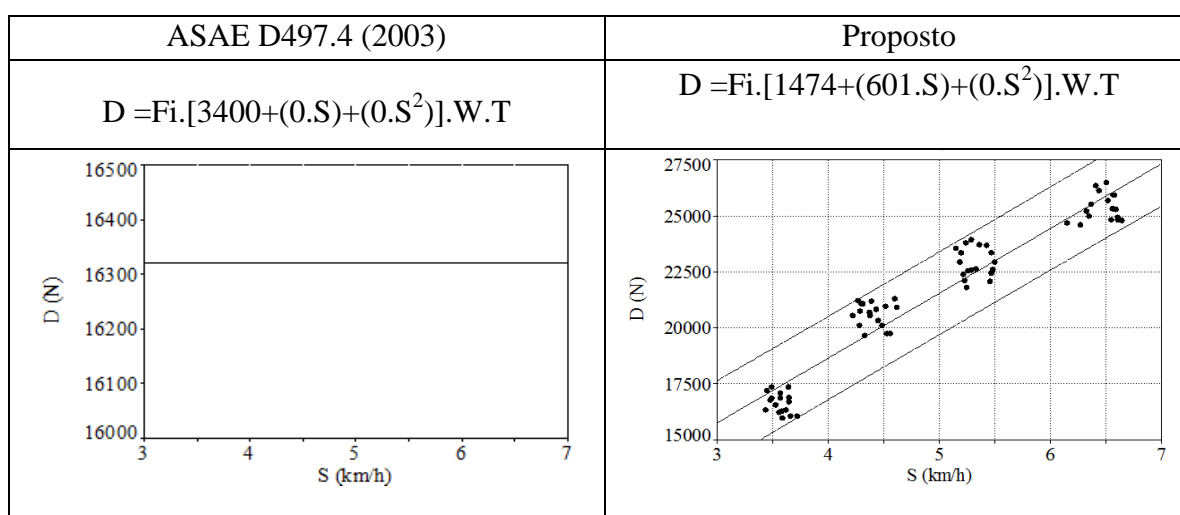
Para estimativa dos coeficientes utilizados na Equação 10, em solos característicos brasileiros, de textura argilosa e média, verificaram-se diferenças em seus valores e até mesmo na composição de parâmetros estimativos da força de tração requerida na barra de tração (D).

Para inserir o valor do parâmetro textural do solo ( $F_i$ ), foi utilizado valores indicados pela ASAE D497-2 (2003), valor igual a um (1,0) quando o experimento foi realizado em solo argiloso, tendo em vista ser esta a classificação de textura de maior densidade do solo e características físicas que o tornam de maior resistência a tração dos implementos. A semeadora não foi possível testá-la em condição de solo argiloso, assim, optou-se por utilizar o parâmetro  $F_i$  igual a 0,96, indicado pela ASAE em solos de textura média. Da mesma forma para o escarificador utilizou-se  $F_i$  igual a 1,0, recomendado par solos de textura argilosa.

Como rege a Equação 10, utilizou-se como largura de trabalho o número de linhas para semeadora, número de hastes para escarificadores e a largura em metros para a grade.

## 4.4.1 Semeadora-adubadora

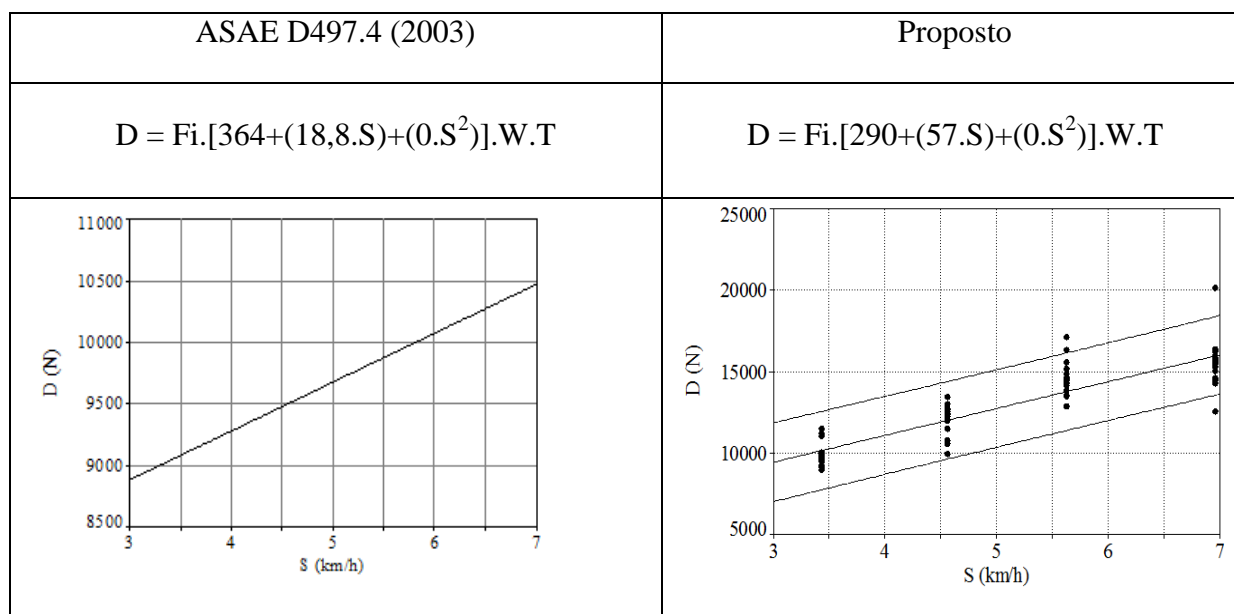
O Quadro 4 apresenta os resultados de coeficientes propostos por este trabalho como mais indicados para utilizar com finalidade de estimativa da força de tração requerida na barra por uma semeadora em solo de textura média. Este modelo sugere a adição de um novo parâmetro de velocidade com coeficiente B, anteriormente não citado pela ASAE D497.4(2003) indicando a importância da alteração da velocidade de deslocamento sobre a demanda de força de tração pelo implemento. Desta forma, é possível observar que a estimativa realizada pela Equação proposta pela ASAE D497-4 (2003) ao desconsiderar os parâmetros do modelo que envolvem a alteração da velocidade de deslocamento durante o trabalho, sendo assim, uma força de tração considerada constante.



**Quadro 4 - Faixa de 95% de confiança do modelo estimativo para força de tração requerida na barra (D) proposto em função da velocidade de deslocamento do trator (S) ao tracionar uma semeadora composta por cinco linhas, profundidade de trabalho superficial de um centímetro em solo de textura média e fator de textura proposto pela ASAE 497-2 (2003) com respectivo, modelo ajustado (D) e novos parâmetros do modelo (A, B) e o modelo apresentado pela ASAE D497.4 (2003).**

## 4.4.2 Grade aradora

A grade aradora apresenta apenas como alteração no modelo a sugestão de novos valores dos coeficientes para os parâmetros A e B, com alguns ajustes que indicam a tendência em valorizar o parâmetro velocidade de deslocamento, ou seja, maior que o citado pela norma, sendo a nova proposição de B igual a 57, enquanto a norma indica um valor de 18,8. O valor de A também é alterado, porém em menor magnitude, de 364 para 290 (Quadro 5).



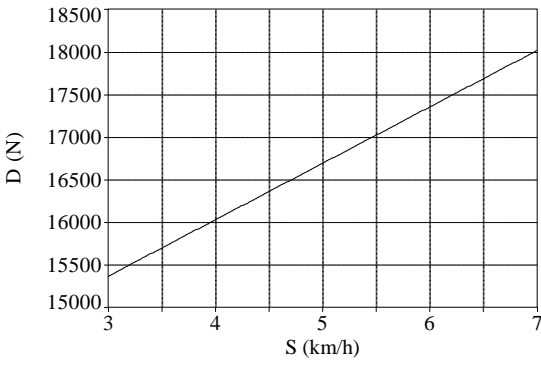
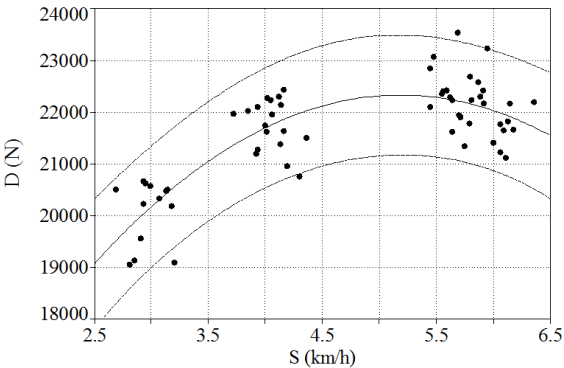
**Quadro 5 - Faixa de 95% de confiança do modelo estimativo para força de tração requerida na barra (D) proposto em função da velocidade de deslocamento do trator (S) ao tracionar uma grade aradora composta por 18 discos, profundidade de trabalho de 12 centímetros em solo de textura média e fator de textura proposto pela ASAE 497-2 (2003) com respectivo, modelo ajustado (D) e novos parâmetros do modelo (A, B) e o modelo apresentado pela ASAE D497.4 (2003).**

Observa-se que a estimativa da força de tração proposta pela ASAE D497.4 (2003) utilizando os coeficientes da proposição realiza uma subestimativa dos valores comparado aos observados experimentalmente.

## 4.4.3 Escarificador

Como nova proposta para a modelagem da força de tração requerida na barra de tração pelo escarificador, e sugerido a adição de um novo parâmetro de velocidade C, que passa a equação representativa do implemento de linear, ou seja, somente parâmetros A e B, para quadrática negativa em C (Quadro 6). Os valores dos coeficientes também são alterados, maiores que os indicados pela ASAE.

Assim como para os demais implementos a força de tração para escarificador é estimada pela ASAE D497-4 (2003) abaixo da verificada em campo.

ASAE D497.4 (2003)	Proposto
$D = Fi.[107+(5,3.S)+(0.S^2)].W.T$	$D = Fi.[139+(30.S)+(-2,7.S^2)].W.T$
	

**Quadro 6 - Faixa de 95% de confiança do modelo estimativo para força de tração requerida na barra (D) proposto em função da velocidade de deslocamento do trator (S) ao tracionar um escarificador composto por cinco hastes, profundidade de trabalho de 25 centímetros em solo de textura argilosa e fator de textura proposto pela ASAE 497-2 (2003), com respectivo modelo ajustado (D) e novos parâmetros do modelo (A, B) e o modelo apresentado pela ASAE D497.4 (2003).**



#### 4.4.4 Análise das proposições

Os dados coletados experimentalmente quando submetidos aos modelos acima apresentados nos gráficos tiveram boa representação pelos modelos selecionados, com coeficientes de determinação acima de 75%. Além de utilizar uma faixa de segurança de 95% de ajuste dos valores ao modelo. Neste caso, pode-se considerar confiável a estimativa dos parâmetros estimados, sendo os mesmos representados com coeficientes próprios para solos típicos brasileiros, visto a diferença encontrada entre os parâmetros recomendados neste trabalho e os citados pela ASAE D497.4 (2003).

Como proposta deste trabalho, recomenda-se a adição de novos parâmetros para os implementos: escarificador e semeadora. Sendo que os escarificadores necessitam da adição de um novo parâmetro de velocidade quadrático (C) para estimativa da força de tração requerida na barra de tração, enquanto a semeadora apresentou melhor ajuste ao adicionar o parâmetro de velocidade de deslocamento (B) sob equação linear, diferindo dos parâmetros para máquinas recomendados pela ASAE D497-2 (2003).

Para a grade aradora não foi observada alteração quanto aos parâmetros utilizados pelo modelo de estimativa da força de tração, embora os coeficientes dos parâmetros também tenham sido diferentes aos citados pela ASAE.

A Tabela 14 apresenta os parâmetros propostos pela ASAE D497.4 (2003) e a proposição dos parâmetros para implementos brasileiros para melhor visualizar as diferenças encontradas entre as duas propostas.

**Tabela 14 - Proposta de parâmetros de força de tração para implementos e extraídos e adaptados da ASAE D497.4 – Agricultural Machinery Management Data – Fevereiro de 2003.**

Implementos	Larg./Unid.	Parâmetros da máquina			Parâmetros do solo	
		A	B	C	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
Proposição						
Semeadora	linhas	1434	601	0,0	-	0,96
Grade de discos Offset						
- Preparo primário	metros	290	57,0	0,0	1,0	0,89
Escarificador	hastes	110	32	-2,9	1,0	-
ASAE D497.4						
Semeadora	linhas	1820	0,0	0,0	1,0	0,96
Grade de discos Offset						
- Preparo primário	metros	364	18,8	0,0	1,0	0,88
Escarificador	hastes	107	6,3	0,0	1,0	0,85

Após a determinação dos novos parâmetros do modelo é possível a realização do dimensionamento do trator. Este dimensionamento é apresentado no Quadro 7.

A proposta representou um dimensionamento do trator para semeadora-adubadora com potência bruta inferior ao dimensionamento com parâmetros da ASAE D497.4(2003). Enquanto a grade-aradora e o escarificador solicitam nesta proposta de maior potência bruta do motor do trator. Estes resultados permitem a confirmação da hipótese de que a determinação de novos modelos obtidos em condições de solo brasileiro e máquinas projetadas para as condições de trabalho utilizadas aumentam a precisão de predições da demanda de força de tração e, conseqüentemente, do dimensionamento do trator.

Máquina/Implemento	Vr (km.h <sup>-1</sup> )	D (N)	Pr (kW)	NI (kW)	Nm (kW)
textura média					
Semeadora-adubadora de 5 linhas	4	18408	20	31	37
	5	21293	30	45	53
	6	24178	40	62	72
	7	27062	53	81	94
Grade-aradora de 18 discos	4	10940	12	19	22
	5	12144	17	26	30
	6	13348	22	34	40
	7	14552	28	44	51
Escarificador de 5 hastes	4	21076	23	36	42
	5	21725	30	46	54
	6	21736	36	56	65
	7	21109	41	63	73
textura argilosa					
Semeadora-adubadora de 5 linhas	4	19175	21	33	38
	5	22180	31	47	55
	6	25185	42	65	75
	7	28190	55	84	98
Grade-aradora de 18 discos	4	12432	14	21	25
	5	13800	19	29	34
	6	15168	25	39	45
	7	16536	32	49	58
Escarificador de 5 hastes	4	23950	27	41	48
	5	24688	34	53	61
	6	24700	41	63	74
	7	23988	47	72	83

**Quadro 7 - Dimensionamento do trator para a tração de uma semeadora-adubadora, grade-aradora e escarificador em solos com textura média e argilosa.**

## 5 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu concluir que a determinação de novos modelos obtidos em condições de solo e com máquinas projetadas para utilização no Brasil aumenta a precisão da estimativa da força de tração visando o dimensionamento do trator. Sendo possível tecer as seguintes conclusões:

i. As teorias de predição propostas por Wismer e Luth (Cn), Brixius e Wismer (Bn) e Gee- Clough (Mn) e (Mn) apresentaram-se diferentes estatisticamente na determinação dos parâmetros força de tração, patinagem e coeficiente de força tangencial, quando comparadas aos valores experimentais, demonstrando tendências a superestimação dos mesmos.

ii. Dentre os parâmetros estudados verificou-se ser relevante quanto a sua utilização em equações de predição para desempenho de tração a velocidade de deslocamento para a semeadora-adubadora, grade-aradora e escarificador, além da utilização da massa da grade aradora, e ainda, da profundidade de trabalho para escarificadores.

iii. Sendo os modelos para semeadora, grade aradora e escarificador:  $D = Fi.[1474 + (601.S)].W.T$ ;  $D = Fi.[290 + (57.S)].W.T$  e  $D = Fi.[110 + (32.S) + (-2,9.S^2)].W.T$ , respectivamente.

iv. As relações entre velocidade de deslocamento e a força de tração requerida pelos implementos semeadora, grade-aradora são lineares e para o escarificador esta relação é quadrática.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGEDES, M.O.O., MOTA, F.S. **Dias climaticamente aptos para trabalhos com máquinas agrícolas em planossolo bem drenado artificialmente.** Pelotas, 1986. 14p.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE D230.4:** Agricultural machinery management data. ASAE Standards, 1988. p.91-97.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE S209.5:** Agricultural tractor test code. In: ASAE standards 1989: standards engineering practices data. St. Joseph: ASAE, 1989, p. 44-48.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE Standards 296.3:** Uniform terminology of agricultural tractors, self-propelled implements, and other traction and transport device. USA, 1995. p.119-121.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE D497.2:** agricultural machinery management data. 42<sup>th</sup> ed. St. Joseph: ASAE, 1995. p.335-341.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE, S296.4 DEC95:** 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, 1999. p.119-121.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE EP 496.2 DEC99:** Agricultural Machinery Management. In: ASAE Standards: standards engineering practices data. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1999. p.353-358.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE D497.4:** agricultural machinery management data. 47<sup>th</sup> ed. St. Joseph, Mich: ASAE, 1999. p. 350-357.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Standards EP496.2DEC99.** St. Joseph, Michigan, 2000. p.344-349.
- ARAÚJO, A.G.; CASÃO JÚNIOR, R.; SIQUEIRA, R. **Mecanização do plantio direto:** problemas e soluções. Londrina: IAPAR, 2001. 18 p. (Informe da Pesquisa, 137).
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. **Soil physics.** 4.ed. New York, John Wiley, 1960. 229p.
- BEKKER, M.G. **Theory of land locomotion,** University of Michigan Press, Ann Arbor, 1956. 356p.
- BELTRAME, L. F. S.; TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, v.33, p. 59-62, 1980.
- BIANCHINI, A.; MANTOVANI, E.; MARTIN, P.J. Avaliação de desempenho de um escarificador em solo aluvial. **Agricultura Tropical**, Cuiabá. v.2, n. 1, p. 61-70. 1996.

BIANCHINI, A.; SABINO, M. H.; BORGES, P. H.; SGUAREZZI, J. J. Comportamento operacional de um escarificador de hastes parabólicas em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.395-401, 1999.

BOWERS, C.G.J. Southeastern tillage energy data and recommended reporting. **Transactions of the ASAE**, v.28, p.731-737, 1985.

BRIXIUS, W.W., WISMER, R.D. Traction Prediction Equations for Wheeled vehicles. **John Deere Report No. 109**. Project 9008. Technical Center, Deere&Company, Moline, Illinois, 1975.

BRIXIUS, W. W.; ZOZ, M.F. Tractor-implement performance Soviet – Deere Project. **Documento n. 303**. Deere & Company. Moline, Illinois, October, 1975. p. 8.

CASTRO, O. M. **Preparo do solo para a cultura do milho**. Campinas: Fundação Cargill, 1989. 41 p.

CATALÁN, M. H. **Análisis del comportamiento en tracción de tractores agrícolas de simple y doble tracción. Comparación entre resultados experimentales y teorías de predicción**. 1993. 143f. Tese (Doutorado em energia, máquinas e irrigação) – Universidade Politécnica de Madrid. Madrid, Espanha, 1993.

CERVANTES, V. M. **Estudio experimental del sistema suelo-vehículo aplicado a la predicción de tracción de los tractores agrícolas**. 1993. 143f. Tomo I, 275f. Tomo II. (Tese de Doutorado) - E.T.S.I Agrónomos de Madrid, Madrid, Espanha, 1993.

CHANG, C.S.; PORTELLA, J.A.; KUMAGAI, I. Exigência da força nos sistemas que utilizam tração para o plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 13., 1983, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1983. p.130.

CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; CEPIK, C.T.C.; DEBIASI, H. Demanda de tração em haste sulcadora na integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo e sua relação com o estado de compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.220-228, 2007.

COSTA, F. de S. ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Campinas, v.27, p.527-535, 2003.

DALLMEYER, A. U. **Eficiência energética e operacional de equipamentos conjugados de preparo do solo**. 1994. 157f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1994.

DALLMEYER, A.U.; SALVADOR, N.; LAGE, G.; FERRAUDO, A.S.; GAMERO, C.A. Avaliação da rugosidade do solo, sob doze tipos de preparo em Latossolo Roxo Álico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 18., 1989. Recife, **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 1989. v.1, p.268-82.

DERPSCH, R. **Controle da erosão no Paraná, Brasil**: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: GTZ, 1991. 272 p.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation. I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, v.55, p.46-50, 1998.

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

FAGANELLO, A. **Avaliação de sulcadores para semeadura**. 1989. 89 f. (Mestrado em Mecanização Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1989.

FAO. **Energy consumption and input output relation in field operations**. Rome, 1990.

FERNANDES, H. C.; SILVEIRA, J. C. M. da; RINALDI, P. C. N. Avaliação do custo energético de diferentes operações agrícolas mecanizadas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.32, n.5, p.1582-1587, set./out., 2008.

FORSYTHE, W. **Física de Suelos**. Manual de Laboratório. San José, Costa Rica: IICA, 1975. 212p.

FURLANI, C.E.A.; LOPES, A.; SILVA, R.P. da, REIS, G.N. dos. Exigências de uma semeadora-adubadora de precisão variando a velocidade e a condição da superfície do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.4, p.920-923, jul-ago, 2005.

GABRIEL FILHO, A.; LANÇAS, K. P.; GUERRA, S. P.; PAULA, C. A.; MONTEIRO, L. A. Umeb - unidade móvel para ensaio da barra de tração. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.4, p.782-789, out./dez. 2008.

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

GASSEN, N. D.; GASSEN, F. R. **Plantio direto**: o caminho do futuro. Passo Fundo: Aldeia Sul, 1996. 207 p.

GEE-CLOUGH. Selection of tyres sizes for agricultural vehicles, **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.25, n.3, p.261-278, 1984.

GILL, W.R. Soil-implement relations. In: ASAE WINTER MEETING, 1967, Detroit. **Proceedings ...**, Detroit: ASAE, 1967. p.43-46.

GRISSO R D ; YASIN M ; KOCHER M F. Tillage implement forces operating in silty clay loam . **ASAE Paper N° 94 1532** , ASAE , St . Joseph , Michigan , USA , p.17, 1994.

GULLACHER, D. E.; COATES, W. E. Effects of cultivator sweep pitch an tillage forces. **ASAE Paper N. 80-1567**. St. Joseph, MI:ASAE. 1980.

HUNT, D. **Farm Power and Machinery Management**. Iowa State Press, Iowa. 1995.

HARRIGAN, T. M. E ROTZ, C. A. Draft of Major Tillage and Seeding Equipment. Agricultural Engineering Department, **Paper N° 94-1533 Meeting ASAE**, Atlanta, December, p.13-16, 1994.

IBAÑEZ, M.; ROJAS, E. **Costos de operación y producción por concepto de maquinaria agrícola**. Concepción: Universidad Concepción, 1994. 58 p.

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

LINARES, P. **Teoria de la tracción de tractores agrícolas**. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 1996. 157 p.

LINARES, P. et al. **Teoría de la Tracción en los tractores agrícolas**. Madrid: Universidade Politécnica de Madrid. 2006, 157p.

LOPES, A.; FURLANI, C.E.A.; SILVA, R.P. Desenvolvimento de um protótipo para medição do consumo de combustível em tratores. **Revista Brasileira de Agroinformática**, Lavras, v.5, n.1, p.24- 31, 2003.

KEPNER, R. A.; BAINER, R.; BARGER, E. L. **Principles of farm machinery**. 3. ed. Westport: Avi, 1977. 527 p.

KHEIRALLA, A. F. et al. Modelling of power and energy requirements for tillage implements operating in Serdang sandy clay loam, Malaysia. **Soil and Tillage Research**, v. 78, n. 01, p. 21–34, 2004.

KISS, G.C.; BELLOW, D. An analysis of forces an cultivator sweeps and spikes. **Canadian Agricultural Engineering**, Saskatoon, v. 23, n. 2, p. 77-83, 1981.

MACHADO, A. L. T. **Avaliação dos modelos de previsão do esforço de tração para ferramentas estreitas em três tipos de solo do Rio Grande do Sul**. 2000. 56f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Porto Alegre, Porto Alegre, 2000.

MACMILLAN, R.H. **The Mechanics of Tractor - Implement Performance: Theory and Worked Examples**. Melbourne, 2002. 165 p.

MAHL, D. **Desempenho de semeadora-adubadora de milho (Zea mays L.) em sistema de plantio direto**. 2002. 160 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

MAHL, D.; GAMERO, C.A.; BENEZ, S.H.; SILVA, A.R.B.; SILVA, P.A.; GERMINO, R. Demanda energética de semeadora-adubadora em função da velocidade de semeadura e condição de solo. **Revista Energia na Agricultura**. Botucatu, vol. 22, n.3, p.15-36, 2007.

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

MIALHE, L.G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Ceres, 1974. 301 p.

MIALHE, L.G. **Máquinas motoras na agricultura**. v.2. São Paulo: EDUSP/USP, 1980. 367 p.

MIALHE, L.G. **Máquinas Agrícolas - Ensaio & Certificação**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários "Luiz de Queiroz", 1996. 723 p.

MICHEL JÚNIOR, A. J.; FORNSTRON, K. J.; BORRELLI, J. Energy requirements of two tillage systems for irrigated sugarbeets, dry beans and corn. **Transaction of ASAE**, v. 28, n. 06, p. 1731-1735, 1985.

MION, R. L. **Desenvolvimento de equipamento para ensaio a campo de ferramentas de rompimento do solo testado com mecanismos de abertura de sulcos de semeadoras**. 2002. 96 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

MODOLO, A. J.; GABRIEL FILHO, A.<sup>1</sup>; SILVA, S. L. ; GNOATTO, E. Força de tração necessária em função do número de linhas de semeadura utilizadas por uma semeadora-adubadora de precisão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, mai-ago, 2005.

OLIVEIRA, M.F.B.; SIQUEIRA, R.; RALISCH, R.; ARAÚJO, A.G.; CASÃO JÚNIOR, R. Mobilização do solo por hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras de plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000. 1 CD-ROM.

OLIVEIRA, C.O. de; M, S. de. D.J.; RESCK, D.V.S.;CURI, N.: Alterações estruturais e comportamento compressivo de um latossolo vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v.38, n2, p.291-299, 2003.

ORTIZ-CAÑAVATE, J.; HERNANZ, J.L. **Tecnica de La mecanización agraria**. 3. ed. Madrid: Ediciones Mundi Prensa, 1989. 641 p.

PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidade vegetal**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1987. 33p. (Boletim Técnico, 114).

REID, J. T. A comparison of the energy of some tillage tools. **Paper N° 78-1039 ASAE Meeting**, St. Joseph, Mich. 1978.

REID, J. T.; CARTER, L. M. E CLARK, R. L. Draft measurements with a three-point dynamometer. **Paper N° 83-1036 ASAE Meeting**, St. Joseph, Mich. 1983.

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.



SALVADOR N.; BENEZ, S. H.; MION, R. L.; VILIOTTI, C. A. Demanda energética em diferentes sistemas de preparo periódico do solo antes e depois da subsolagem. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 3, p. 378-383, jul-set, 2008.

SALVADOR, N.; MION, R. L.; BENEZ, S. H. Requerimento energético e desagregação do solo em diferentes sistemas de preparo periódico num Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 06, n. 04, p. 226-234, 1998.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V. **Dinámica y mecánica de suelos**. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1996. 426 p.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V.; RAMÍREZ, J.J.; LITAGO, J.J.; HERNANZ, J.L. Effect of soil compaction and water content on the resulting forces acting on three seed drill furrow openers. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.81, n.1, p.25-37, 2005.

SCHLOSSER, J.F. **Influencia del avance cinemático de las ruedas delanteras motoras en la eficiencia en tracción de los tractores agrícolas**. 1996. 286f. Tese ( Doutorado em energia, máquinas e irrigação ) – Universidade Politecnica de Madrid. Madrid, Espanha. 1996.

SCHLOSSER, J. F.. Locomoção em terrenos de baixa capacidade suporte. In: WORKSHOP SOBRE MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA NA REGIÃO DE CLIMA TEMPERADO, 2., 1996, Pelotas. **Anais...** Pelotas: UFPel, EMBRAPA-CPACT, UFSM, 1996. p.63-78.

SCHLOSSER, J. F. **Administração de máquinas agrícolas**. Santa Maria: Núcleo de Ensaios de Máquinas Agrícolas, Centro de Ciências Rurais, UFSM, 1998. 100p. Série Técnica – Módulo 6.

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

SERPA, F.M.; **Estimativa de esfoços em implementos de preparo de solos e adequação trator-implemento**. 1997. 98f. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas,1997.

SERRANO, J.M.P.R. **Contribuição para a otimização do sistema dinâmico tractor-alfaia em mobilização do solo**. 2002. 234f. Tese. (Doutorado) Universidade de Évora, Évora, 2002.

SERRANO, J.M.; PEÇA, J.O.; PINHEIRO, A.; CARVALHO, M.; NUNES, M.; RIBEIRO, L.; SANTOS, L. The effect of gang angle of offset disc harrows on soil tilth, work rate and fuel consumption. **Biosystems Engineering**, v.84, p.171-176, 2003.

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

SIEMENS, J. C. **Farm Power and Machinery**. Agricultural Engineering Departement, University of Illinois, Urbana, August, 1996. 110-113p.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, v. 184, p.323-9, 1996.

SILVA, S.L. **Avaliação de semeadoras para plantio direto**: demanda energética, distribuição longitudinal e profundidade de deposição de sementes em diferentes velocidades de deslocamento. 2000. 123f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

SILVA, P.R.A.; BENEZ, S.H.; MAHL, D.; SILVA, A.R.B.; GERMINO, R. Avaliação da demanda energética de hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras de plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. 1 CD-ROM.

SILVEIRA, G.M. **O preparo do solo**: implementos corretos. Rio de Janeiro: GLOBO, 1988. 243p.

SINGE, G.; SINGE, D. Optimum energy model for tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 06, n. 03, p.235-245, 1986.

SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. Implications of soil compaction in crop production for quality of the environment. **Soil and Tillage Research**, 35:5-22, 1995.

SOWERS, C.F. Consistency. In: BLACK C.A. **Methods of soil analysis**. Part 1. Madison : ASA, 1965. p.391-399.

SOUSA FILHO. **Avaliação de teorias de predição do comportamento de tratores agrícolas**. 2001. 153f. (Dissertação de mestrado) - Universidade federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, Brasil, 2001.

SMITH, J. A.; FORNSTRON, K. J. Energy requeriments of selected dryland wheat cropping systems. **Transaction of ASAE**, v.23, n. 4, p.822-825, 1980.

SRIVASTAVA, A.K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P. Engineering principles of agricultural machines. **ASAE Textbook Number 6**. Society of Agricultural Engineers, 1993.

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

STOLF, R.; SILVA, J.R. ; MONTOYA-GOMEZ, J.A. Método de medida do ângulo horizontal de ataque dos discos de grades agrícolas de dupla ação e sua aplicação a uma propriedade agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2007. CD-ROM.

TERZAGHI, K.; PERCL, R.B. & MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3.ed. New York, 1996. 549p.

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

Way, T.R.; Bailey, A.C.; Raper, R.L.; Burt, E.C. Tire lug height effects on soil stresses and bulk density. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.38, n.3, p.669-674, 1995.

WIERMANN, C.; WAY, T.R.; HORN, R.; BAILEY, A.C. & BURT, E.C. Effect of various dynamic loads on stress and strain behaviour of a Norfolk sandy loam. **Soil and Tillage Research**. v.50, p.127- 135, 1999.

WISMER, R. D., LUTH, H. J. Off-Road Traction Prediction of Wheeled Vehicles. **ASAE Paper No. 72-619**, 1972.

WITNEY, B.D. Ploughing Performace predictor. In: **Lecture An Seminar Training Session**, Canoas, Iochpe Maxion, 1985.

WONG, J.Y.; AND REECE, A.R. Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses. Part I. Performance of driven rigid wheels, **Journal of Terramechanics**, v.4, n.1, p. 81-98, 1967.

VIEIRA, C.P.; MESQUITA, C.M.; HERNANI, L.C. **Mecanização**. Sistema plantio direto. O produtor pergunta, a EMBRAPA responde. Brasília: EMBRAPA - SPI; Dourados: EMBRAPA - CPAO, 1998. p.151.

VIEIRA, M. L. **Propriedades físico-hídrico-mêcanicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2006. 104f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

ZOZ, F. **Belt and tire tractive performance**. Milwaukee: Society of Automotive Engineers, 1997. 8 p.

## APÊNDICES

**Apêndice 1 - Análise da variância para as parâmetros de desempenho do conjunto trator-semeadora/adubadora composta por cinco linhas, em solo de textura média. Santa Maria, 2009.**

FV	GL	SQ	QM	F <sub>cal</sub>	PR>F <sub>(5%)</sub>
Força de tração (N)					
Bloco	2	5.643,08	2.821,54	0,16	0,85 <sup>ns</sup>
Velocidade (km/h)	3	6.669.424,59	2.223.141,53	131,37	0,00*
Erro	6	101.536,36	16.922,72	0,81	0,56 <sup>ns</sup>
Erro amostral	60	1.242.295,83	20.704,93		
Total	71	8.018.899,87			
Média	22.626,70				
C.V.(%)	6,66				
Patinagem (%)					
Bloco	2	1,55	0,77	0,27	0,76 <sup>ns</sup>
Velocidade (km/h)	3	2.813,46	937,82	335,19	0,00*
Erro	6	16,78	2,79	1,60	0,16 <sup>ns</sup>
Erro amostral	60	104,78	1,74		
Total	71	2.936,58			
Média	14,91				
C.V.(%)	8,85				
Consumo de combustível (L/h)					
Bloco	2	5,67	2,83	1,87	0,23 <sup>ns</sup>
Velocidade (km/h)	3	421,72	140,34	92,63	0,00*
Erro	6	9,09	1,51	1,21	0,30 <sup>ns</sup>
Erro amostral	60	74,52	1,24		
Total	71	510,30			
Média	13,05				
C.V.(%)	8,53				
Potência requerida na barra de tração (kW)					
Bloco	2	19,68	9,93	1,42	0,31 <sup>ns</sup>
Velocidade (km/h)	3	14.316,81	4.772,27	682,42	0,00*
Erro	6	41,95	6,99	0,84	0,53 <sup>ns</sup>
Erro amostral	60	493,85	8,23		
Total	71	14782,49			
Média	29,44				
C.V.(%)	7,04				

FV	GL	SQ	QM	F <sub>cal</sub>	PR>F <sub>(5%)</sub>
Rendimento de potência na barra de tração (decimal)					
Bloco	2	0,0001	0,00005	0,45	0,65 <sup>ns</sup>
Velocidade (km/h)	3	0,0919	0,03064	235,59	0,00*
Erro	6	0,0007	0,00013	1,10	0,36 <sup>ns</sup>
Erro amostral	60	0,0070	0,00011		
Total	71	0,0998			
Média	0,63				
C.V.(%)	1,69				
Coeficiente de força tangencial (decimal)					
Bloco	2	0,0005	0,0002	0,15	0,85 <sup>ns</sup>
Velocidade (km/h)	3	0,6757	0,2252	134,29	0,00*
Erro	6	0,0100	0,0016	0,78	0,58 <sup>ns</sup>
Erro amostral	60	0,1279	0,0021		
Total	71	0,8142			
Média	0,78				
C.V.(%)	5,84				

\*Efeito significativo, com 5% de probabilidade de erro

<sup>ns</sup> Não existe efeito significativo, com 5% de probabilidade de erro.

**Apêndice 2 - Análise da variância para os parâmetros de desempenho do conjunto trator-grade aradora composta por 18 discos, sob solo de textura média. Santa Maria, 2009.**

FV	GL	SQ	QM	F <sub>cal</sub>	PR>F <sub>(5%)</sub>
Força de tração (N)					
Bloco	2	8126729.14	4063364.57	4.38	0,01
Velocidade (km/h)	3	786257683.79	262085894.59	224.09	0,00
Massa (kg)	2	100776289.50	50388144.75	43,08	0,00
Velocidade x Massa	6	46485731.00	7747621.83	6,62	0,00
Erro	60	70172948.33	1169549.13	1,26	0,13
Erro amostral	142	131495295.51	926023.20		
Total	215	1143314677.31			
Média	12.036,82				
C.V.(%)	7,99				
Patinagem (%)					
Bloco	2	10,93	5,46	5,99	0,00
Velocidade (km/h)	3	22,17	7,39	12,93	0,00
Massa (kg)	2	1.392,22	696,11	1.217,93	0,00
Velocidade x Massa	6	32,34	5,39	9,43	0,00
Erro	60	34,29	0,57	0,62	0,97
Erro amostral	142	129,45	0,91		
Total	215	1.621,43			
Média	10,21				
C.V.(%)	9,34				
FV	GL	SQ	QM	F <sub>cal</sub>	PR>F <sub>(5%)</sub>

Consumo de combustível (L/h)					
Bloco	2	2,25	1,25	0,78	0,45
Velocidade (km/h)	3	323,82	107,94	176,37	0,00
Massa (kg)	2	282,51	141,25	230,80	0,00
Velocidade x Massa	6	47,61	7,93	12,96	0,00
Erro	60	36,72	0,61	0,42	1,00
Erro amostral	142	202,95	1,42		
Total	215	895,86			
Média	9,45				
C.V.(%)	12,65				
Potência requerida na barra de tração (kW)					
Bloco	2	24,83	12,41	2,78	0,06
Velocidade (km/h)	3	20.554,54	6.851,51	1.223,85	0,00
Massa (kg)	2	113,04	56,52	10,09	0,00
Velocidade x Massa	6	179,83	29,97	5,35	0,00
Erro	60	335,89	5,59	1,25	0,13
Erro amostral	142	632,30	4,45		
Total	215	21.840,45			
Média	24,41				
C.V.(%)	8,64				
Eficiência de tração (decimal)					
Bloco	2	0,0005	0,0002	1,61	0,20
Velocidade (km/h)	3	0,1170	0,0390	206,64	0,00
Massa (kg)	2	0,0235	0,0117	62,47	0,00
Velocidade x Massa	6	0,0099	0,0016	8,80	0,00
Erro	60	0,0113	0,0001	1,18	0,20
Erro amostral	142	0,0225	0,0001		
Total	215	0,1849			
Média	0,60				
C.V.(%)	2,05				
Coeficiente de força tangencial (decimal)					
Bloco	2	0,0086	0,0043	4,44	0,01
Velocidade (km/h)	3	0,8306	0,2768	231,66	0,00
Massa (kg)	2	0,1046	0,0523	43,79	0,00
Velocidade x Massa	6	0,0459	0,0076	6,41	0,00
Erro	60	0,0717	0,0011	1,23	0,15
Erro amostral	142	0,1375	0,0009		
Total	215	1,1991			
Média	0,44				
C.V.(%)	6,31				

\*Efeito significativo, com 5% de probabilidade de erro

<sup>ns</sup> Não existe efeito significativo, com 5% de probabilidade de erro.

**Apêndice 3 - Análise da variância para os parâmetros de desempenho do conjunto trator-grade aradora composta por 22 discos, sob solo textura argilosa. Passo Fundo, RS, 2009.**

FV	GL	SQ	QM	F <sub>cal</sub>	PR>F <sub>(5%)</sub>
Força de tração (N)					
Bloco	2	508.308,58	254.154,29	0,50	0,62
Velocidade (km/h)	3	131.501.655,83	43.833.885,27	86,85	0,00
Erro	6	3.028.090,41	504.681,73	1,79	0,11
Erro amostral	60	16.831.320,66	281.022,01		
Total	71	151.899.375,50			
Média	16.103,75				
C.V.(%)	3,29				
Patinagem (%)					
Bloco	2	18,39	9,19	4,45	0,06
Velocidade (km/h)	3	1.434,99	478,33	231,62	0,00
Erro	6	12,39	2,06	1,39	0,23
Erro amostral	60	88,78	1,47		
Total	71	1554,56			
Média	13,89				
C.V.(%)	1,21				
Consumo de combustível (L/h)					
Bloco	2	0,36	0,18	0,15	0,85
Velocidade (km/h)	3	998,64	332,88	292,00	0,00
Erro	6	6,84	1,14	1,21	0,31
Erro amostral	60	56,16	0,93		
Total	71	1.062,00			
Média	12,50				
C.V.(%)	7,73				
Potência requerida na barra de tração (kW)					
Bloco	2	89,23	44,61	2,02	0,21
Velocidade (km/h)	3	4.496,30	1.498,76	67,87	0,00
Erro	6	132,49	22,08	5,28	0,00
Erro amostral	60	250,55	4,17		
Total	71	4968,58			
Média	27,83				
C.V.(%)	7,34				
Rendimento de potência na barra de tração (decimal)					
Bloco	2	0,01	0,0059	0,87	0,46
Velocidade (km/h)	3	0,22	0,0743	10,94	0,00
Erro	6	0,04	0,0067	34,95	0,00
Erro amostral	60	0,01	0,0001		
Total	71	0,28			
Média	0,57				
C.V.(%)	2,43				
Coeficiente de força tangencial (decimal)					
Bloco	2	0,0001	0,00008	0,26	0,77
Velocidade (km/h)	3	0,0901	0,03005	95,04	0,00
Erro	6	0,0018	0,00031	1,76	0,12

Erro amostral	60	0,0107	0,00017
Total	71	0,1029	
Média	0,45		
C.V.(%)	2,91		

\*Efeito significativo, com 5% de probabilidade de erro

<sup>ns</sup> Não existe efeito significativo, com 5% de probabilidade de erro.

**Apêndice 4 - Análise da variância para as variáveis de desempenho do conjunto trator-escarificador composto por cinco hastes, sob solo de textura argilosa. Passo Fundo, RS, 2009.**

FV	GL	SQ	QM	F <sub>cal</sub>	PR>F <sub>(5%)</sub>
Força de tração (N)					
Bloco	2	2.377.217,28	1188608.64	4,12	0,01
Velocidade (km/h)	3	170.524.995.05	56841665.01	132,07	0,00
Profundidade (cm)	2	2.115.162.272.62	1057581136.31	2.457,30	0,00
Velocidade x Profundidade	6	29.255.832.82	4875972.13	11,32	0,00
Erro	60	25.822.996.16	430383.26	1,49	0,02
Erro amostral	142	40.921.831.37	288181.91		
Total	215	2.384.065.145.32			
Média	22.312,08				
C.V.(%)	2,40				
Patinagem (%)					
Bloco	2	1,62	0,81	0,19	0,82
Velocidade (km/h)	3	815,51	271,83	60,67	0,00
Profundidade (cm)	2	525,96	52,46	58,69	0,00
Velocidade x Profundidade	6	314,80	4,48	11,71	0,00
Erro	60	268,81	6,61	1,05	0,39
Erro amostral	142	605,73	8,83		
Total	215				
Média	16,43				
C.V.(%)	12,56				
Consumo de combustível (L/h)					
Bloco	2	0,48	0,24	0,39	0,67
Velocidade (km/h)	3	2.576,16	858,72	1.883,15	0,00
Profundidade (cm)	2	1.010,28	505,14	1.107,76	0,00
Velocidade x Profundidade	6	143,64	23,94	52,50	0,00
Erro	60	27,36	0,45	0,75	0,89
Erro amostral	142	85,92	0,60		
Total	215	3.843,84			
Média	15,53				
C.V.(%)	5,00				
Potência requerida na barra de tração (kW)					
Bloco	2	13,46	6,73	0,96	0,38
Velocidade (km/h)	3	20.901,93	6.967,31	1.705,17	0,00
Profundidade (cm)	2	8.126,62	4.063,31	994,45	0,00



FV	GL	SQ	QM	F <sub>cal</sub>	PR>F <sub>(5%)</sub>
Potência requerida na barra de tração (kW)					
Velocidade x Profundidade	6	1.013,91	168,98	41,35	0,00
Erro	60	245,15	4,08	0,58	0,99
Erro amostral	142	995,16	7,00		
Total	215	31.296,26			
Média	38,15				
C.V.(%)	6,93				
Eficiência de tração (decimal)					
Bloco	2	0,0001	0,00005	0,25	0,77
Velocidade (km/h)	3	0,0262	0,00875	34,00	0,00
Profundidade (cm)	2	0,00243	0,00121	4,73	0,01
Velocidade x Profundidade	6	0,01610	0,00268	10,42	0,00
Erro	60	0,01545	0,0002	1,10	0,31
Erro amostral	142	0,03308	0,0002		
Total	215	0,09346			
Média	0,60				
C.V.(%)	2,50				
Coeficiente de força tangencial (decimal)					
Bloco	2	0,0012	0,0006	3,67	0,02
Velocidade (km/h)	3	0,0943	0,0314	118,53	0,00
Profundidade (cm)	2	1,1490	0,5745	2.166,59	0,00
Velocidade x Profundidade	6	0,0122	0,0020	7,72	0,00
Erro	60	0,0159	0,0002	1,51	0,23
Erro amostral	142	0,0247	0,0001		
Total	215	1,2976			
Média	0,72				
C.V.(%)	1,81				

\* Efeito significativo, com 5% de probabilidade de erro

<sup>ns</sup> Não existe efeito significativo, com 5% de probabilidade de erro.