

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E  
METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS  
DO SOLO RELACIONADOS A DIAS TRABALHÁVEIS COM  
MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

**PEDRO CASTRO NETO**

Engenheiro Agrônomo

*Orientador:* **Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças**

*Co-Orientador:* **Prof. Dr. Dinival Martins**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP  
Fevereiro – 2001

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO  
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - FCA  
UNESP - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Castro Neto, Pedro

**C355d** Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas / Pedro Castro Neto. -- Botucatu, 2001

xvii, 155 f. : il. color. ; 28 cm

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2001

Orientador: Kléber Pereira Lanças

Co-orientador: Dinival Martins

Bibliografia: f. 134-155

1. Climatologia agrícola – Dias trabalháveis 2.  
Solos– Parâmetros físicos 3. Máquinas agrícolas –  
Dias trabalháveis 4. Máquinas agrícolas – Dias tra-  
lháveis – Metodologia I. Título

Palavras-chave: Dias trabalháveis; Índice de cone; Resistência a penetração; Recalque do solo; Compactação; Interação pneu-solo; Pressão de preconsolidação; Consolidômetro

**À memória de minha mãe,  
pelo caráter de pessoa e pelo incentivo à sabedoria  
Ao meu pai, de quem herdei o amor pela terra**

**Dedico**

**Meus sogros, tios, irmã, cunhados, sobrinhos e  
primos**

**Homenageio**

**À Sandra Regina, minha esposa  
À Mayra, Daniela e Rafael, meus  
filhos**

**Ofereço**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela fé e perseverança sempre presentes;

À Universidade Federal de Lavras, por meio do Departamento de Engenharia, pela liberação concedida para realizar o Doutorado;

À Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Campus de Botucatu, pela oportunidade de participar do Curso;

Ao PICDT/CAPES, pela concessão da bolsa de estudos;

Ao Professor Kléber Pereira Lanças, pela orientação, estímulo, ensinamentos transmitidos, amizade e confiança;

Ao Professor Dinival Martins, pelo desprendimento e amizade;

Aos docentes do Departamento de Engenharia Rural e do Curso de Pós-graduação;

Ao colega Gui Alvarenga, grande incentivador da realização deste Curso;

Aos Professores Carlos Antônio Gamero e Sérgio Hugo Benez pelo apoio e amizade em todas as ocasiões;

Ao supervisor da Fazenda Experimental, Professor Affonso Maria de Carvalho, aos técnicos Agrícolas Marcos José Gonçalves e Mário de Oliveira Munhoz e aos operadores de máquinas agrícolas Manoel Lopes dos Santos, Acássio Tavares Filho, Aparecido Bessa Ramon, Carlos Humberto Barbosa, Carmo Fioravante, Estevão Prudêncio Ramos, Josias Florêncio e Milton Prudente pela fundamental colaboração nas atividades de campo;

Ao Benedito Fernando Camargo, funcionário do NEMPA, pela convivência e amizade;

Aos Técnicos Maury Torres da Silva, Gilberto Winckler, Silvio Sabatini S. Scolastici e Ailton de Lima Lucas pela valiosa colaboração;

Às secretárias do Departamento de Engenharia Rural, Rosângela Cristina Moreci e Rita de Cássia Miranda, e do curso de pós-graduação, Maria do Carmo Fernandes D'Auria, pela presteza no atendimento;

Ao Alberto Kazushi Nagaoka pelo companheirismo e dedicação;

Aos colegas Afonso Lopes e Renato Lara de Assis, pela amizade;

Ao acadêmico Flávio Rielli Mazetto pela decisiva participação nos ensaios de deformação de pneus;

Aos acadêmicos monitores Saulo Philipe Sebastião Guerra e Edilene Marlei Costa e aos estagiários Rodrigo Stringheta de Souza e Rodrigo Corrêa Barbosa;

A todos os colegas de curso;

Aos Professores Álvaro Pires da Silva (ESALQ) e Moacir de Souza Dias Junior (UFLA), pelas facilidades oferecidas para o projeto de construção do consolidômetro;

Às empresas Usi-Tese Serviços de Torno e Solda (Venilton de Souza - Venon), Usinagem Vidotto (João Luiz Vidotto e Sérgio Luis de Camargo) e MR Equipamentos Hidráulicos (Manoel Bento de Almeida Rodrigues) pelo trabalho e atenção na construção de vários equipamentos;

Ao meu filho Rafael, pelo auxílio nos trabalhos de campo;

Aos amigos que deram suporte durante a permanência em Botucatu, especialmente Adalberto e Ana Márcia, Elberis e Roseli, Fraga e Janice, Ricardo e Luzia, Tarley e Tida e Vicente e Laura;

Enfim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho viesse a ser realizado.

## SUMÁRIO

1 RESUMO .....	1
2 SUMMARY .....	3
3 INTRODUÇÃO .....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA .....	7
4.1 Dias trabalháveis .....	8
4.2 Compactação .....	18
4.3 Índice de cone .....	30
4.4 Pressão de preconsolidação .....	37
4.5 Recalque em solos agrícolas .....	46
4.6 Interação pneu-solo .....	56
4.7 Transferência de peso .....	67
5 MATERIAL E MÉTODOS .....	70
5.1 Material .....	70
5.1.1 Sistemas computacionais .....	70
5.1.2 Pneus .....	70
5.1.3 Determinação do centro de gravidade .....	71
5.1.4 Área experimental .....	72
5.1.5 Máquinas e implementos agrícolas .....	73
5.1.6 Componentes do sistema de irrigação .....	75
5.1.7 Determinação do teor de água no solo .....	75
5.1.8 Coleta de amostras indeformadas .....	75
5.1.9 Sistema de aquisição de dados .....	76
5.1.10 Sistema de posicionamento geográfico .....	77
5.1.11 Outros sensores utilizados .....	77
5.1.12 Consolidômetro .....	77
5.2 Métodos .....	78
5.2.1 Coeficiente de deformação e largura do pneu .....	78
5.2.2 Interação pneu-solo .....	80

5.2.3 Metodologia experimental .....	81
5.2.4 Preparo inicial do solo .....	82
5.2.5 Controle do teor de água e instalação do ensaio .....	82
5.2.6 Sistema de irrigação .....	84
5.2.7 Índice de cone e recalque .....	86
5.2.8 Amostras de solo .....	86
5.2.9 Pressão de preconsolidação .....	87
5.2.10 Determinação dos centros de gravidade.....	88
5.2.11 Análises estatísticas .....	88
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	90
6.1 Construção e calibração de equipamento hidráulico-eletrônico .....	90
6.2 Compressão uniaxial (consolidômetro) .....	96
6.3 Coeficiente de deformação de pneus agrícolas .....	97
6.4 Largura dos pneus .....	99
6.5 Teor de água do solo no ensaio de campo .....	101
6.6 Recalque do solo .....	103
6.7 Centro de gravidade do trator .....	106
6.8 Centro de gravidade do implemento .....	107
6.9 Pressão de contato pneu-solo .....	108
6.10 Pressão de preconsolidação .....	111
6.11 Densidade do solo .....	117
6.12 Índice de cone .....	120
6.13 Dias trabalháveis .....	128
6.14 Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros .....	129
7 CONCLUSÕES .....	132
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	134

## LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1 Coeficientes de variação médios para os coeficientes $k_c$ , $k_\phi$ e $n$ obtidos com ensaios de recalque utilizando diferentes número de pratos (Fan, apud McKyes, 1989)	52
2 Principais características dos pneus utilizados nos ensaios	71
3 Resultado médios das análises físicas do solo da área experimental	72
4 Ferramentas intercambiáveis utilizadas para o levantamento de dados de campo	86
5 Síntese das análises da variância da regressão múltipla para o coeficiente de deformação do pneu em função da carga exercida e da pressão de inflação do pneu	98
6 Equações de regressão múltipla para o coeficiente de deformação ( $C_d$ ) em função da carga exercida ( $W$ ) e da pressão de inflação do pneu ( $p_i$ )	98
7 Síntese das análises da variância da regressão múltipla para o incremento na largura do pneu em função da carga exercida e da pressão de inflação do pneu	100
8 Equações de regressão múltipla para a largura relativa (LR) em função do logaritmo da carga exercida ( $\ln(W)$ ) e da pressão de inflação do pneu ( $p_i$ )	100
9 Teor médio de água no solo ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) e valores do desvio padrão da média obtidos durante o ensaio de campo	101
10 Síntese da análise da variância e teste de médias para teor de água no solo	103
11 Valores de F das análises da variância dos coeficientes do recalque do solo para dias após a chuva nas parcelas e tráfego (sem e com) nas subparcelas	104
12 Valores médios do coeficiente $k_\phi$ para as condições de ausência e presença de tráfego	104
13 síntese das análises da variância das análise de regressão linear entre os coeficientes do recalque do solo, sem e com tráfego, em função do teor de água no solo	105



14	Parâmetros obtidos para a determinação do centro de gravidade do trator MF299	107
15	Parâmetros obtidos para a determinação do centro de gravidade do implemento (arado reversível de 4 discos, marca Jan)	108
16	Opções dos diversos menus do sistema para determinação da pressão de contato pneu-solo (PCPS)	109
17	Valores do teor médio de água, desvio padrão da média e número de amostras das classes de agrupamento dos ensaios de compressão uniaxial, sem tráfego	111
18	Equações das retas de compressão secundária e das retas virgens e valores da pressão de preconsolidação para as cinco classes de teor médio de água no solo (U) dos ensaios de compressão uniaxial, sem tráfego	115
19	Resultados da análise de regressão na forma $\sigma_p = 10^{(U + b)}$ para as cinco classes de agrupamento dos ensaios de compressão uniaxial, sem tráfego	116
20	Valores médios do teor de água no início dos ensaios de compressão uniaxial, $\sigma_p$ estimado pela equação $\sigma_p = 10^{(-6,3572.U+3,199)}$ (antes do tráfego) e determinados (após o tráfego) e incremento de $\sigma_p$ devido ao tráfego	118
21	Síntese da análise da variância para densidade do solo	119
22	Valores médios antes e após o tráfego e incremento percentual da densidade do solo	120
23	Teores de água do solo nas profundidades de 0 a 0,15 e de 0,15 a 0,30 m, tomados por ocasião do levantamento de dados de penetrometria de todas as parcelas, após um período sem chuvas	122
24	Síntese da análise da variância para os valores dos índices de cone nas profundidades de 0 a 0,15 m (IC <sub>15</sub> ), 0 a 0,30 m (IC <sub>30</sub> ), 0 a 0,10 m (IC <sub>10</sub> ), 0,10 a 0,20 m (IC <sub>10-20</sub> ) e 0,20 a 0,30 m (IC <sub>20-30</sub> )	123
25	Valores médios dos Índices de cone na profundidade de 0,15 m, para 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva, antes e após o tráfego	124
26	Valores médios dos Índices de cone na profundidade de 0,30 m, para 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva, antes e após o tráfego	124

27	Valores médios dos Índices de cone na profundidade de 0,10 m, para 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva, antes e após o tráfego	125
28	Valores médios dos Índices de cone na profundidade de 0,10 a 0,20 m, para 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva, antes e após o tráfego	125
29	Valores médios dos Índices de cone na profundidade de 0,20 a 0,30 m, antes e após o tráfego	126
30	Síntese da análise da variância e teste de médias para o incremento do índice de cone para as camadas de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,30 m submetidas ao tráfego 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva	126
31	Valores médios dos incrementos nos valores dos índices de cone devidos ao tráfego (%), nas camadas de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,30 m, para 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva	127

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Corte esquemático longitudinal (a) e transversal (b) de uma raiz (Klar, 1984)	23
2 Esquema de uma raiz mostrando a região de alongação e o sentido das forças longitudinais ( $F_{tc}$ ) e de resistência das paredes celulares à alongação ( $F_{pc}$ ), segundo Camargo e Alleoni (1997)	24
3 Dimensões normalizadas para penetrômetros de cone (ASAE, 1999c)	34
4 Relação semi-logarítmica típica entre a pressão aplicada e a porosidade de solos agrícolas. A linha tracejada representa o ensaio de uma amostra indeformada de solo previamente compactado no campo pela ação de condições normais de trabalho e as linhas contínuas representam o ensaio com amostras deformadas e solo destorroado, segundo Chancellor (1977)	38
5 Curvas de compressão do solo quando este não sofreu nenhuma pressão prévia (a) e quando já experimentou pressões ou ciclos de secagem e umedecimento (b). Adaptado de Dias Júnior & Pierce (1995)	39
6 O método gráfico de Casagrande para a determinação da pressão de preconsolidação, mostrando o menor valor possível (E), o mais provável (B) e o máximo possível (D) e a densidade inicial ( $e_0$ ), adaptado de Holtz & Kovacs(1981)	41
7 Representação esquemática do recalque de um prato no solo (Lanças, 1997)	47
8 Representação esquemática de um prato retangular na superfície de um terreno nas condições de ausência de carga (a), presença de uma pequena carga que não causa ruptura do solo (b), e desenvolvendo ruptura por cisalhamento (c), segundo McKyes (1985)	48
9 Sistema para a determinação dos parâmetros de recalque do solo, segundo Pavlics (1958)	49
10 Esquema simplificado do Módulo de Recalque do Solo, segundo Lanças (1997)	50
11 Representação gráfica esquemática de $p$ em função de $z$ para obtenção dos coeficientes $k_c$ , $k_\phi$ e $n$	51

12	Representação gráfica esquemática dos valores de $a$ em função de $b^{-1}$	53
13	Ilustração da relação entre a teoria de recalque de Bekker e a resistência ao rolamento (Koolen & Kuipers, 1983)	55
14	Deflexão da área de contato pneu-solo, segundo Koolen & Kuipers (1983)	61
15	Triedro de referência para definir a posição do centro de gravidade, mostrando o posicionamento de um trator e a localização das cotas $x$ , $y$ e $z$ (Mialhe, 1980)	68
16	Equipamento especialmente construído para coleta de amostras indeformadas de solo, tendo-se, da esquerda para a direita, um anel, a ferramenta porta-aneis com borda inferior cortante e o conjunto de percussão	76
17	Vista frontal (a) e lateral (b) da prensa de ensaios estáticos de pneus e pneus utilizados	79
18	Geometria de um pneu incluindo o recalque do solo ( $Z$ ) e a deflexão do pneu ( $\delta$ )	80
19	Trator MF299 executando gradagem na área experimental	83
20	Trator MF265 executando preparo final com enxada rotativa na área experimental	83
21	Compactação de uniformização da área experimental	84
22	Vista da área experimental sendo preparada para o ensaio de campo	85
23	Aspecto do transporte e bombeamento de água para irrigação do ensaio (foto maior) e dos aspersores em funcionamento (foto menor)	85
24	Vista parcial da determinação dos parâmetros necessários ao cálculo da posição do centro de gravidade do trator	89
25	Determinação do peso do arado, tomado no pino de engate dianteiro esquerdo, objetivando a determinação do centro de gravidade do impl	89
26	Estrutura porta-ferramentas sem a instrumentação (a) e com a instrumentação (b)	91
27	Curva de calibração da célula de carga de 50.000 N	92
28	Correção do deslocamento vertical do sistema trator-instrumentos em função da carga aplicada pelo pistão hidráulico	92
29	Ferramentas utilizadas para a determinação do recalque (1 a 3), para retirada de amostras deformadas de solo (4) e para determinação da resistência à penetração (5)	93

30 Fluxograma simplificado do programa para o sistema de aquisição de dados	94
31 Instrumentação para coleta de dados de resistência à penetração, recalque e amostras de solo georeferenciados por DGPS	94
32 Localização geográfica da pista de ensaios utilizada (1) e localização do ensaio na pista (2), em graus, minutos e centésimos de minutos	95
33 Vista frontal (a) e lateral (b) do consolidômetro, mostrando no detalhe c, da esquerda para a direita, um anel, a base para amostras e uma placa porosa	97
34 Variação dos coeficientes de deformação em função da carga exercida pelos pneus, calculados para a pressão de inflação de 68,9 kPa (10 psi)	99
35 Largura relativa (largura efetiva/largura nominal) de pneu BPAF, diagonal e radial com pressão de inflação de 68,9 kPa (linhas tracejadas) e 206,8 kPa (linhas contínuas) em função da carga exercida na superfície	100
36 Valores de umidade relativa do ar, temperatura máxima, média e mínima, insolação, precipitação e identificação dos dias de irrigação na área experimental	102
37 Distribuição dos pontos amostrais dos coeficientes de recalque do solo $k_c$ sem tráfego (acima à esquerda) e com tráfego (acima à direita), $k_\phi$ sem tráfego (centro à esquerda) e com tráfego (centro à direita) e $n$ sem tráfego (abaixo à esquerda) e com tráfego (abaixo à direita), em função do teor de água no solo na profundidade de 0 a 0,15 m	106
38 Fluxograma para o desenvolvimento das rotinas de cálculo da pressão de contato pneu-solo	112
39 Determinação do tempo de atuação das pressões de 25 kPa (a), 50 kPa (b), 100 kPa (c), 200 kPa (d), 400 kPa (e), 800 kPa (f) e 1600 kPa (g) no ensaio de compressão uniaxial de acordo com o método de Taylor (Holtz e Kovacs, 1981).	113
40 Curvas de compressão do solo para cinco classes de agrupamento dos ensaios de compressão uniaxial, sem tráfego construídas pela união dos pontos por linhas suaves	114
41 Curvas de compressão do solo após o tráfego para 1 dia (a), 2 b), 4 c) e 6 dias (d) após a chuva, em quatro repetições (blocos)	117

- 42 Resistência à penetração do solo antes (linhas contínuas) e após (linhas tracejadas) o tráfego para os tratamentos de 1 dia (a), 2 dias (b), 4 dias (c) e 6 dias (d) após a chuva 121
- 43 Pressão de preconsolidação calculada para os teores de água no solo obtidos a um, dois, quatro e seis dias após a chuva e pressão de contato pneu-solo (linha contínua), exercida pelo conjunto trator-implemento utilizado para o tráfego no ensaio de campo 128

### LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\eta$	Coefficiente de correção para área de contato pneu-solo
$\lambda$	Coefficiente de elipticidade
$\delta$	Deflexão do pneu
$\sigma$	Pressão aplicada na prensa de ensaios de compressão uniaxial
$\sigma_p$	Pressão de preconsolidação
A	Área
b	Largura
B	Largura do pneu
$C_d$	Coefficiente de deformação do pneu
d	Profundidade do rastro do pneu
D	Diâmetro do pneu
$D_s$	Densidade global do solo
EP	Evapotranspiração potencial
ER	Evapotranspiração real
$F_{pc}$	Força da parede celular
$F_t$	Força de tração exigida na operação
$F_{tc}$	Força longitudinal resultante da pressão de turgor celular
$F_v$	Carga vertical
H	Altura da barra de tração ou olhal dos braços do sistema hidráulico de três pontos
$IC_{10}$	Índice de cone na profundidade de 0 a 0,10 m
$IC_{10-20}$	Índice de cone na profundidade de 0,10 a 0,20 m
$IC_{15}$	Índice de cone na profundidade de 0 a 0,15 m
$IC_{20-30}$	Índice de cone na profundidade de 0,20 a 0,30 m
$IC_{30}$	Índice de cone na profundidade de 0 a 0,30 m
$I_w$	Relação percentual entre a carga aplicada e a carga avaliada do pneu
k	Constante de rigidez do solo
$k_\phi$	Módulo de deformação devido ao atrito interno do solo
$K_c$	Coefficiente de cultura
$k_c$	Módulo de deformação devido à coesão do solo

L	Comprimento da área de contato
$L_1$	Comprimento da área de contato anterior do pneu
$L_2$	Comprimento da área de contato posterior do pneu
m	Índice de compressão
n	Constante de deformação do solo
P	Precipitação efetiva
p	Pressão no solo
$p_c$	Pressão da carcaça do pneu
PCR	Pressão de crescimento radicular
$p_i$	Pressão de inflação do pneu
PI	Peso do implemento
r	Raio do pneu
$R_1$	Peso sob as rodas traseiras do trator
$R_2$	Peso sob as rodas dianteiras do trator
RP	Resistência à penetração do solo
S	Altura da seção do pneu
T	Coefficiente de deflexão do pneu
U	Umidade gravimétrica do solo
$U_i$	Umidade do solo ao final do dia i
$U_{i-1}$	Umidade do solo ao final do dia i-1
W	Carga vertical
$W_{ad}$	Carga adicional no eixo traseiro do trator
$W_{rated}$	Carga avaliada do pneu
$x_1$	Distância entre eixos do trator
x	Distância entre o centro de gravidade e o plano vertical transversal do trator
$x_2$	Distância do olhal dos braços do sistema hidráulico de três pontos ao eixo traseiro
$x_2$	Distância do olhal ao centro de gravidade do implemento
y	Distância entre o centro de gravidade e o plano horizontal de apoio do trator
z	Distância entre o centro de gravidade e o plano vertical longitudinal do trator
Z	Deslocamento vertical ou Recalque do solo



## 1 RESUMO

Um dos fatores mais críticos na determinação do número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas se refere à determinação das condições do solo que forneçam informações para a decisão se o tráfego de máquinas em uma determinada gleba poderá ser realizado sem provocar alterações nas suas propriedades físicas e dinâmicas.

Este trabalho teve como objetivos o desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para a determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas, com ênfase nas características do conjunto trator-implemento e na pressão máxima aplicável ao solo sem que este sofra compactação adicional.

Foi construído um equipamento hidráulico-eletrônico para realização de determinações físicas de solo em campo, o qual se mostrou eficiente para a finalidade a que foi proposto.

O modelo para a determinação da pressão de contato pneu-solo, foi desenvolvido com base nas características do rodado, obtidas pelo seu coeficiente de deformação e pela sua largura relativa, e nas características de recalque do solo, representadas pelos coeficientes  $k_c$  (módulo de deformação devido à coesão do solo),  $k_\phi$  (módulo de deformação devido ao atrito interno do solo) e  $n$  (constante de deformação do solo).

A pressão máxima exercida pelo rodado no solo, antes que houvesse uma compactação adicional, foi caracterizada pela pressão de preconsolidação. Para tanto, construiu-se uma prensa, de acionamento pneumático e aquisição eletrônica de dados, para a realização dos ensaios de compressão uniaxial.

Realizou-se um ensaio de campo com delineamento em blocos casualizados com quatro tratamentos, representados pelo tráfego de um trator um, dois, quatro e seis dias após uma chuva, em quatro repetições.

Os resultados obtidos evidenciaram que a metodologia desenvolvida permitiu a determinação de parâmetros físicos de solo para previsão e monitoramento das condições de trafegabilidade do solo, podendo ser incorporada a modelos agrometeorológicos com a finalidade de determinar do número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas.

Observou-se incrementos na densidade do solo de 25%, 19% e 15%, respectivamente para as condições de tráfego a um, dois e quatro dias após a chuva, não ocorrendo incremento significativo para seis dias após a chuva.

O índice de cone, determinado com teor de água no solo relativamente baixo, mostrou um incremento médio de aproximadamente, 185% para tráfego a um, dois e quatro dias após a chuva e foi sensível para detectar a diferença para o tráfego realizado 6 dias após a chuva, coincidindo com os resultados da pressão de preconsolidação.

O ensaio de campo realçou ainda a importância de se determinar com precisão o momento adequado para a retomada de qualquer atividade motomecanizada após a ocorrência de chuvas, tentando evitar a degradação de sistemas agrícolas pela compactação adicional do solo.

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF EQUIPMENTS AND METHODOLOGY TO OBTAIN PHYSICAL PARAMETERS RELATED WITH AGRICULTURAL MACHINE WORKDAYS. Botucatu, 2000, 156 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.  
Author: PEDRO CASTRO NETO  
Adviser: KLÉBER PEREIRA LANÇAS

## 2 SUMMARY

Decision information about machinery traffic in a certain plot is one of the most critical factors to obtain the number of agricultural machine workdays. The soil conditions is the indicator if the machinery traffic will promote significantly physical and dynamic property changes.

This work aimed to develop and evaluate equipments and methodology to obtain soil physical parameters related to agricultural machine workdays, with emphasis on tractor-implement set characteristics and maximum pressure on soil that do not increase this compaction situation.

A hydraulic-electronic equipment was built for accomplishment of soil physical determinations, showing efficiency and versatility when used on field.

The tire-soil contact pressure model was developed based on wheel and sinkage characteristics, the first one represented by their deformation coefficient and relative width, and the other by  $k_c$ ,  $k_\phi$  and  $n$  coefficients.

The maximum wheel pressure on soil, before additional compaction, was characterized by its previous consolidation (preconsolidation) pressure. A pneumatic and electronic consolidometer was built, for uniaxial compression tests.

A field research was done using a random block experimental design with four treatments, represented by the tractor traffic, number of days after a rain (1, 2, 4 and 6), with four repetitions.

The obtained results, under this research conditions, evidenced that the developed methodology allowed to obtain soil physical parameters that can be used on forecast and soil trafficability monitoring and, finally, incorporated on agroclimatic models used to determine the number of agricultural machine workdays.

It was observed increments of 25%, 19% and 15% on soil bulk density, respectively, for one, two, and four days after the rain traffic conditions and no statistical significant increment for six days after the rain.

There was the same medium increment of 185%, approximately, on cone index, obtained with relatively dry soil, with one, two and four days after rain traffic, agreeing with the preconsolidation pressure results.

The field research showed the importance of accurately determining the adequate moment to initialize any machinery activity after rain, trying to avoid the agricultural system degradation due to the additional soil compaction.

---

Keywords: Workdays, preconsolidation pressure, cone index, sinkage, trafficability, soil compaction, tire-soil.

### 3 INTRODUÇÃO

Estimativas precisas do tempo disponível para realizar determinada operação motomecanizada são relevantes para a seleção eficiente dos equipamentos agrícolas. Em operações agrícolas, o conhecimento do número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas é importante para calcular o tempo disponível e tomar decisões de manejo relacionadas ao tamanho da área a ser explorada.

A decisão de trafegar ou não em determinado talhão para efetuar certa operação agrícola motomecanizada após a ocorrência de uma chuva, ou mesmo após a irrigação, depende de fatores relacionados ao clima, à operação a ser realizada, ao peso das máquinas e dimensões do rodado e ao solo.

Vários pesquisadores, em diversas regiões do mundo, têm utilizado modelos de estimativa do balanço hídrico para avaliar o estado dinâmico do teor de água e as condições de manejo do solo, utilizando diferentes dados e suposições, levando a variações na precisão de suas estimativa, porém, sem considerar a capacidade de suporte de carga do solo, a pressão de contato entre o rodado das máquinas agrícolas e o solo ou mesmo a operação a ser executada.

Existem diversos modelos matemáticos para o cálculo da área de contato pneu-solo; porém, a maioria apresenta a desvantagem de serem razoavelmente complicados ou trabalhar em condições estáticas, e não dinâmicas.

A capacidade de suporte de carga do solo não depende somente de suas características físicas, mas também do seu histórico de manejo, que pode ser determinado pela utilização da sua pressão de preconsolidação.

Assim, propôs-se o presente trabalho com o objetivo de desenvolver e avaliar equipamentos e metodologia para a determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com equipamentos agrícolas, com ênfase na pressão de contato rodado-solo para a condição dinâmica e na pressão de preconsolidação do solo.

## **4 REVISÃO DE LITERATURA**

Por milhares de anos a “mecanização” das operações agrícolas pôde ser realizada por pequenos aparelhos tais como alavancas, cilindros ou rolos e a força corporal, até o surgimento do uso de utensílios como a enxada, a pá, a foice, a grade de destorroar, o ancinho e a carreta de rodas. Por volta de 1880, foi criado o motor de combustão interna, que funcionava com gás de carvão (gasogênio) e, depois, com gasolina e óleo diesel, que continua a ser utilizado nos carros, caminhões, ônibus e tratores (Galeti, 1981) até os dias atuais.

No início do século XX, surgiram as primeiras indústrias de trator na Inglaterra, levando a uma verdadeira revolução na agricultura. No Brasil, o primeiro ciclo de motomecanização agrícola ocorreu antes da I Guerra Mundial, no período de 1914 a 1918. Devido à falta de braços para a lavoura, houve a importação de tratores providos de rodas de ferro, em diferentes regiões do País (Corrêa, 1996).

Os equipamentos agrícolas são um exemplo do desenvolvimento da humanidade. Porém, apesar de facilitar o trabalho, estas atividades levam a alterações nas propriedades físicas dos solos pelo seu uso contínuo, o que tem sido motivo de atenção por parte de muitos pesquisadores.

### **4.1 Dias Trabalháveis**

Em mecanização agrícola, considera-se dia úmido aquele em que o teor de água no solo impede ou dificulta o tráfego de tratores e o trabalho da maquinaria agrícola (Mialhe, 1974). Estudos desta natureza são feitos com base no conceito de seca agrônômica, que expressa uma condição sob a qual há insuficiente disponibilidade de água na zona das raízes, para um ótimo crescimento das plantas. Assim, é considerado dia seco o período de 24

horas durante o qual prevalecem as condições de seca agrônômica, cuja estimativa é feita levando em conta o tipo de solo, os dados meteorológicos da região e a profundidade efetiva das raízes.

Para se conseguir os melhores resultados operacionais com o uso de máquinas agrícolas é fundamental uma seleção racional dentro das diversas opções disponíveis na propriedade ou oferecidas pelo mercado. Para esta seleção há a necessidade de se efetuar um dimensionamento das operações agrícolas a partir de um cronograma de trabalho, cuja elaboração se inicia com a estimativa dos dias operacionalmente úteis ao longo do período programado para a execução das operações agrícolas exigidas pelo sistema de produção (Afféri, 1992).

A determinação de que um dia seja operacionalmente útil tem sido feita com base nas condições meteorológicas e na faixa de umidade do solo que possibilita o tráfego do trator e a atuação plena e satisfatória dos órgãos ativos da máquina ou implemento utilizado. Dependendo da operação a ser realizada, o trânsito sobre o solo agrícola pode se restringir apenas à condição de ação do rodado sobre o solo, ou vir acompanhado da ação de um órgão ativo de mobilização do solo.

Um solo é considerado trabalhável, de acordo com Hassan e Broughton (1975), se um trator ou outra máquina agrícola pode se movimentar naquele solo para executar satisfatoriamente a função da máquina sem causar danos significativos ao solo.

De acordo com a DEFENSE MAPPING SCHOOL (1986), trafegabilidade é uma medida da capacidade do solo em suportar o movimento de um veículo, sendo sua determinação um ponto crítico na preparação de mapas para movimento de tropas, “fora de estrada”. A trafegabilidade do solo está diretamente relacionada com o seu teor de água e, portanto, depende das condições meteorológicas. Para o caso dos solos agrícolas deve-se estudar também o efeito deste tráfego nas propriedades físicas do solo, com os possíveis prejuízos para a produtividade da cultura ali instalada.

A disponibilidade de dias trabalháveis, influenciada pelo clima e pelo tipo de solo, foi considerada como um dos fatores responsáveis pela alteração do custo de produção do milho entre o preparo do solo e o plantio por Tulu et al. (1974).



De acordo com a ASAE (1999a), as operações com máquinas agrícolas no campo podem ser limitadas por temperaturas de congelamento, chuva, deficiência excessiva de umidade no solo e outros fatores meteorológicos relacionados. Como a variabilidade meteorológica é grande, qualquer previsão do número de dias trabalháveis em determinado período é uma função da região climática, declividade do terreno, tipo de solo, características de drenagem, operação a ser realizada e modelo de tração e flutuação do conjunto motomecanizado.

Vários teores de água no solo tem sido utilizados por diversos pesquisadores como limite abaixo do qual o dia pode ser considerado trabalhável.

O número de dias disponíveis para operações de preparo do solo em cada trimestre para solos barro-arenosos e barro argilosos da região leste da Inglaterra, é apresentado por Witney (1995), em três níveis de probabilidade. O autor utilizou dois critérios para trabalhabilidade do solo: teor de água na capacidade de campo e limite de plasticidade do solo.

Foi considerado por Souza et al.(1992) como dia favorável ao trabalho de campo aquele em que a água disponível no solo fosse igual ou menor que 90% da disponibilidade total nos primeiros 15 cm de solo. Um dia com 5 mm ou mais de chuva foi considerado como um dia ruim para o trabalho de campo, independente da quantidade de água disponível nos 15 cm de solo. O limite de 5mm representou o valor médio da evapotranspiração diária. Qualquer dia que apresente precipitação de 10mm ou mais no dia anterior também foi classificado como um dia ruim para as operações no campo.

Baseados em dois anos de medições de umidade do solo e observações sobre as condições de trabalho, Selirio e Brown (1972) concluíram que o cultivo é possível quando o teor de água no solo é igual ou menor que 90% da capacidade de campo à profundidade de 12 cm, independente do teor de água nas camadas mais profundas. Além deste critério, o dia seria considerável como não trabalhável caso tivesse mais que 2,5 cm de neve ou com temperatura abaixo de 0°C, o que daria a condição de solo congelado. Tendo em vista a pequena importância dos dois últimos critérios para as condições climáticas brasileiras, as condições de neve e

baixa temperatura serão omitidas nesta revisão

O critério estabelecido por Morey et al., apud Hassan e Broughton (1975), é de que seja considerado trabalhável qualquer dia no qual a umidade do solo nos primeiros 15 cm do perfil esteja abaixo de 95% da capacidade disponível (quantidade de água contida no solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha), e que tenha ocorrido menos de 2,5 mm de chuva.

A condição de trabalhabilidade do solo pode ser expressa pela sua trafegabilidade, a qual é função da capacidade de suporte, força de cisalhamento, atrito e adesão do solo (Knight e Freitag, 1962). O teor de água no solo afeta as quatro propriedades citadas.

Teor de água acima da capacidade de campo foi considerado por Frisby (1970) como limitante para classificar o dia como não trabalhável.

O déficit de água no solo, definido por Earl (1997) como sendo a quantidade de água necessária para elevar o teor de água do solo à capacidade de campo para uma dada profundidade, apresentou forte correlação com a resistência do solo à penetração de um cone, o que permite a utilização destes dados como parâmetros para a previsão da trafegabilidade e trabalhabilidade dos solos. Para diversos solos da Europa, utilizou como limites mínimos de déficit de água no solo, valores variando de 5 a 20 mm para trafegabilidade e de 10 a 30 mm para trabalhabilidade, considerando o perfil de solo de 0 a 15 cm de profundidade.

Um outro modelo de trafegabilidade foi desenvolvido e testado para estimar dias trabalháveis para vários locais do Canadá (Dyer e Baier, 1979). O princípio do balanço de água no solo foi simplificado de tal forma que as diferenças inerentes às culturas foram ignoradas, e somente a camada de solo próxima à superfície foi considerada. A classificação de um dia como trabalhável para operações agrícolas foi efetuado em função da trafegabilidade da superfície do solo, determinado pelo seu teor de água. Para simular as condições de umidade, o perfil do solo foi dividido em 6 camadas de 5 cm de espessura, considerando-se as duas camadas superficiais ativas para a evaporação e trafegabilidade, e todas as 6 camadas ativas para distribuição de umidade. Utilizando o mesmo critério de divisão do perfil do solo em 6

camadas, Von Bargen et al. (1986) determinou a disponibilidade de dias trabalháveis para 14 localidades da região centro-leste de Nebraska, Estados Unidos da América, em 3 tipos de solo. O critério para determinação dos dias trabalháveis, com base na percentagem da capacidade de campo, foi de 92,3% e 98,5%, respectivamente para as camadas de 0 a 5 e de 5 a 10 cm em solo leve, 90,7% e 96,5% para solos médios e 87% e 92% para solos pesados.

Para simular sistemas de produção de milho, Holtman et al. (1973) desenvolveram um sistema computacional no qual utilizaram como critério de trabalhabilidade a distribuição da percentagem de água disponível nos primeiros 3 cm, 4,5 cm, e 7,5 cm de solo. Para trabalhabilidade em solos leves, utilizou como limite 95% de água disponível nas duas primeiras camadas (7,5 cm) e, para solos pesados e bem drenados, 98 ou 99% de água disponível nas três camadas (15cm).

Os dias em que se pode operar com máquinas agrícolas na produção de soja em três regiões do Estado de Minas Gerais, foram aqueles cujo teor de água disponível no solo é igual ou menor que 90% da capacidade de campo nos primeiros 15 cm de profundidade (Sedyama et al., 1979).

Além deste critério, o modelo apresentado por Sedyama et al. (1979) considerava simultaneamente que, caso ocorra um dia com 5 mm ou mais de chuva ou com uma precipitação de 10 mm ou mais no dia anterior, ou ainda com uma precipitação superior a 0,2 mm no dia e com 2 mm ou mais no dia anterior, era registrado como um dia inapto para o trabalho com máquinas. Este último critério foi adotado porque dois dias consecutivos com chuvas caracterizam a persistência das condições do tempo. Isto indica que a precipitação poderia interferir nas operações normais com máquinas, independente da umidade nos 15 cm iniciais do solo.

Estes autores não desenvolveram estudos tendo em vista a validação do modelo proposto. Os mesmos critérios foram utilizados para todas as áreas, sem discriminação quanto ao tipo de solo e operações agrícolas envolvidas durante o ciclo da cultura em estudo. O último critério adotado pode ser válido para operações que são influenciadas pela umidade relativa do ar presente naquelas condições da persistência de tempo chuvoso, como pulverizações, fertilizações e colheita, não obstante, estas podem ser

perfeitamente realizadas, desde que o solo ofereça condições de tráfego ou permita trabalhos de mobilização, como aração e cultivo (Afféri, 1992).

Para o planossolo Pelotas, Agendes & Mota (1986) consideraram um dia trabalhável com máquinas agrícolas quando a umidade do solo é igual ou menor do que 84% da capacidade de água disponível nos primeiros 12 cm de solo, exemplificando a utilização dos resultados encontrados para as operações de aração, gradagem e semeadura de arroz.

Em seu modelo de simulação para estimar os dias disponíveis para o cultivo, Elliott et al. (1977) utilizou o critério de 80% e 90% de água disponível na camada superior do perfil, respectivamente para solos barro-siltosos e barro-arenosos. Também estabeleceram o critério de que não seria possível cultivar o solo em um dia cuja precipitação fosse maior que 5,1 mm.

O número de dias apropriados para as operações de campo foi estimado por Bolton, citado por Assis (1988), utilizando a técnica do balanço hídrico. Determinaram que a umidade do solo abaixo de 70 a 80% da máxima era o valor limitante para mobilidade do trator agrícola.

Já Nath e Johnson, citados por Afféri (1992), consideraram que teores de água acima de 85% da capacidade de campo nos primeiros 15 cm de solo torna-o sem condições para a colheita da cultura de sorgo.

Indicam Rutledge e McHardy (1968) que o solo é trabalhável em umidade próxima ou acima da capacidade de campo. Subseqüentemente, eles definem um dia não trabalhável como aquele em que o teor de água se apresenta acima de 95% da “capacidade”, não deixando claro se estão se referindo à capacidade de campo ou capacidade de água disponível. De acordo com Hassan e Broughton (1975), vários pesquisadores têm feito diferentes interpretações do artigo de Rutledge e McHardy (1968), concluindo que a condição limitante de umidade do solo pode ser especificada como a percentagem da capacidade de campo ou da capacidade de água disponível, porém, esta base deve ser claramente estabelecida.

Vários autores citados por Afféri (1992), consideraram o limite plasticidade do solo como critério para a trafegabilidade em solos agrícolas. Este critério não leva em consideração apenas o teor de água,

sendo portanto, uma tentativa de considerar alguma característica do solo expressa pelo seu limite de plasticidade.

Uma metodologia para determinar o critério do teor de água no solo limite para operações com máquinas agrícolas foi proposta por Flores et al. (1990). A metodologia foi desenvolvida com base nos teores de água que dão a máxima resistência do solo, aquela relacionada à eficiência de tração para o limite de patinagem adotado, a que permite uma operação aceitável do implemento ou que permita a manipulação adequada do solo e a umidade que previne a compactação do solo.

A textura do solo e a drenagem são parâmetros que apresentam o maior impacto na disponibilidade de dias trabalháveis para as mesmas condições meteorológicas. Rosenberg et al. (1982) concluíram, para regiões do estado de Michigan, Estados Unidos da América, que os solos arenosos apresentam 15% mais dias trabalháveis que os argilosos. Em solos argilosos, drenagem deficiente reduz os dias trabalháveis em 12%.

A trafegabilidade e a trabalhabilidade de solos aluviais com lençol freático pouco profundo em Oderbruch, Alemanha, foram avaliadas por Muller et al. (1990), concluindo que ambos os parâmetros são dependentes do lençol freático e das condições meteorológicas. Os resultados foram utilizados para o desenvolvimento de um sistema computacional, o qual deverá dar suporte à decisão por parte do agricultor.

De acordo com Thomasson (1982), a tensão de 0,33 bar é um valor médio considerado para boas condições de trabalho, o qual, provavelmente, é mais seco que o necessário para solos arenosos e muito úmido para alguns solos pesados. Conforme o autor, o limite de plasticidade é um indicador mais apropriado para trabalhabilidade, mas a disponibilidade de dados é muito limitada.

A precipitação ocorrida no dia, mesmo deixando o solo com teor de água inferior ao limite pré-determinado, poderá impedir as operações motomecanizadas. Frisby (1970) considerou um dia não trabalhável quando ocorreu uma chuva superior a 2,5 mm, considerada excessiva para boa tração.

A umidade do solo e os dados climáticos forma os principais parâmetros utilizados por Babeir (1984) e por Babeir et al. (1986)

para seu modelo de previsão, denominado TRACTMOD. Eles estimaram a dinâmica da água no solo para camadas de 0 a 15 cm e de 15 a 30 cm, caracterizando o solo como trabalhável ou não trabalhável. Expressaram o critério de tráfego em solos agrícolas no centro do estado de Iowa, Estados Unidos da América, como sendo 99% da capacidade de campo do solo a umidade máxima que este deveria ter para ser considerado apto. Além disso, se ocorrer um dia chuvoso precedido por um dia apto e a precipitação não for maior que 5 mm, este dia será considerado também apto e, se para três ou mais dias chuvosos ininterruptos, a precipitação do dia em análise superar 1,3 mm, o dia será tido como não apto, independente da umidade do solo, caso esta seja menor que a capacidade de campo.

De acordo com Elliot et al. (1977), o cultivo não é possível em um dia com chuva de 5,1 mm ou mais, enquanto Shaw, citado por Rumsey & Torres (1989) considerou um valor variando de 5,1 mm até meados da primavera e um valor de 7,6 mm a partir daí.

Um valor limite de 6,4 mm de chuva para um dia ou 2,5 mm para um dia quando o dia anterior foi chuvoso foi considerado por Rumsey & Torres (1989). Já Assis (1988) considerou um dia com 5,0 mm ou mais de chuva como não trabalhável independente da quantidade de água disponível nos primeiros 150 mm de solo, tomando o valor 5,0 mm por ser o valor médio da evapotranspiração diária. Segundo o mesmo raciocínio, considerou também como não trabalhável um dia com 10,0 mm ou mais de chuva no dia anterior. Considerou ainda como dia não trabalhável aquele com precipitação superior a 0,2 mm e com 2,0 mm ou mais no dia anterior, justificando que este fato caracteriza o fenômeno de persistência das condições do tempo do dia anterior.

Utilizando um modelo de balanço de água no solo desenvolvido com base em 20 anos de dados climáticos, computando a entrada de água no solo pela precipitação e a saída pela evapotranspiração, drenagem e escoamento superficial, Acharya e Brown, citados por Von Bargen et al. (1986), consideraram um dia como não trabalhável caso a precipitação fosse igual ou maior que 3,8 mm. Caso a precipitação fosse menor que 3,8 mm, o dia era classificado como possivelmente trabalhável, dependendo do teor de água no solo, sendo considerado trabalhável se a umidade dos

primeiros 12 cm do solo fosse inferior a 95% da capacidade de campo.

Objetivando determinar o número de dias potencialmente úteis para o trabalho com máquinas florestais em função de fatores meteorológicos nas regiões de Botucatu-SP e Guanhães-MG, Fernandes (1996), considerou como “dia ruim” para o trabalho aquele onde:

- a) o teor de água no solo era superior a 90% de água disponível, ou;
- b) que a precipitação do dia fosse superior a 5 mm, ou que a precipitação do dia fosse superior a 0,2 mm e no dia anterior a precipitação fosse maior que 2 mm, ou ainda;
- c) quando a chuva no dia anterior fosse superior a 10 mm, mesmo não tendo chovido no dia em estudo.

Utilizando técnicas climatológicas para determinar o teor de água diário do solo, Baier (1973), utilizou o critério de que o dia seria considerado trabalhável caso a umidade estimada do solo fosse inferior a 95% da capacidade de campo nas primeiras camadas do solo.

Simulando sistemas de produção de sorgo para sua otimização na obtenção de gás metano, Mehner et al., citados por Afféri (1992) designaram que um dia não era trafegável quando a precipitação era igual ou maior que um valor limite de 5,1 mm, sendo trafegável portanto, o dia com precipitação inferior a este valor.

Critérios para definição de dias apropriados para a operação de colheita em Concepción, no Chile, estabelecem que precipitações iguais ou superiores a 1 mm em um dia, ou maior ou igual a 6 mm no dia anterior, ou ainda, se a precipitação acumulada continuamente nos dias anteriores for superior a 30 mm, este dia era tido como não apropriado para colheita, devendo-se esperar dois dias após terminada a chuva para recomeçar a colheita (Hetz e Riquelme, 1989). Para o manejo do solo, incluindo preparo primário e secundário, semeadura e tráfego para aplicar fertilizantes ou pulverização, os mesmos autores consideraram como limite chuva de 2 mm no dia, 6 mm no dia anterior e, em caso de chuva contínuas superiores a 30 ou 300 mm exigem aguardar, respectivamente, 2 ou 4 dias após cessada a chuva. Para a validação do modelo, os dados estimados foram comparados com registros executados por um “observador qualificado” durante um período de

seis anos (Hetz, 1988).

Um aparelho portátil para determinar a facilidade de cultivo foi desenvolvido por Chandler e Stafford (1987). No teste proposto, um torrão representativo do solo é colocado no aparelho entre um cone e uma esfera, e o aparelho registra a força e o deslocamento para fraturar o torrão. Os autores concluíram que, com uma quantidade suficiente de informações, podem ser determinadas condições que indiquem a conveniência de utilização de determinado implemento para o cultivo.

O estudo climático da freqüência de dias aptos aos diversos trabalhos com máquinas agrícolas tem sido feito com base em dados meteorológicos históricos e apresenta grande importância para o planejamento, seleção e racionalização da mecanização de atividades agrícolas.

A expectativa de dias trabalháveis para quatro níveis de probabilidade foi determinada por Fulton & Ayres (1975), baseado em registros históricos das fazendas agrônômicas da Universidade de Iowa e da Universidade de Purdue, nos Estados Unidos da América. Os autores consideraram que, apesar de serem bastante úteis para o planejamento das culturas, estes dados são pouco disponíveis e os resultados são restritos para o local de observação.

Um modelo empírico para estimar dias trabalháveis para máquinas agrícolas com base nas condições agroclimáticas e do solo, foi desenvolvido por Rounsevell e Jones (1993) para grandes áreas em longos períodos (estações). Concluíram que o número de dias trabalháveis estimados é extremamente sensível a variações do tempo meteorológico e que o modelo apresenta limitações para aplicação fora das condições da Inglaterra.

Vários pesquisadores (Agendes & Mota, 1986; Assis, 1988; Assis et al., 1989; Babeir, 1984; Babeir et al., 1985; Baier, 1973; Dyer & Baier, 1979; Elliott et al., 1977; Fernandes, 1996; Flores et al., 1990; Frisby, 1970; Jones & Verma, 1971; Rounsevell & Jones, 1993; Sediya et al., 1979; Souza et al., 1992; Tulu et al., 1974; Von Bargen et al., 1986; Witney et al., 1982; Wösten & Bouma, 1985) têm utilizado modelos de estimativa do balanço de água no solo para avaliar o estado dinâmico de umidade e as condições de manejo do solo, utilizando diferentes dados e suposições, levando a variações



na precisão de suas estimativas. Portanto, estes modelos não são facilmente aplicáveis para condições de solo e clima diferentes daquelas para as quais foram desenvolvidos.

O balanço de água no solo contabiliza toda a movimentação de água no sistema solo-planta-atmosfera, podendo oferecer, em determinado instante, a quantidade de água disponível no perfil do solo, que pode ser representado pela equação:

$$U_i = U_{i-1} + P - ER$$

(1)

Em que,

$U_i$  = umidade do solo no final do dia  $i$ ;

$U_{i-1}$  = umidade do solo no final do dia  $i-1$ ;

$P$  = precipitação efetiva no período;

$ER$  = evapotranspiração real no período.

Para o cálculo do balanço de água no solo, há a necessidade de se eleger uma profundidade de interesse e, de posse das características físicas do solo, pode-se calcular a capacidade de armazenamento de água naquele perfil.

Em uma superfície totalmente coberta por vegetação baixa e uniforme, em fase de crescimento ativo e com teor de água no solo próximo da capacidade de campo, a quantidade de água transferida do sistema solo-planta para a atmosfera é denominada evapotranspiração potencial (EP) e seu valor depende das condições meteorológicas predominantes no local (Castro Neto, 1979). Na falta de uma ou mais das condições anteriores, a evapotranspiração é denominada real (ER), tendo a seguinte relação com a potencial:

$$ER = K_c \cdot EP$$

(2)

onde  $K_c$  é um coeficiente cujo valor varia de acordo com as condições da vegetação e da umidade do solo.

Existem várias equações para a estimativa do valor de EP com base nos dados meteorológicos disponíveis, assim como métodos para a determinação do valor do coeficiente de cultura  $K_c$  (Castro Neto & Soares, 1989a e Castro Neto & Soares, 1989b).

Quando a umidade do solo for superior à sua capacidade de armazenamento de água, considera-se que a umidade seja igual a esta capacidade e, o excesso, perdido por percolação profunda ou por escoamento superficial. Assim, a precipitação efetiva é a parte da precipitação total utilizada para satisfazer o armazenamento de água na camada considerada.

Havendo a disponibilidade de uma longa série de dados meteorológicos, é importante que se faça estudos climatológicos calculando-se o balanço de água no solo e classificando os dias como aptos e inaptos para as diversas atividades motomecanizadas, tipos de solo e atividades agrícolas de interesse.

A implementação de uma agricultura moderna, baseada em princípios conservacionistas, passa necessariamente pelo processo de adoção de novas tecnologias sustentadas em grande parte pelo uso intenso da motomecanização. Conseqüentemente, ocorre um grande aumento do tráfego de máquinas sobre o solo, originando uma série de alterações físicas, dentre as quais destaca-se o processo de compactação do solo como um dos mais importantes fatores limitantes ao aumento da produtividade das culturas exploradas.

## **4.2 Compactação**

Nas culturas anuais, a compactação do solo tem ocorrido em conseqüência da intensiva mobilização do solo sob condições inadequadas de umidade (Silva et al., apud Dias Junior et al., 1999). Nas pastagens, o pisoteio excessivo do gado tem sido a causa da compactação na camada superficial (Kondo, 1998). Já nas áreas reflorestadas, a compactação do solo ocorre principalmente durante as operações de colheita, por causa do tráfego das máquinas de corte, da extração e do escoamento da produção (Dias Junior et al., 1999; Fernandes, 1996).

O solo é um material poroso, cujo volume total é composto pelo volume de sólidos, constituído de compostos orgânicos e minerais, e pelo volume de poros, que é preenchido parcialmente com ar e com água. Quando o espaço poroso está totalmente preenchido por água, diz-se que o solo está saturado (Chancellor, 1977; Assis, 1988).

Na análise do comportamento real de um solo, há a necessidade de se levar em conta a proporção das fases componentes, bem como a distribuição dessas na massa do solo (Bueno & Vilar, apud Fernandes, 1996).

Em geral, preocupa-se apenas com a fertilidade química do solo, ou seja, com o teor adequado de nutrientes para o desenvolvimento das plantas. Mas, além da luz e do calor fornecidos pelo sol e dos nutrientes, as plantas necessitam também de água e ar para conduzir a uma boa colheita. Água e ar são os “fertilizantes físicos” do solo e sua disponibilidade, em quantidades adequadas, depende fundamentalmente da maneira como se trabalha o solo (Guia Rural, 1991).

O uso constante do solo, normalmente submetido a mecanização intensiva e a permanente lavagem das camadas superficiais, propiciando o arrastamento da argila para regiões mais profundas, pode levar à formação de uma camada mais endurecida, menos permeável que a porção superior. Esta camada é formada por uma concentração de argila que é compactada pela constante passagem de implementos, sobretudo arados e grades, numa mesma profundidade.

As zonas compactadas do solo são definidas por Marshall & Raney, apud Lanças (1996a), como sendo o resultado da deterioração da sua estrutura, tendo como principal consequência a diminuição da porosidade do solo nas camadas logo abaixo da profundidade de trabalho dos órgãos ativos das máquinas.

São descritos dois tipos de alterações nas camadas do solo: aquelas de origem genética que resultam da ação lenta e contínua dos processos pedogenéticos, formando horizontes de impedimento à penetração de raízes e água, denominadas adensamento; e aquelas resultantes de forças aplicadas ao solo, portanto de origem induzida, denominadas compactação (Raney et al., citados por Lanças, 1996a).

A compactação do solo ocorre devido a diminuição do volume total de poros ao ser submetido a pressões, principalmente pelo uso incorreto de implementos quanto à umidade do solo, visto que a parte sólida do solo é rígida e praticamente indeformável. Os poros mais afetados são aqueles de maior dimensão (acima de 50 mm), através dos quais o movimento de ar e

água são mais intensos e rápidos e, também, por onde o crescimento do sistema radicular se dá sem restrições (Camargo & Alleoni, 1997).

Segundo Seixas, apud Fernandes, 1996, a compactação pode ser definida como sendo a ação mecânica por meio da qual se impõe ao solo uma redução de seu índice de vazios, que é a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos. A mudança de relação das fases se deve principalmente à reorganização das partículas do solo quando este é submetido a uma força de compressão.

De acordo com Mantovani (1984), a exploração de duas ou mais culturas por ano, aliadas a cronogramas de trabalho de preparo do solo em tempo reduzido e com intensa movimentação de máquinas e implementos cada vez mais pesados, tem sido um fator importante para o aumento da compactação do solo e diminuição da produtividade agrícola em diversas regiões do Brasil. Taylor & Beltrame (1980) mostraram que as várzeas arrozeiras e os planaltos cultivados com soja no Rio Grande do Sul, sofrem as conseqüências da utilização intensiva de máquinas e implementos pesados operando, freqüentemente, em teor de água próximo ao ótimo para a máxima compactação do solo.

A compactação do solo agrícola é influenciada por diversos fatores, sendo muitos deles de difícil mensuração, visto que as propriedades físicas do solo variam também em função do tempo, sob a influência do clima, manejo do solo e crescimento da planta (Ohu et al., 1988).

A compactação do solo é um processo de densificação no qual a porosidade e a permeabilidade são reduzidas, a resistência é aumentada e são induzidas diversas modificações na estrutura e no comportamento do solo. O nível de compactação de um solo pode ser medido ou avaliado por diversas propriedades do solo, tais como a densidade, a porosidade, o índice de vazios e a distribuição do tamanho de poros. Pode também ser expresso em termos de um índice obtido pelo valor de certa propriedade em relação ao seu valor para um estado específico ou de referência. Problemas de compactação do solo, em vários níveis, são encontrados praticamente em todos os sistemas de produção agrícola do mundo, sendo mais pronunciados onde se adota mecanização intensiva em solos sujeitos a altos índices de chuva ou irrigação. Os benefícios econômicos

do controle dos problemas de compactação do solo não se resumem simplesmente no aumento da produtividade das culturas, apresentando implicações mais complexas. Soane & Van Ouwerkerk (1994), indicam que as conseqüências econômicas relacionadas ao tempo de maturação, produção comercializável, resistência a doenças, uniformidade do produto, composição (teor de açúcar ou proteína, por exemplo) podem ser muito mais importantes do que aqueles relacionados produção total. Posteriormente, os custos com o preparo do solo poderão ser reduzidos, uma vez que solos menos compactados exigem preparo menos profundo e menos intenso.

O problema da compactação em solos florestais difere dos solos agrícolas, devido às diferenças e naturezas da cultura, em particular ao peso e tamanho das plantas e ao ciclo cultural. As forças causadoras da compactação dos solos florestais ou agrícolas provém do uso de máquinas. A mecanização foi muito intensificada nas últimas décadas e, segundo Greacen & Sands, apud Fernandes (1996), a compactação de solos florestais na Austrália provém do contato pneu-solo nas operações de exploração e transporte. Afirmam também que a compactação de solos florestais traz um efeito a longo prazo e depende de uma interação de vários fatores tais como o clima, as propriedades químicas e físicas do solo, práticas de manejo e metodologia de exploração e transporte florestal.

Em geral, a reação do solo em decorrência do tráfego não é facilmente previsível, impossibilitando antever as conseqüências destas reações para as plantas. Fenner (1999), revisando a literatura sobre o assunto, encontrou que os danos causados ao solo pelo tráfego de veículos pode resultar em perda de crescimento da floresta e diminuição da regeneração natural, bem como prejudicar ou impedir o desenvolvimento de mudas e até provocar a morte de árvores adultas. Apesar das plantas possuírem mecanismos de compensação para equilibrar as deficiências provocadas pela deformação do solo, observou-se uma redução no comprimento das raízes e uma concentração de raízes nos locais com maior macroporosidade em solos deformados pelo tráfego de máquinas. Por outro lado, observou-se também um aumento na quantidade de fungos e de raízes mortas em solos com deficiência de aeração.

A compactação do solo ocasiona restrição ao

crescimento das raízes, restrição da aeração na zona do sistema radicular e restrição da drenagem (Johnson et al., citados por Al-Adawi & Reeder, 1996), a qual resulta em baixa difusão de gases, aumento das condições anaeróbias na zona do sistema radicular com conseqüentes perdas por desnitrificação.

Com a diminuição dos poros existe uma redução da disponibilidade de oxigênio, essencial à germinação das sementes e desenvolvimento radicular, prejudicando o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Um sintoma comum da falta de oxigênio nas raízes é o amarelecimento das folhas.

Um dos principais efeitos prejudiciais da compactação é o aumento da perda de solo por erosão. Trabalho realizado por Souza, citado por Lanças(1996a), mostra que a perda de solo em áreas com presença de camadas compactadas pode chegar até a 90 t/ha em um ano com períodos de fortes chuvas.

Nos solos compactados, a água das chuvas tem dificuldade de se infiltrar e por isso escorre sobre a superfície com maior intensidade, levando consigo grande quantidade de partículas de solo. Quando há a presença de camadas compactadas em subsuperfície, esse solo se satura rapidamente e a água, sem ter como atravessar essa camada compactada, acaba escorrendo como no caso anterior.

Ao verificar a resposta do solo ao tráfego de uma carreta graneleira de um eixo, com 15,2 toneladas de peso total e ao preparo do solo antes e após este tráfego, Wood et al. (1993) verificaram que: a) sem preparo do solo antes do tráfego, quatro passagens da carreta provocaram um decréscimo da porosidade e permeabilidade ao ar em mais de 50% nas profundidades de 20 e 40 cm, comparando-se com o efeito de apenas uma passagem da carreta; b) em solo escarificado a uma profundidade de 20 cm antes do tráfego, a maior parte da compactação na profundidade de 10 e 20 cm ocorreu na primeira passagem da carreta; c) quatro passagens da carreta acarretaram maior efeito nas propriedades do solo não preparado em comparação com solo escarificado antes do tráfego da carreta.

Estudando tráfego controlado em solos da Amazônia, Fenner, apud Fenner (1999), comprovou que a maior parte das deformações físicas do solo ocorre após a primeira passagem da máquina. Schuler & Wood,

citados por Al-Adawi & Reeder (1996), resumem que as forças de compactação promovem seus primeiros impactos nas propriedades físicas como resistência, densidade, porosidade e tamanho de poros do solo.

A compactação aumenta a densidade e a resistência mecânica do solo e diminui a porosidade total, o tamanho e a continuidade dos poros. Reduções significativas ocorrem principalmente no volume dos macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados (Dias Junior & Pierce, 1995)

Toda a água, e os nutrientes a ela associados, são absorvidos pela planta essencialmente pela raiz e, principalmente, através dos pelos absorventes. A coifa (Figura 1) consiste em células não diferenciadas contendo, freqüentemente, amido; as paredes celulares são, muitas vezes, mucilaginosas em consistência, o que facilita o deslizamento das raízes no solo. Em seguida à coifa, vem a região meristemática, cujas células permanecem no estado embrionário, mantendo assim a capacidade de se dividirem. A zona de alongação celular empurra a coifa, promovendo o crescimento radicular (Klar, 1984).

Estudando a influência da compactação no desenvolvimento do sistema radicular, Wiersum, citado por Camargo & Alleoni (1997), verificou que a raiz necessita forçar sua passagem através do espaço poroso exercendo pressão sobre o poro, de tal forma que, se a pressão que a raiz pode exercer para aumentar a dimensão ou criar novos poros é menor que a força que o solo exerce sobre ela, então haverá uma diminuição do sistema radicular e, conseqüentemente, o crescimento e desenvolvimento da planta fica prejudicado.

Segundo Camargo e Alleoni (1997), a pressão de crescimento radicular (PCR), é definida como sendo:

$$PCR=(SF_{tc} - SF_{pc})/A$$

(3)

onde,

SF<sub>tc</sub> = somatório das forças longitudinais na raiz resultantes da pressão de turgor celular.

SF<sub>pc</sub> = somatório das forças das paredes celulares à alongação

A = área da raiz no plano que a força é determinada.

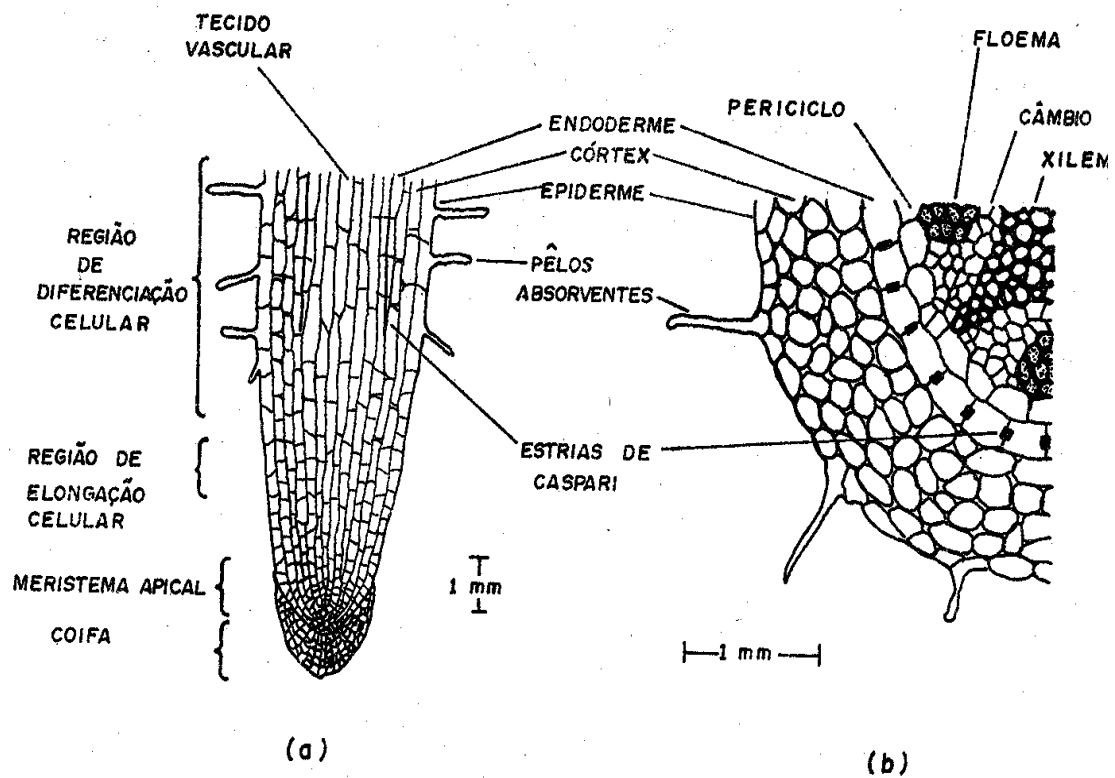


Figura 1: Corte esquemático longitudinal (a) e transversal (b) de uma raiz (Klar, 1984)

Assim, para que haja penetração da raiz em um meio sólido, é necessário que  $SF_{tc}$  seja superior a  $SF_{pc}$  (Figura 2). Entretanto, existem outros determinantes de maior importância que influenciam na alongação radicular, dentre os quais se destacam o adensamento e a compactação do solo.

As modificações estruturais do solo decorrentes da compactação são responsáveis por alteração do sistema radicular, sendo que



a redução no crescimento das raízes é a resposta mais comum das plantas à compactação do solo (Carrow, 1980).

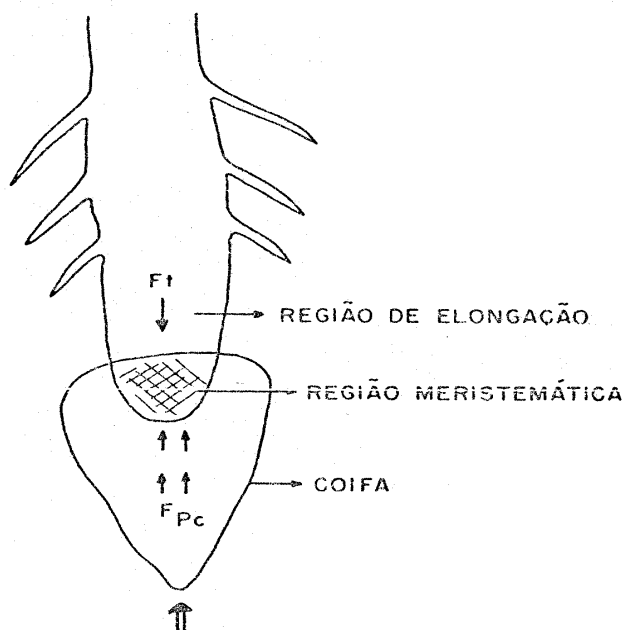


Figura 2: Esquema de uma raiz mostrando a região de alongação e o sentido das forças longitudinais ( $F_t$ ) e de resistência das paredes celulares à alongação ( $F_{pc}$ ), segundo Camargo e Alleoni (1997).

O aumento da densidade do solo, com conseqüente diminuição da porosidade, em virtude do grande número de operações secundárias e o excessivo tráfego de máquinas, é um dos fatores que contribuem para a redução do crescimento das plantas e desenvolvimento das raízes (Dumas et. al., 1973; Mulligan et al., 1985; Hadas et al., 1985).

Os estudos de Lipiec et al. (1991), comprovaram que o aumento do nível de compactação resultou em maior resistência mecânica à penetração das raízes no solo, menores flutuações da temperatura diária e grande acúmulo de raízes na camada superficial do solo.

Para que as plantas de milho utilizem totalmente a água

do solo, é necessário que tenham um sistema radicular da ordem de 1,5 a 2,0 cm de raízes por cm<sup>3</sup> de solo. Esta cultura pode produzir uma quantidade de raízes muitas vezes maior, caso o solo não esteja compactado próximo à superfície (Das, citado por Chancellor, 1977).

Após compactar uniformemente amostras de Latossolo Roxo e de Terra Roxa Estruturada até as densidades de 1,23 e 1,30 g/cm<sup>3</sup>, Moraes (1988) constatou nesses níveis de compactação impedimento de penetração e de desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja. Segundo Fernandes (1979), de um modo geral, o sistema radicular da cana-de-açúcar não encontra obstáculos para se desenvolver em solos com densidades de até 1,20 g/cm<sup>3</sup>, e acima desse valor as raízes passam a ter o seu desempenho prejudicado, e sob densidades superiores a 1,45 g/cm<sup>3</sup> as raízes não encontram condições para suprir satisfatoriamente a parte aérea da planta com nutrientes.

Em relação à sensibilidade à compactação do solo em condições de casa de vegetação, árvores de *Eucalyptus grandis* tiveram o crescimento de raízes inibido quando a densidade do solo apresentou valores na faixa de 1,25 a 1,35 g/cm<sup>3</sup> (Borges, 1986). Jussof, apud Fernandes (1996), em trabalho semelhante, afirma que árvores de *Eucalyptus grandis* tiveram o crescimento das raízes inibido quando os valores da densidade do solo superaram 1,25 g/cm<sup>3</sup>. Com relação às árvores de *Pinus taeda*, elas não conseguiram penetrar suas raízes em solos que apresentavam a densidade do solo acima de 1,30 g/cm<sup>3</sup>.

Estudando o efeito da compactação do solo e do déficit hídrico no comportamento do sistema radicular de mudas de *Eucalyptus grandis*, Guerra et al. (1999) concluíram que, na ausência de déficit hídrico, não houve efeito do nível de compactação ou da profundidade desta na massa de raízes produzidas, indicando que a compactação do solo somente afeta o crescimento de raízes quando existe restrição de água para as plantas.

O comportamento do sistema radicular em solos compactados varia com as espécies vegetais, sendo que Cintra & Mielniczuk (1983), observaram o potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos compactados, concluindo que a colza e o tremoço, pela maior capacidade de penetração da raiz pivotante, revelaram-se promissoras

na recuperação de solos com esse problema.

A disponibilidade de nutrientes para as plantas é também afetada pela compactação do solo, já que os mecanismos de fluxo de massa e difusão, responsáveis pelo transporte de nutrientes até as raízes, são processos dependentes da estrutura do solo. Ribeiro et al., citados por Borges (1986) observaram efeito detrimental na absorção de fósforo pelas plantas de soja, à medida que aumentou a densidade do solo, não obtendo resposta a doses de fósforo na densidade de  $1,30 \text{ g/cm}^3$ . Já Gávande, citado por Borges (1986) relata que a deficiência nutricional em solos compactados pode ser consequência da transformação de um nutriente em outra forma ou produto não absorvido pelas plantas.

De acordo com Voorhees (1992), sob condições de clima frio, onde os solos têm um alto teor de matéria orgânica e uma estrutura mais estável, não são observadas restrições ao sistema radicular em condições de campo, assim como normalmente, não são relacionadas respostas de produtividade de culturas a restrições de crescimento do sistema radicular.

Por outro lado, Miller et al., citados por Voorhees (1992), cultivaram milho em sistema hidropônico em vasos instalados no campo ao lado de plantas cultivadas ao solo, encontrando que o milho cultivado em solo produziu apenas 75 a 85% da matéria seca acumulada pelas plantas cultivadas hidroponicamente, indicando que o solo, em geral, apresenta algum grau de restrição física ao crescimento e à atividade do sistema radicular das culturas.

A emergência das plantas é afetada pela resistência mecânica do solo à penetração da plântula e pela restrição à difusão de oxigênio na zona da semente. A consistência do solo e a resistência à penetração são afetadas direta e indiretamente pela compactação do solo. Morton & Bucheli (1960), simularam a emergência de uma plântula pressionando no sentido ascendente um micropenetrômetro com diâmetro de aproximadamente 2 mm através da superfície de um solo compactado a diferentes pressões. Seus resultados indicaram que a compactação do solo pode aumentar diretamente o impedimento mecânico encontrado pelas plântulas em emergência.

A compactação do solo reduz a aeração, causando redução e retardamento da germinação de sementes de várias espécies

vegetais. Hanks & Thorp, citados por Chancellor (1977) mostraram que, para trigo plantado em bandejas com três solos com várias densidades e teores de água, a emergência foi reduzida para altos níveis de compactação. Este efeito pode ser resumido em um único fator, o nível de difusão de oxigênio, o qual é afetado pela densidade e umidade do solo. À medida que o nível de difusão de oxigênio caiu abaixo de aproximadamente  $80 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$ , houve uma queda brusca da percentagem de emergência.

Foi demonstrado por Flocker et al., citados por Chancellor (1977), que ocorreu um atraso na emergência e uma redução na germinação do tomateiro semeado em vasos com níveis altos de compactação e baixos de porosidade total do solo.

O maior interesse a respeito da compactação do solo sob o ponto de vista do agricultor é o seu efeito na produção das culturas. Como este parâmetro é muito influenciado pelas condições meteorológicas, o efeito da compactação na produtividade se torna de difícil observação.

A compactação do solo pode ter efeitos benéficos ou adversos. Efeitos benéficos têm sido atribuídos à melhoria do contato solo-semente e ao aumento da disponibilidade de água em anos secos (Camargo & Alleoni, 1997). Entretanto, a compactação excessiva pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular, resultando em decréscimo da produção, aumento da erosão e da potência necessária para o preparo do solo (Dias Junior & Pierce, 1995).

O tráfego de máquinas provoca a diminuição na percentagem de poros e um aumento da densidade do solo, conforme afirma Gabriel Filho (1993), o que afeta a produção de madeira nas principais áreas de reflorestamento, em especial na cultura do eucalipto. Este mesmo autor, avaliando o crescimento de plantas de eucalipto cultivadas em vasos, concluiu serem verdadeiras as afirmativas acima.

A altura, diâmetro e fator de forma das árvores de *Pinus radiata* que cresciam ao lado da trilha de exploração foi inferior às árvores do interior do plantio (Firth e Murphy, 1989). Eles observaram que as árvores ao lado da trilha foram em média, 1 m menores em altura, 2 cm menores em diâmetro à altura do peito (DAP) e 33% menores em volume. Os autores

atribuíram estas diferenças ao tráfego intenso e pesado nas trilhas de exploração.

Estudando as relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita de madeira, Fenner (1999), concluiu, entre outras, que: o teor de água durante o tráfego tem efeito significativo sobre as deformações físicas do solo; a primeira passagem da máquina causou a maior parte da deformação da superfície do solo; a profundidade da camada compactada de solo não influenciou no crescimento em altura das plantas de *Eucalyptus grandis*; o principal fator limitante do crescimento em altura das mudas foi a disponibilidade de água; e que a massa aérea foi o bio-indicador mais afetado pela disponibilidade de água, seguida do diâmetro do colo e altura da planta.

O efeito da compactação provocada por uma carreta graneleira de um eixo com os tratamentos de 0, 9 e 18 toneladas de peso total, na produção de milho, soja e aveia foi investigado por Lal & Tanaka, citados por Al-Adawi & Reeder (1996). Metade das parcelas recebeu subsolagem após a passagem da carreta. Concluiu-se que a produção das culturas não foi afetada significativamente por qualquer das condições. Densidade do solo, velocidade de infiltração e resistência à penetração medidas após a colheita também não foram afetadas pelos tratamentos, resultados estes que estão de acordo com aqueles encontrados por Moraes & Benez (1996).

Estudando o efeito do tráfego de um trator com peso de 8,5 toneladas em quatro tratamentos de compactação: 1- sem tráfego do trator; 2- com tráfego nas entrelinhas; 3- com tráfego nas linhas; e 4- com tráfego na área toda, Ngunjiri & Siemens, citados por Al-Adawi & Reeder (1996), concluíram que a produção de milho com tráfego na área toda foi significativamente menor que a produção nos demais tratamentos.

Resposta positiva na produtividade de soja e milho ao tráfego de equipamentos foi encontrada por Bicki & Siemens (1991) quando a precipitação pluviométrica foi limitante, e negativa quando a precipitação ocorreu em nível adequado.

Solos compactados podem se recuperar naturalmente se as forças de compactação deixarem de ser aplicadas. A recuperação natural é um processo lento e depende da localização geográfica. Operações de

preparo e manejo dos fatores que influenciam a compactação podem acelerar a recuperação (Al-Adawi & Reeder, 1996). São considerados fatores atenuadores da compactação do solo o umedecimento e secagem, congelamento e descongelamento, atividades biológica e preparo do solo.

Segundo diversos autores citados por Fernandes (1996), a susceptibilidade à compactação depende diretamente do teor de matéria orgânica contido no solo. Incrementos de matéria orgânica em solos arenosos reduzem a densidade e a compactação do solo, além de aumentar a capacidade de retenção de água e a condutividade hidráulica.

Tráfego de precisão é um sistema de espaçar todo o conjunto de rodados para atuar entre as linhas, minimizando o número de trilhas, e plantar na mesma posição destas linhas todos os anos. Assim, as zonas de tráfego serão separadas das zonas cultivadas no campo. Esta prática geralmente aumenta a produtividade e aumenta o rendimento do trabalho de campo. Os caminhos firmemente compactados melhoram a tração e mobilidade das máquinas. O tráfego de precisão traz vantagens com relação a compactação, mas não a elimina (Al-Adawi & Reeder, 1996; Chancellor, 1977).

As propriedades físicas do solo de uma propriedade rural onde foi utilizado o tráfego controlado por sete anos foram medidas por Wood et al. (1993). Verificaram que, mantendo áreas separadas para o tráfego das máquinas, a zona das culturas apresentou menor densidade e maior porosidade e permeabilidade ao ar, beneficiando as plantas em comparação com as linhas de tráfego.

A subsolagem, afirmam Schuler & Wood, citados por Al-Adawi & Reeder (1996), deve ser utilizada para remover uma camada compactada se a produção estiver sendo limitada pela compactação. Recomendam ainda subsolar somente quando o teor de água for baixo o suficiente para que o solo seja fraturado adequadamente e subsolar a uma profundidade pouco maior que a camada de compactação.

Cinco tipos de subsoladores foram avaliados por Reeder et al. (1993), operando a uma profundidade de 0,30 m em uma área compactada de 25 ha, medindo as propriedades físicas e a produção nas duas próximas estações de crescimento. Porosidade ao ar e índice de cone mostraram benefício contínuo, para qualquer dos escarificadores, dois anos

após a subsolagem em áreas que não receberam tráfego de máquinas. Por outro lado, duas passadas de um trator recompactaram o solo a uma densidade maior que aquela existente antes da subsolagem. A utilização da técnica de tráfego de precisão deve, portanto, ser considerada para manter o benefício da subsolagem por longo tempo.

- De acordo com Peche Filho & Coelho (1990), a mecanização em latossolos deve atender algumas exigências, como a seguir:
- Se for detectada a camada compactada “pé de grade” ou “pé de arado” na subsuperfície, deve-se imediatamente realizar um preparo que venha rompê-lo, eliminando o problema. A escolha do implemento para realizar essa tarefa dependerá da profundidade em que se encontra a camada compactada. Se estiver na faixa de 15 a 20 cm, o arado de aivecas resolve, bastando que seja feita a regulagem adequada, aprofundando o implemento ao máximo. Se o agricultor for usuário da tração animal recomenda-se o uso de um arado tipo “Oliver” pesado, geralmente esse implemento é conhecido como “arado de bois” .
  - Se a camada estiver localizada na faixa de 20 a 30 cm recomenda-se o uso do escarificador; esse implemento apresenta características de não inverter o solo mas sim torná-lo solto, quebrando sua estrutura sem alterar seus agregados, deixando que resíduos orgânicos fiquem na superfície protegendo o solo contra a erosão. Independente de se utilizar esse implemento para a quebra do “pé-de-grade” ou “pé-de-arado”, o preparo do solo usando escarificador pode ser indicado como alternativa ao preparo convencional com o uso de grade aradora. Têm-se à disposição no mercado escarificadores adequados para todos os tipos de tratores e também para tração animal.
  - Quando a camada compactada estiver localizada abaixo de 30 cm de profundidade o implemento indicado é o subsolador, que é mais robusto que o escarificador e necessita de maior potência para tração, porém trabalha a profundidades maiores.

Existe a tendência de se utilizar equipamentos maiores e mais pesados sob o controle de um único operador, os quais exercem maior pressão no solo. Deve-se, portanto, evitar a concentração de peso em pequenas áreas para minimizar a compactação, o que pode ser conseguido

pelo uso de rodados duplos ou triplos, pneus largos e tração em todas as rodas. O aumento da velocidade de trabalho e a utilização de implementos que transmitem força ao conjunto, como enxada rotativa e subsolador equipado com vibrador, também tendem a exercer menor pressão no solo (Chancellor, 1977). O uso de pneus radiais com pressão baixa correta vem sendo descrito como um importante auxiliar na diminuição da pressão de compactação do solo (Lanças & Upadhyaya, 1997).

### **4.3 Índice de cone**

A compactação é melhor determinada utilizando-se da densidade do solo, mas é a porosidade que se constitui no termo de maior significado para se usar na discussão de compactação do solo, por descrever diretamente a proporção de volume do solo disponível para as raízes das plantas, a água e o ar que elas requerem (Mantovani, 1984).

Os métodos para avaliação da camada compactada do solo podem ser divididos, de acordo com Lanças (1996a) e com Mantovani (1984), em três grupos principais:

#### **a) Métodos visuais, subjetivos ou grosseiros**

Neste grupo, os principais sinais que indicam o efeito da compactação são:

- demora de emergência das plantas;
- plantas mais baixas que o normal;
- folhas com coloração não-característica;
- sintomas de deficiência nutricional em solos bem adubados;
- sistema radicular raso, espalhado e pouco desenvolvido;
- formação de crosta na superfície do solo;
- zona compactada de superfície;
- água empoçada;
- erosão excessiva pela água;
- aparecimento de sulcos de erosão;
- surgimento de fendas na superfície do solo ou nos rastros dos tratores;
- aumento de requerimento de potência para o preparo do solo;
- aumento da "dificuldade" de penetração de um objeto pontiagudo ao longo



do perfil do solo;

- aumento do esforço necessário para a penetração de um trado.

## **b) Métodos precisos**

Os métodos utilizados envolvem análises de laboratório que, na maioria, foram descritas por Kiehl, citado por Lanças (1996a):

- densidade do solo;
- percentagem de macroporos;

## **c) Métodos intermediários**

Nestes métodos estão os indicadores secundários da compactação do solo:

- taxa de difusão de oxigênio;
- condutividade hidráulica saturada;
- resistência à penetração.

Os penetrômetros de cone tem sido uma importante ferramenta para a medição da resistência do solo por várias décadas (Perumpral, 1987).

A resistência oferecida pelo solo à inserção de uma haste é uma maneira rápida e fácil de medir a resistência à penetração a várias profundidades.

Historicamente, Gasparini, em 1840 (Billot, apud Vieira & Dias, 1997), propôs a utilização de uma pá dinamométrica com peso de 2,7 kg que, caindo de uma altura de 1,0 m, afundava no solo. Em função da penetração, podia-se avaliar a tenacidade do solo segundo critérios preestabelecidos.

Devido à dificuldade de penetração da pá em solos pedregosos, a mesma era substituída por uma “forca” com três pontas moderadamente afiadas.

Na década de 1930 foram utilizados penetrômetros com cones de 90° para determinar a resistência à penetração como uma função da profundidade e da resistência de argilas (Perumpral, 1987). No mesmo período, a rede ferroviária dinamarquesa desenvolveu um penetrômetro de bolso com ponteira cônica para estimar a coesão do solo e determinar a capacidade de suporte de carga.

À medida que o instrumento se tornou popular, surgiram

várias versões de penetrômetros de cone de operação manual ou mecanizada (Schmertmann, citado por Perumpral, 1987). A grande variedade de penetrômetros e de procedimentos de ensaio resultaram em grande variação nos dados coletados, dificultando a interpretação correta dos mesmos. Esta inconsistência, tanto nos penetrômetros como dos procedimentos de ensaio, levaram à necessidade de padronização dos mesmos.

Considerando a simplicidade envolvida na construção e no uso dos penetrômetros para avaliação das propriedades do solo, o exército dos Estados Unidos da América, através da WES (Waterways Experimental Station), instalado no Estado do Mississippi, desenvolveu, em 1948, um penetrômetro de cone para a previsão de condições de trafegabilidade dos veículos militares. Este penetrômetro era operado manualmente com penetração até a profundidade de 0,15 m. A partir daí, o penetrômetro de cone da WES e suas versões modificadas tem sido utilizados para uma série de outras aplicações (Vieira e Dias, 1997).

Avaliando a trafegabilidade para fins militares em 1955, Molineus (apud Vieira & Dias, 1997), menciona um penetrômetro aéreo, tipo bengala, que foi aplicado no traçado de mapas de orientação para o deslocamento seguro de veículos militares de combate. A profundidade de penetração depende da velocidade de queda e da consistência do solo, relacionados com a resistência do solo para um valor preestabelecido de resistência à penetração. Lançados de um avião sobrevoando a área de interesse, o impacto provocava o disparo da bengala correspondente à resistência, liberando uma bandeira com a cor correspondente. Do próprio avião, anotava-se ou fotografava-se as cores de impacto, avaliando-se a trafegabilidade na área.

A resistência à penetração é um indicador intermediário da compactação (Lanças, 1996a), não sendo uma medição física direta das condições do solo, uma vez que seu valor é variável em função de outros fatores, principalmente do teor de água e do tipo de solo.

Porém, apesar das limitações, a resistência à penetração é freqüentemente usada para a indicação comparativa da compactação em solos de mesmo tipo e mesmo teor de água, devido à facilidade, rapidez e baixo custo com que numerosas medidas podem ser realizadas e,

posteriormente, analisadas. Além disso, o penetrômetro se constitui em uma boa ferramenta para investigar solos arenosos, nos quais a obtenção de amostras indeformadas se constitui em uma tarefa muito difícil.

A ASAE (1999b) define índice de cone como sendo a força por unidade de área da base, necessária para empurrar o penetrômetro no solo, durante um pequeno deslocamento da ponta cônica, e determina que o início da leitura seja feito no instante em que a base do cone seja introduzida numa velocidade de penetração constante de 30 mm/s. São padronizados também os métodos para o planejamento, uso e obtenção de relatório de dados, assim como a construção do penetrômetro de cone padrão (ASAE, 1999c).

Para a medição da resistência à penetração, são utilizados os penetrômetros e os penetrógrafos, cujo funcionamento é baseado na medição da força requerida para introduzir um cone metálico no solo. Quando se utiliza um cone pontiagudo e com diâmetro relativamente pequeno, a força necessária pode ser suprida manualmente (Koolen & Kuipers, 1983). A Figura 3 mostra um penetrômetro manual na forma padronizada pela ASAE (1999c). Outros penetrômetros são instrumentados com a finalidade de registrar a relação força/profundidade continuamente ou de forma digital.

Índice de cone era definido originalmente como a resistência média à penetração para os primeiros 150 mm de solo, porém, o termo tem sido estendido de forma a incluir valores de resistência à penetração a qualquer profundidade (ASAE, 1999b). Os valores podem ser relatados como índice de cone ( $X$  Mpa) à profundidade ( $Y$  m), abreviado como  $IC_Y$ , ou índice de cone de ( $X$  Mpa) na profundidade de ( $Y$  até  $Z$  m), abreviando-se neste caso como  $IC_{Y-Z}$ , indicando sempre a dimensão da base do cone utilizado.

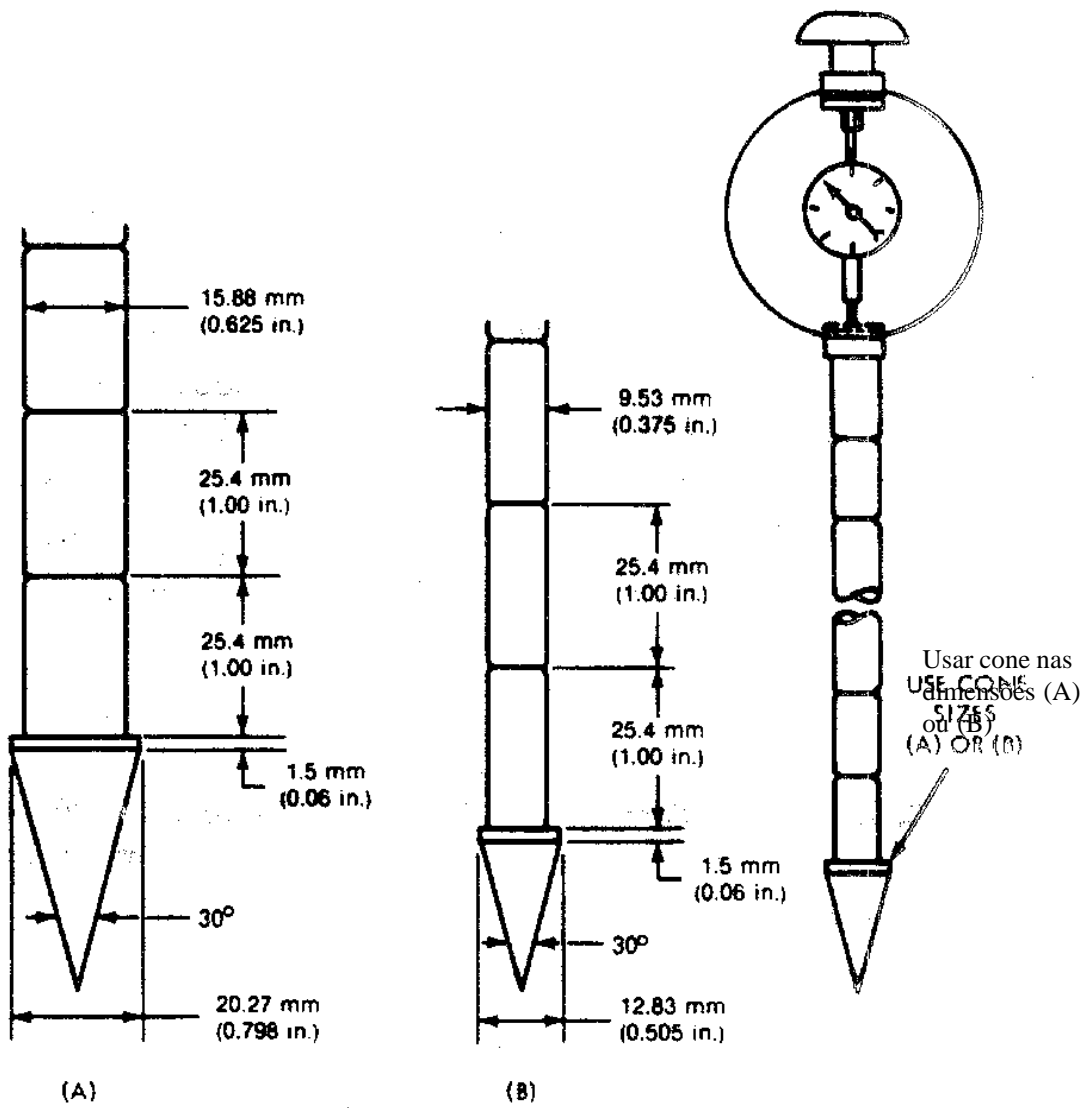


Figura 3: Dimensões normalizadas para penetrômetros de cone (ASAE, 1999c)

Com a utilização dos recursos de geoestatística, pode-se estudar a distribuição espacial e temporal da resistência do solo à penetração, possibilitando a geração de mapas de solo necessários para a utilização em agricultura de precisão (Castro Neto et al., 1999a; Castro Neto et al., 1999b; Castro Neto et al., 1999c; Lanças et al., 2000a; Lanças et al., 2000b; Pereira et al., 2000; Sverzut et al., 2000).

Conforme Chancellor (1977), a resistência à penetração pode ser obtida facilmente a diversas profundidades, porém, para que os dados possam ser comparados, o teor de água deverá ser o mesmo em todos os níveis de profundidade. Assim, o período de início das chuvas ou após a primeira maior irrigação, justamente quando o solo atingiu o teor de água na capacidade de campo, é o melhor momento para medições de penetrometria.

Esta afirmação parece ser válida pelo fato de que a maioria dos penetrômetros atualmente utilizados sejam de operação manual (Silva Junior et al., 2000), porém, estudos mais recentes mostram que os efeitos da compactação do solo na resistência à penetração são melhor visualizados a menores teores de água (Guerra et al., 2000). A utilização de penetrômetros manuais em baixos teores de água no solo se torna impraticável, uma vez que o operador terá dificuldade em manter a velocidade de penetração constante (ASAE, 1999c), e, na maioria das vezes, não terá condições físicas de aplicar a força necessária para empurrar o penetrômetro no solo. Estes problemas serão totalmente eliminados quando se utiliza penetrômetros de acionamento hidráulico ou mecânico.

Não foram encontrados bons resultados por Upadhyaya et al. (1995) ao utilizar modelos de previsão da compactação pela interação entre a tração por rodados pneumáticos e o solo baseados no índice de cone, afirmando ser possível que os modelos baseados no índice de cone apresentem melhor comportamento para a condição de solos soltos.

Com base nestes resultados, espera-se que a utilização de valores de índice de cone coletados em solos com baixos teores de água apresentem resultados mais coerentes do que aqueles coletados com teores de água próximos da capacidade de campo, como sempre se recomendou.

Foi construído por Santos (1998) um penetrômetro de acionamento hidráulico-eletrônico montado sobre uma carreta rodoviária

tracionável por um carro de passeio, facilitando assim a transporte do equipamento. No campo, a carreta é adaptada à barra de tração de um trator e a energia necessária para cravar a haste no solo é obtida do sistema hidráulico (controle remoto) do próprio trator. A velocidade de deslocamento da haste é regulada a 30 mm/s independentemente da resistência do solo (ASAE, 1999c) por meio de uma válvula reguladora de vazão instalada no circuito hidráulico. Utiliza-se como sensores de profundidade e de carga respectivamente um potenciômetro e uma célula de carga, sendo os dados armazenados automaticamente em um sistema eletrônico de aquisição de dados.

O penetrômetro de acionamento hidráulico-eletrônico foi utilizado com sucesso para o estudo de índices de cone na linha e na entrelinha da cultura da soja (Nagaoka et al., 1999) e antes e após a colheita mecanizada da cultura da soja (Castro Neto et al., 1999d) cultivada em diferentes sistemas de manejo do solo.

Foi instalado no mesmo equipamento um sistema de posicionamento global diferencial, DGPS, (Castro Neto et al., 1999c; Lanças et al., 1999) e foi desenvolvido um sistema de processamento de dados (Castro Neto et al., 1999a; Castro Neto et al., 1999b) com a finalidade de elaboração de mapas de iso-resistência à penetração, aplicando a metodologia em áreas de reforma da cultura da cana-de-açúcar, obtendo-se resultados promissores para o monitoramento da compactação de solos agrícolas em pequenas ou grandes áreas.

O índice de cone de 2,0 MPa foi considerado impeditivo para o crescimento de raízes no solo por Tormena e Roloff, citados por Souza & Alves (2000), sendo que, conforme os mesmos autores, a literatura indica que um índice de cone abaixo deste valor já é prejudicial para o desenvolvimento de raízes no solo. Deve-se lembrar que os valores de índice de cone sem a informação do tipo de solo e do teor de água no qual a determinação tenha sido realizada não são passíveis de comparação.

Testando diversas equações de correção do índice de cone para diferenças no teor de água no solo, Busscher et al. (1997) encontraram coeficientes de determinação variando entre 0,55 e 0,92 para as diversas condições experimentais. Os autores realizaram amostragens para determinação do teor de água no solo a cada 10 cm e determinaram a

resistência à penetração com equipamento de acionamento manual a profundidade de 55 cm, porém, utilizaram apenas os dados a partir de 25 cm em profundidade. Para a elaboração das equações, utilizaram como condição de escolha as equações que apresentavam índices de cone próximos de zero para teores de água próximo à saturação e, para solos muito secos, valores que consideraram muito elevados (10 MPa), escolhendo aquelas que apresentavam maior simplicidade. Concluíram que os resultados não levaram a uma boa correção para todos os casos, porém, observando-se as limitações e condições impostas ao ensaio e ao fato de terem utilizado penetrômetro de acionamento manual, pode-se sugerir que este tipo de pesquisa seja repetido em outras condições de solo e com metodologia mais adequada.

#### **4.4 Pressão de preconsolidação**

As pressões atuantes na superfície do solo, a distribuição destas pressões no solo e a deformação do mesmo são geradas pela utilização de máquinas e ferramentas agrícolas. O solo responde especialmente pela mudança do volume ocupado por determinada massa de solo, ou seja, pela sua densidade e porosidade.

Uma das relações mais úteis e diretas entre a pressão no solo e a densidade envolve a relação entre a porosidade ou a densidade de um solo a um dado teor de água e a maior pressão a que o solo foi submetido (Soehne, 1958). Para a maioria dos solos, a mudança na porosidade é diretamente proporcional ao logaritmo da pressão aplicada (Chancellor, 1977).

A Figura 4 mostra a curva de compressão do solo em função da porosidade ou densidade do solo e da pressão aplicada por um pistão em uma amostra de solo acomodada em um cilindro. Para solos inicialmente destorroados (linhas contínuas), as deformações não recuperáveis iniciam a uma pressão menor do que para uma amostra compactada (linha tracejada). Neste caso, as deformações não recuperáveis só iniciam após a pressão aplicada exceder a pressão com a qual a amostra foi anteriormente compactada. Quando esta pressão é ultrapassada, o solo pré-compactado reage da mesma forma que aquele que foi ensaiado desde a condição inicial de solo destorroadado.

Para solos secos, a porosidade continua a decrescer com o aumento da pressão aplicada. Porém, para solos muito úmidos, uma vez perdido todo o espaço ocupado com ar, restarão apenas poros ocupados com água, e a porosidade não mais decrescerá com o aumento da pressão aplicada em períodos curtos devido ao fato da água drenar mais lentamente através dos poros. Aumentos no teor de água provocam um aumento na proporção de poros preenchidos com água, fazendo com que a porosidade na qual a compactação cessa seja maior para solos mais úmidos (Figura 4). Se nem todos os poros estiverem preenchidos com água, para a mesma pressão aplicada, um solo mais úmido compacta a uma porosidade menor (ou densidade maior) que um solo mais seco, ou seja, um solo úmido não saturado tem menor resistência à compactação que um solo seco.



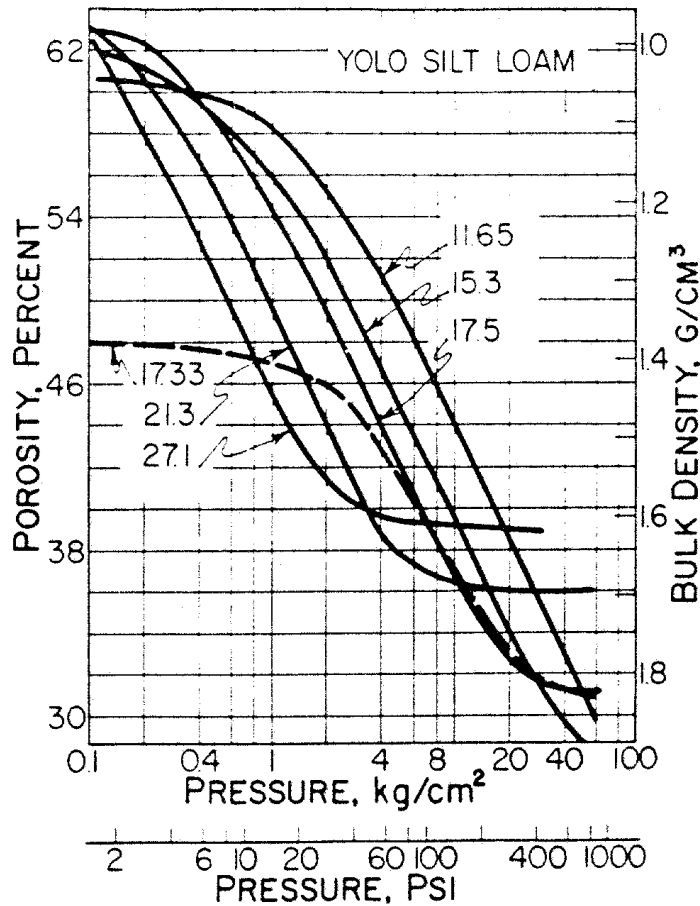


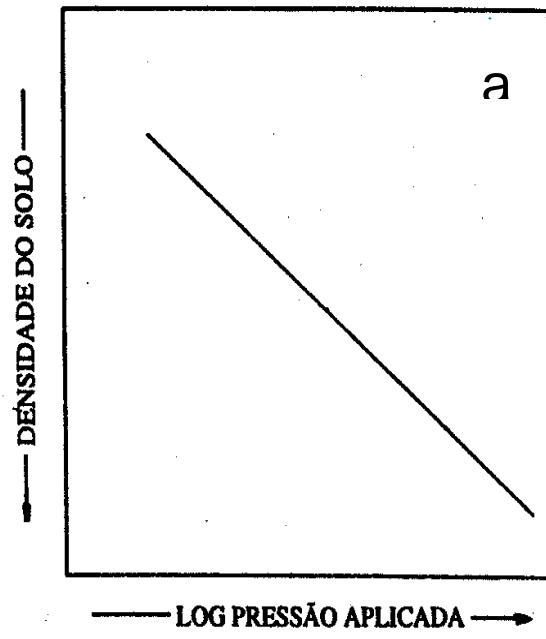
Figura 4: Relação semi-logarítmica entre a pressão aplicada e a porosidade/densidade do solo. A linha tracejada representa o ensaio realizado em uma amostra indeformada de solo previamente compactado no campo pela ação de condições de trabalho e as linhas contínuas representam o ensaio realizado com amostras deformadas, segundo Chancellor (1977).

Segundo Holtz e Kovacs (1981), o solo possui uma “memória” das pressões e outras modificações a que tenha sido submetido ao longo de sua história, sendo estas informações preservadas por milhares de

anos (Cetin, 2000).

De acordo com Dias Junior & Pierce (1996), a curva de compressão do solo tem sido usada como base comum para modelar, por diversas metodologias, a suscetibilidade do solo à compactação. A curva de compressão do solo representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e algum parâmetro relacionado com o arranjo de partículas e/ou agregados do solo como, por exemplo, o índice de vazios ou a densidade do solo. No estudo da compressibilidade dos solos agrícolas, tem-se usado mais freqüentemente a densidade do solo do que o índice de vazios (Dias Junior, 2000).

Quando o solo não sofreu nenhuma pressão prévia, sua curva de compressão é linear (Figura 5a); entretanto, quando o solo já experimentou pressões prévias ou ciclos de secagem e umedecimento, a variação das pressões atuando sobre o solo determinará a formação de duas regiões distintas na curva de compressão (Figura 5b): a curva de compressão secundária - que representa os níveis de pressão experimentados pelo solo no passado, de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis - e a reta de compressão virgem - que representa as primeiras pressões aplicadas ao solo, de deformações plásticas e não recuperáveis- (Chancellor, 1977; Holtz e Kovacs, 1981; Reinert, 1990; Macedo, 1993; Carpenedo, 1994; Dias Junior & Pierce, 1995; Kondo, 1998; Rubin et al., 1998; Silva et al., 1998; Silva, 1999).



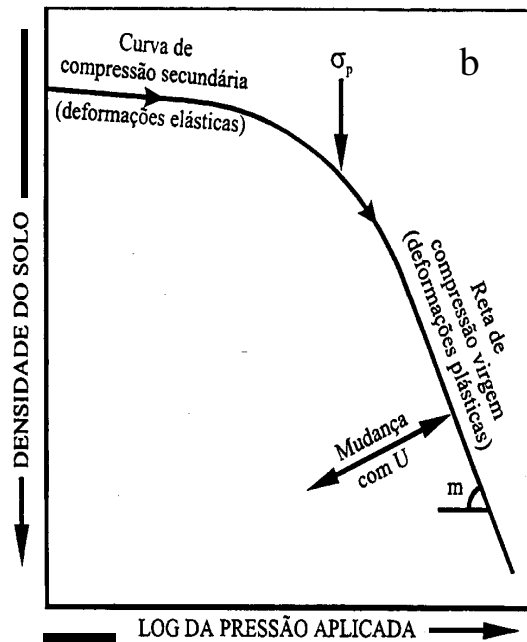


Figura 5: Curvas de compressão do solo quando este não sofreu nenhuma pressão prévia (a) e quando já experimentou pressões ou ciclos de secagem e umedecimento (b) (Dias Junior & Pierce, 1995).

É na região da curva de compressão secundária que o solo deve ser cultivado ou tráfegado sem que ocorra compactação adicional, uma vez que a aplicação de pressões maiores que a de preconsolidação ocasionará compactação adicional. Os mesmos autores definem a pressão de preconsolidação como a pressão que divide a curva de compressão do solo em uma região de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis (curva de compressão secundária) e uma região de deformações plásticas e irreversíveis (curva de compressão virgem). Em outras palavras, a pressão de preconsolidação pode ser definida como a máxima pressão a que o solo em questão foi submetido no passado, ou como a pressão máxima que pode ser aplicada àquele solo sem que ele sofra compactação adicional.

O declive da reta de compressão virgem é denominado índice de compressão ( $m$ ), o qual pode ser utilizado como uma medida da

susceptibilidade do solo à compactação (Smith et al., 1997; Kondo & Dias Junior, 1999a, Kondo & Dias Junior, 1999b, Kondo & Dias Junior, 1999c). O valor de  $m$  varia como uma função da umidade do solo (Dias Junior, citado por Kondo & Dias Junior, 1999b e por Kondo & Dias Junior, 1999c), apresentando a seguinte forma geral:

$$m = a + b \cdot U + c \cdot U^2$$

(4)

em que,

$m$  é o índice de compressão;

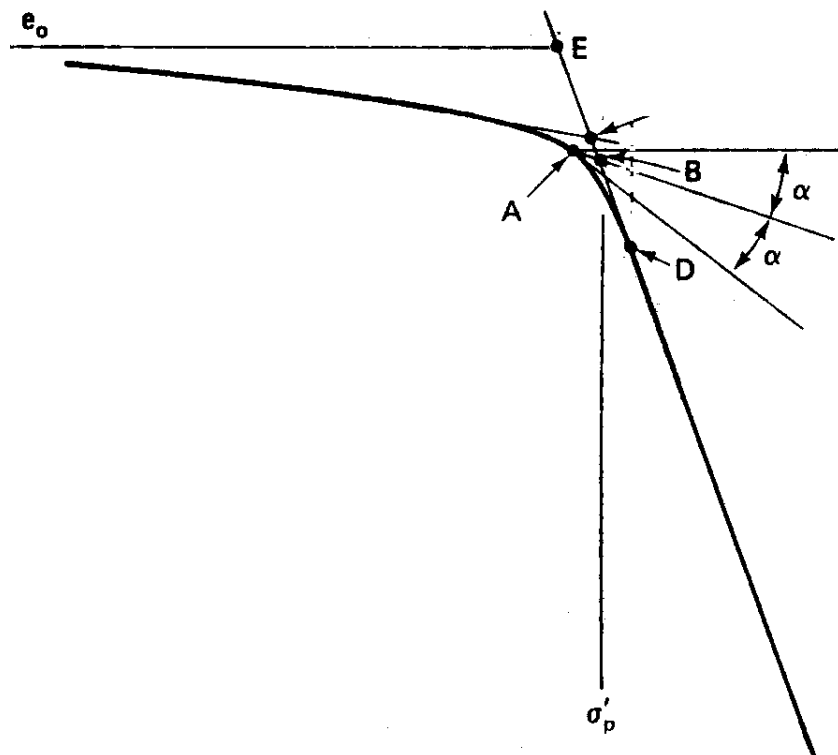
$a$ ,  $b$  e  $c$  são parâmetros da equação de regressão, e

$U$  a umidade gravimétrica do solo.

A maioria dos modelos usados para avaliar a compactação do solo tem dado ênfase à reta de compressão virgem, a qual define deformações não recuperáveis, outros baseiam-se na pressão crítica na qual os agregados sofrem cisalhamento enquanto poucos levam em consideração a história de tensão do solo causada por diferentes tipos de manejo. Assim, a história de tensão do solo tem sido negligenciada na modelagem da compactação pela maioria dos modelos (Dias Junior & Pierce, 1995). Os modelos fundamentados na pressão crítica parecem superestimar a capacidade de suporte dos solos, visto que a pressão crítica é maior do que a de preconsolidação, estando, portanto, localizada na reta de compressão virgem, onde ocorre compactação adicional.

O método mais usado para a determinação da pressão de preconsolidação é o método de Casagrande (Holtz e Kovacs, 1981), sendo considerado padrão para comparação com outros métodos (Jose et al., citado por Dias Junior & Pierce, 1995).

O método de Casagrande consiste em escolher na curva de compressão do solo, o ponto de raio de curvatura mínimo ou de maior curvatura (ponto A) e, por ele, traça-se uma paralela ao eixo das abcissas e um tangente à curva passando pelo ponto A. Do ângulo formado por essas duas retas, traça-se a bissetriz. A intercessão desta bissetriz com o prolongamento da reta de compressão virgem projetada no eixo das abcissas corresponde à pressão de preconsolidação (Holtz & Kovacs, 1981), conforme pode ser visto na Figura 6.



Pressão efetiva aplicada

Figura 6: O método gráfico de Casagrande para a determinação da pressão de preconsolidação (Holtz & Kovacs, 1981).

Dias Junior & Pierce (1995), apresentam outros cinco métodos para a determinação da pressão de preconsolidação, envolvendo procedimentos gráficos, desenvolvidos inicialmente para solos saturados e utilizados para solos não saturados, e de regressão. Os autores revelam que a seleção do ponto de raio de curvatura mínimo utilizado no método de Casagrande é tanto mais difícil quanto maior as deformações a que foi submetida a amostra e também, ao se utilizar amostras indeformadas com

altos teores de água, uma vez que a curva de compressão toma uma forma praticamente linear. Afirmam ainda que, nenhum dos outros métodos pode ser considerado como técnica padrão e, em geral, não apresentam facilidade na determinação e envolvem julgamentos subjetivos, como a determinação visual do ponto de raio de curvatura mínimo utilizado no método de Casagrande. Este fato sugere a necessidade de desenvolvimento de nova metodologia para o cálculo da pressão de preconsolidação com base na curva de compressão do solo, à semelhança do método padrão de Casagrande, porém, eliminando-se os julgamentos subjetivos até então utilizados.

Nesta linha de raciocínio, Dias Junior & Pierce (1995) testaram vários métodos utilizados para estimar a pressão de preconsolidação a partir de curvas de compressão do solo em comparação com o método gráfico de Casagrande, apresentando uma alternativa simples de estimativa utilizando os recursos de uma planilha eletrônica, que utiliza uma combinação de dois métodos, de acordo com o teor de água na amostra. Para o cálculo, são consideradas somente as duas ou quatro primeiras cargas aplicadas na amostra, respectivamente para altos e baixos teores de água no solo, confrontadas com as duas maiores cargas aplicadas. Assim, estes métodos utilizam alguns pontos utilizados para a construção da curva de compressão do solo em detrimento da própria curva.

Segundo Dias Junior & Pierce (1995), para evitar compactação adicional, a pressão a ser aplicada ao solo deve ser igual ou inferior à pressão de preconsolidação, a qual representa o valor máximo da pressão que o solo suportou no passado. A pressão de preconsolidação, para um mesmo solo, varia com o teor de água do mesmo (Chancellor, 1977). Assim, o teor de água do solo acima do qual pode-se efetuar operações com máquinas agrícolas dependerá, além dos parâmetros de solo, da pressão que será exercida pelo conjunto motomecanizado a ser utilizado na operação desejada, parâmetro este de grande variação em função das características do trator e dos implementos utilizados.

As curvas de compressão dos solos são obtidas para uma seqüência de pressão de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior & Pierce, 1995; Kondo, 1998; Kondo & Dias Junior, 1999b; Kondo & Dias Junior, 1999c; Dias Junior et al., 1999).

Outro parâmetro que apresenta grande variação na literatura científica se refere ao tempo em que cada carga permanece atuando na amostra antes que a próxima carga seja aplicada. Reinert (1990), concluiu, nos ensaios preliminares, que dez minutos foram suficientes para realizar 99% da deformação para uma dada carga. Outros pesquisadores encontraram tempos diferentes: cinco minutos (Rubin et al., 1998; Silva et al., 1998; Genro Junior et al., 1999; Silva, 1999; Bach et al., 1999; Silva et al., 2000), dois minutos (Macedo, 1993; Carpenedo, 1994) e outros autores um tempo variável até que 90% da deformação seja alcançada (Kondo, 1998; Dias Junior et al., 1999; Kondo & Dias Junior, 1999b; Kondo & Dias Junior, 1999a; Kondo & Dias Junior, 1999c).

Objetivando verificar o comportamento mecânico de solos sob tráfego de trator, com diferentes pressões de inflação dos pneus e teores de água no solo, Trein e Boeni (2000), concluíram que a pressão de inflação tem efeito sobre a pressão de preconsolidação, sendo tanto mais intensa quanto maior o teor de água. Sugerem ainda que a redução da pressão de inflação é uma alternativa para minimizar o efeito compactante das máquinas agrícolas.

Indicam Silva et al. (2000), que a amplitude das deformações depende do tipo de solo, do estado inicial de compactação, teor de água e pressão aplicada. Os mesmos autores concluíram ainda que a suscetibilidade à compactação depende do teor de água, e, este efeito, é diferente para cada tipo de solo.

A baixa resistência à compressão de um solo recuperado torna evidente a dificuldade de compatibilizar o manejo de sistemas conservacionistas e recuperadores do solo com a mecanização, tal como hoje é praticada, e a necessidade de encontrar alternativas que façam diminuir as tensões compressivas ou que condicionam o solo a oferecer maior resistência à compressão, sem diminuir-lhe a qualidade do espaço poroso (Macedo, 1993).

Estudando diversos sistemas de manejo do solo, Carpenedo (1994) encontrou diferenças nos valores da pressão de preconsolidação, observando valores mais altos nos solos sob semeadura direta.



Foi atribuído por Silva (1999) como uma possível causa da baixa correlação entre a pressão de preconsolidação e densidade inicial do solo e grau de saturação à dificuldade de identificação do ponto de mínimo raio de curvatura por ocasião da determinação da pressão de preconsolidação. Concluiu, entre outras, que para uma mesma classe de densidade inicial, os valores da pressão de preconsolidação decrescem de forma logarítmica com o aumento no grau de saturação do solo.

Avaliando o efeito do manejo e da umidade no comportamento de três Latossolos, Kondo & Dias Junior (1999a), e Kondo & Dias Junior (1999b), observaram que as variações nas propriedades físicas e mecânicas dos solos, induzidas pela sua gênese e manejo, alteraram o comportamento compressivo dos solos, tendo a umidade modificado a forma da curva de compressão em todos os solos estudados. À medida que a umidade do solo aumentou, a pressão de preconsolidação decresceu exponencialmente, indicando uma redução na capacidade de suporte de carga do solo. Estes decréscimos seguiram o mesmo modelo proposto por Dias Junior (1994), apud Kondo & Dias Junior, 1999a, para solos sob condições de clima temperado. Neste estudo a pressão de preconsolidação foi expressa como:

$$s_p = 10^{(a + b \cdot U)}$$

(5)

em que,

$s_p$  é a pressão de preconsolidação (kPa);

$a$  e  $b$  são parâmetros da equação de regressão; e

$U$  a umidade gravimétrica ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

O efeito do uso e da umidade do solo sobre a compactação adicional de três Latossolos foi estimado por Kondo & Dias Junior (1999c) concluindo que, à medida que a umidade do solo aumenta, as retas de compressão virgem são deslocadas para a região de menor pressão, indicando o aumento da suscetibilidade do solo à compactação, diminuindo, entretanto, a resistência mecânica a ser vencida pelo sistema radicular das culturas.

A curva de compressão virgem do solo permite prever os valores de densidade do solo se este for submetido a uma carga (Oliveira et

al., 1997). Avaliando as variações na compactação do solo resultantes de uma, três ou cinco passadas com o trator, os mesmos autores concluíram que uma passada foi responsável por mais de 80% da profundidade do sulco formada pelo pneu.

Os sistemas de exploração florestal devem ser economicamente viáveis, socialmente aceitáveis e ecologicamente justificáveis (Grammel & Karmann, apud Fenner, 1999). Estes são os requisitos básicos para a produção sustentável de madeira, necessários para garantir a existência contínua desta atividade (Speidel, citado por Fenner, 1999) e são, atualmente, considerados critérios mínimos essenciais para a obtenção da certificação florestal. A sustentabilidade florestal baseia-se na conservação, ou seja, no “uso adequado” do solo (Hahn-Schilling, citado por Fenner, 1999).

A implementação de legislação específica exigiu que as empresas envolvidas com a exploração de recursos naturais adaptem suas atividades de maneira condizente ao desenvolvimento sustentável (Dias Junior et al., 1999), evitando assim a degradação de suas áreas. Estes autores sugerem a utilização da pressão de preconsolidação como um indicador da sustentabilidade estrutural dos solos cultivados com *Eucaliptus*.

Kondo (1998), realça a necessidade de determinar o teor de água do solo antes que este seja trafegado ou cultivado, bem como uma previsão quantitativa do prejuízo causado à sua estrutura, caso as pressões aplicadas excedam a capacidade de suporte de carga do mesmo. Um dos parâmetros indicados na estimativa da capacidade de suporte de carga tem sido a pressão de preconsolidação (Kondo 1998; Dias Junior & Pierce, 1995; Dias Junior et al., 1999, Rubin et al., 1998; Silva et al., 1998).

O desempenho operacional dos rodados pneumáticos dos tratores agrícolas depende do tipo e condições do solo, tipo e geometria do pneu, formato das garras, força disponível no eixo e pressão de inflação dos pneus, associadas às características físicas do solo. A interação correta entre estas variáveis pode fornecer um aumento potencial da tração, com uma substancial melhoria na eficiência trativa e uma diminuição na compactação do solo (Santos Filho & Lanças, 1998).

Relacionar as propriedades e parâmetros do solo com a eficiência trativa e o desempenho dos veículos tem sido um dos mais

importantes alvos investigados pelos pesquisadores de equipamentos fora-de-estrada nos últimos tempos (Upadhyaya et al., 1994).

#### 4.5 Recalque em solos agrícolas

O recalque do solo provocado por cargas, tais como aquelas impostas pelos rodados de tratores e máquinas, tem sido uma matéria de interesse tanto na área agrícola como no setor de mobilidade veicular e transporte, objetivando avaliar a condição de trafegabilidade e tração conforme o tipo de solo.

Em áreas de arroz irrigado, o recalque do solo é colocado como uma dependente do tempo, e tem recebido considerável atenção (Santos Filho, 1998). Porém, a maioria das aplicações do recalque do solo são realizadas de forma independente do tempo, mas totalmente dependente do teor de água.

Para os casos onde o tempo não é considerado como sendo um fator, uma das primeiras aproximações utilizadas foi baseada nas relações de capacidade de suporte utilizadas em engenharia de fundações, na qual é determinada a pressão crítica para a ruptura do solo (Terzaghi, citado por Upadhyaya et al., 1994).

A caracterização física do solo para avaliação do desempenho de rodados de tratores agrícolas em condições de campo é comumente obtida a partir de testes de penetração de pratos, nos quais obtêm-se uma curva da força aplicada em relação à profundidade ou recalque no solo. Os parâmetros das fórmulas correspondentes serão considerados propriedades mecânicas que caracterizam a resistência do solo contra a penetração (Koolen & Kuipers, 1983).

Bernstein, em 1913, e Goriatchkin, em 1937, citados por Lanças (1997) e por McKyes (1985), apresentaram as primeiras descrições da variação do recalque em função da variação da força de penetração, sendo proposta a seguinte equação para descrever o fenômeno:

$$p = k \cdot Z^n$$

(6)

onde,

$p$  = pressão no solo;

$$p = F_v / A;$$

$F_v$  = carga vertical aplicada ao prato;

$A$  = área do prato;

$k$  = constante de rigidez do solo;

$Z$  = deslocamento vertical (recalque) do prato no solo;

$n$  = constante de deformação do solo.

Esta relação é útil por aproximar bem a forma da curva de carga-recalque nas condições naturais do solo para a maioria dos casos, porém,  $k$  e  $n$  não podem ser considerados propriedades verdadeiras do solo, uma vez que apresentam, principalmente  $k$ , grande dependência das dimensões da placa.

A mesma equação foi utilizada por Gill e Vanden Berg, citados por Santos Filho (1998). A Figura 7 ilustra a atuação de um prato submetido a uma força vertical no solo.

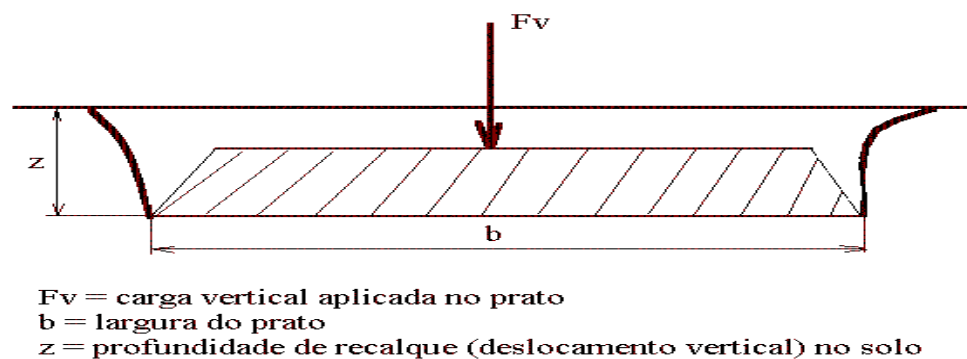


Figura 7: Representação esquemática do recalque de um prato no solo (Lanças, 1997).

O objetivo do ensaio de penetração é que um prato, retangular ou circular, seja introduzido progressivamente no solo à medida que aumenta a carga vertical que é aplicada ao mesmo. Simultaneamente, registra-se os valores da profundidade atingida pelo prato e a pressão que ele exerce

sobre o solo.

A penetração de um prato no solo se inicia com pequenas cargas, com suas respectivas tensões de deformação, as quais são menores que aquelas necessárias para causar ruptura do solo (McKyes, 1985). Quando os valores da carga são pequenos, a penetração do prato ocorre devido a deformação por cisalhamento produzida no solo (Figura 8b). À medida que esta deformação progride, o solo se rompe, formando uma cunha de terra embaixo do prato (Figura 8c) e, ao lado, a sobrecarga provoca a elevação do solo. Para que o prato continue penetrando no solo, torna-se necessário incrementar a carga vertical, uma vez que a cunha deve se deslocar lateralmente ao solo que permanece ao lado do prato (Renedo, 1996). Solos naturais exibem uma mudança gradual na exigência de carga para transição entre os estados b e c da Figura 8, observando-se uma leve variação no recalque com o incremento da força  $N$ .

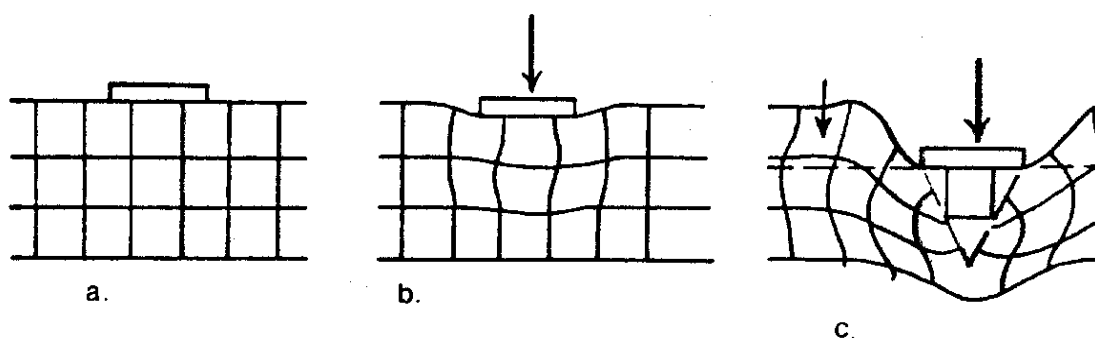


Figura 8: Representação esquemática de um prato retangular na superfície de um terreno nas condições de ausência de carga (a), presença de uma pequena carga que não causa ruptura do solo (b), e desenvolvendo ruptura por cisalhamento (c), segundo McKyes (1985).

Baseando-se em dados experimentais, Bekker, citado por Upadhyaya et al. (1994), propôs uma equação que expressa a relação existente entre a pressão aplicada ao prato e a deformação que o mesmo provoca no solo:

$$p = \left( \frac{k_c}{b} + k_f \right) z^n$$

(7)

onde,

$k_c$  = módulo de deformação devido a coesão do solo;

$k_f$  = módulo de deformação devido ao atrito interno do solo;

$b$  = largura do prato.

A constante de rigidez  $K$  da equação 6 foi separada em dois componentes na equação 7, um relativo à coesão do solo,  $k_c$ , que está relacionado com a largura da área de carga, e outro relativo ao ângulo de atrito interno do solo,  $k_f$ , determinados a partir de ensaios de recalque utilizando, pelo menos, dois pratos de dimensões diferentes, conforme descrito por Pavlics (1958).

Essa equação é uma modificação da expressão clássica para a penetração de uma sapata de fundação, com a compensação para o fato de que a pressão não cresce linearmente com o aumento de  $z$ , apresentando importância fundamental para a determinação da resistência teórica ao rolamento (Barger et al., 1966).

O princípio do mecanismo de carga-recalque para determinação dos valores de  $k_c$ ,  $k_f$  e  $n$  é mostrado na Figura 9. A carga  $W$  é determinada primeiro com o prato I quando um motor  $M$  ou o esforço manual de um operador força o prato para baixo. A carga é traçada como função do recalque  $Z$  pelo registrador  $R$ , obtendo-se uma curva para cada prato.

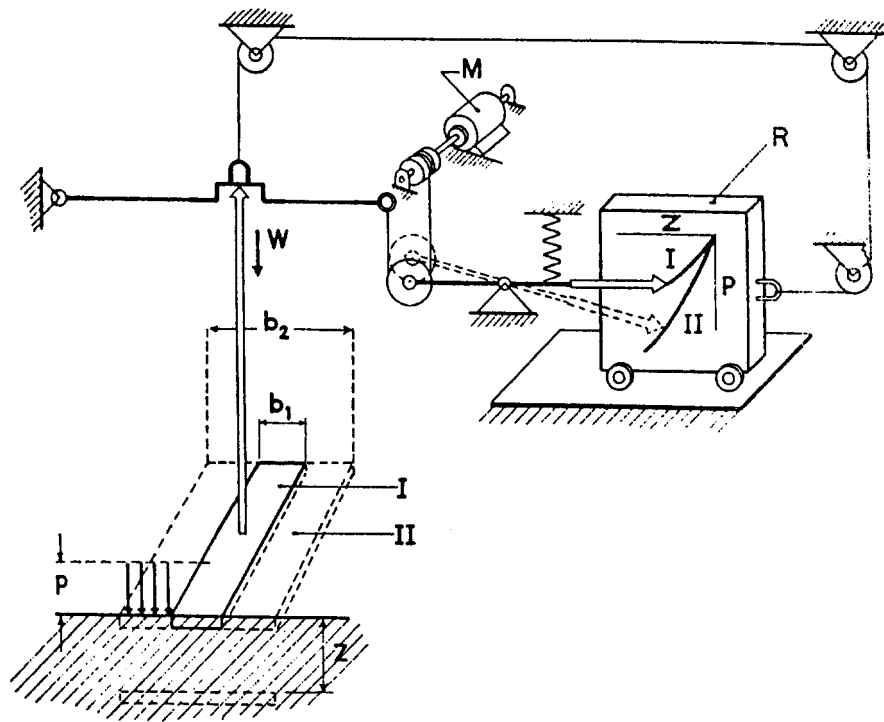


Figura 9: Sistema para a determinação dos parâmetros de recalque do solo, segundo Pavlics (1958).

Mesmo tendo sido comprovado que os valores de  $k_c$  e  $k_f$  são independentes do tamanho do prato, recomenda-se que, nas determinações realizadas diretamente sobre o terreno, se utilize pratos com largura entre 0,05m e 0,10 m, preferindo-se uma relação entre o comprimento e a largura dos pratos superior a cinco (Renedo, 1996).

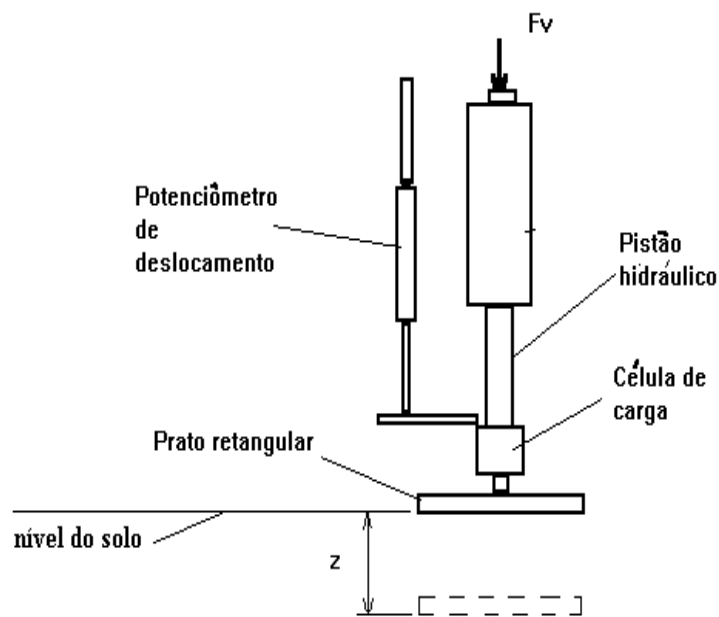
Para se conseguir a mesma penetração no solo, a utilização de pratos circulares requer menores esforços que os pratos retangulares (Renedo, 1996). Neste caso, a medida  $b$  deverá ser tomada como sendo o raio do prato (Bekker, citado por McKyes, 1989).

A velocidade de penetração, segundo Renedo (1996), deve ser da ordem de 0,05 m/s, apesar deste parâmetro não ter apresentado

influência nos resultados obtidos por Santos Filho (1998).

Lanças (1997), apresenta um esquema simplificado do módulo de recalque utilizando um pistão hidráulico para o deslocamento do prato, uma célula de carga sobre o prato e um potenciômetro de deslocamento linear para medir o recalque, conforme pode ser observado na Figura 10.

O ensaio consiste na aplicação gradual da força vertical  $F_v$  e correspondente medida do recalque  $z$ . Assim, serão gerados dois conjuntos de dados da força vertical em função da deformação do solo.



$F_v$  = carga vertical aplicada no prato pelo pistão hidráulico

$z$  = recalque do prato no solo

Figura 10: Esquema simplificado do Módulo de Recalque do Solo, segundo



Lanças (1997).

Para determinar os valores das constantes  $k_c$ ,  $k_f$  e do expoente  $n$ , necessita-se realizar dois ensaios com pratos de larguras diferentes,  $b_1$  e  $b_2$ . Aplicando-se log na equação (7) para cada um dos ensaios, tem-se:

$$\text{Log}(p_1) = \log(k_c/b_1 + k_f) + n \cdot \log(z)$$

(8)

e

$$\text{Log}(p_2) = \log(k_c/b_2 + k_f) + n \cdot \log(z)$$

(9)

Traçando-se  $\log(p)$  em função de  $\log(z)$  em um eixo cartesiano (Figura 11), ou traçando-se  $p$  em função de  $z$  em um papel log-log, obtém-se duas retas paralelas com inclinação  $n$ :

Figura 11: Representação gráfica esquemática de  $p$  em função de  $z$  para obtenção dos coeficientes  $k_c$ ,  $k_f$  e  $n$ .

O valor de  $n_1$  e  $n_2$ , a inclinação das retas, é dado pela tangente dos ângulos  $a_1$  e  $a_2$ , respectivamente, tomando-se o valor médio se houver diferença entre os dois valores.

A interseção das retas na ordenada, tomadas para o valor de  $z=1$ , fornece os valores de  $a_1$  e  $a_2$  que, de acordo com as equações (8) e (9), tornam-se:

$$a_1 = (k_c/b_1 + k_f)$$

(10)

e

$$a_2 = (k_c/b_2 + k_f)$$

(11)

Fazendo-se as devidas operações matemáticas, tem-se:

$$k_c = (a_1 - a_2).b_1.b_2 / (b_2 - b_1)$$

(12)

e

$$k_f = (a_2.b_2 - a_1.b_1) / (b_2 - b_1)$$

(13)

Com as facilidades oferecidas pela utilização de microcomputadores, o mesmo raciocínio pode ser desenvolvido utilizando-se, por exemplo, uma planilha eletrônica, encontrando-se uma equação linear para os dados de  $p$  em função de  $Z$ , com estes dados transformados para  $\log$ .

Incluindo-se o caso de solos homogêneos como, por exemplo, aqueles preparados em laboratório, os valores de  $k_c$  e  $k_f$  são obtidos com coeficientes de variação muito elevados se o ensaio é realizado com apenas dois pratos diferentes. A utilização de pratos mais largos, com 0,30 m ou mais, podem reduzir estas variações, com a grande e óbvia desvantagem de aumento da força necessária para cravar o prato no solo (Renedo, 1996). McKyes & Fan, citados por McKyes (1985), demonstraram que os erros estatísticos envolvidos na estimativa das constantes  $k_c$ ,  $k_f$  e  $n$  podem ser substancialmente reduzidos empregando-se uma série de três, quatro ou cinco pratos de diferentes tamanhos. Trabalhando em areia previamente preparada utilizando cinco pratos circulares com diâmetros variando entre 0,035 e 0,055 m. Fan, citado por McKyes (1989), encontrou para o coeficiente de variação os valores médios apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Coeficientes de variação médios para os coeficientes  $k_c$ ,  $k_f$  e  $n$  obtidos com ensaios de recalque utilizando diferentes número de pratos (Fan, apud McKyes, 1989).

Número de pratos	Coeficiente de variação médio (%)		
	$k_c$	$k_f$	$n$
2	81,6	26,3	1,5
3	27,0	7,2	1,1
4	15,6	4,6	0,7

Quando se utiliza mais de dois pratos para a determinação dos valores das constantes, o resultado do ensaio com cada prato deve ser traçado em um papel log-log (ou submetido a análise de regressão), conforme já discutido anteriormente, obtendo-se os valores de  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , etc.

Um novo gráfico deverá ser construído com os valores de  $a_i$  em função de  $1/b_i$ . A inclinação da reta que une esses pontos em escala normal será o valor de  $k_c$  e o ponto onde a reta cruza o eixo das ordenadas será o valor de  $k_f$  (Figura 12).

Figura 12: Representação gráfica esquemática dos valores de  $a$  em função de  $b^{-1}$ .

Upadhyaya et al. (1994), assim como Santos Filho (1998), citam diversas modificações propostas para a equação do recalque do solo visando principalmente o estudo da resistência ao rolamento de veículos de pneus e esteiras, porém, sem demonstrar vantagens adicionais nos novos modelos.

Foram ensaiados sete tipos de pratos, sendo três pratos de geometria plana e dimensões diferentes (0,1524 x 0,1016m, 0,1778 x 0,0889m e 0,2032 x 0,0762m), dois pratos com geometria da base curvada com ângulo tangencial de 15° e 30° e dimensões de 0,1778 x 0,0889m e dois pratos com geometria da base angular com 15° e 30°, dimensões de 0,1778 x 0,0889m, dimensão esta indicada como padrão ASAE (Santos Filho e Lanças,

1998). Concluíram que a forma geométrica do prato interfere estatisticamente nos valores dos coeficientes, sugerindo a utilização de pratos de geometria curvada para o levantamento dos parâmetros dinâmicos da interação rodado-solo em função apenas da semelhança com a geometria do pneu. O coeficiente  $n$  mostrou-se pouco dependente das condições de solo (seco ou úmido, preparado ou não preparado), e do tipo de solo e da forma geométrica do prato.

Avaliando cinco velocidades de deslocamento do prato variando entre  $22,4 \text{ mm.s}^{-1}$  e  $762 \text{ mm.s}^{-1}$ , Santos Filho (1998) verificou que as alterações de velocidade não influenciaram nos resultados das pressões obtidas para as diversas razões de profundidade de penetração ( $z/b$ ) utilizadas.

Segundo Caputo, citado por Mah (1980), o atrito interno é proveniente do entrosamento das partículas do solo. Como as partículas da areia são grãos, o entrosamento é maior, dificultando o deslizamento entre elas, aumentando assim o atrito interno e elevando os valores de  $k_c$  e  $k_f$ . O contrário ocorre para a argila, que tem maior proporção de partículas em camadas planas, arranjo que diminui o entrosamento e retém grande quantidade de água, que age como lubrificante, facilitando o deslizamento entre as partículas. Mah (1980), confirmou estas afirmações trabalhando com solo de textura arenosa proveniente de Janaúba e de textura argilosa proveniente de Viçosa, ambas no Estado de Minas Gerais. Verificou ainda que os parâmetros  $k_c$  e  $k_f$  do solo arenoso são mais influenciados pela umidade que aqueles do solo argiloso.

Os valores de  $k_c$  e  $k_f$  aumentam rapidamente com o decréscimo no teor de água de um solo tipicamente barro-franco (Hanamoto & Hegedus, apud Upadhyaya et al., 1994). Características similares foram encontradas para mistura de argila e silte e a mesma tendência prevalece para os valores do parâmetro  $n$  (Trask & Klehn, citados por Upadhyaya et al., 1994).

Para a expressão  $p = k \cdot (z/b)^n$ , o coeficiente ( $k$ ) mostra-se dependente das condições do solo (seco ou úmido, preparado ou não preparado) e do tipo de solo (Santos Filho, 1998).

Mah (1980), confirmado por Vieira (1982), verificou que os valores de  $k_c$  e  $k_f$  decresceram com o aumento do teor de água para solo arenoso e para solo argiloso, afirmando que este resultado era o esperado,

tendo em vista que os solos mais secos são mais duros e exigem maior força para se deformarem. Explica que a resistência ao cisalhamento e ao atrito interno são provocados pelo contato entre as partículas de solo; aumentada a quantidade de água no solo, suas partículas ficarão mais afastadas, diminuindo assim a resistência ao cisalhamento e o atrito interno; se o teor de água for muito alto, esta passará a servir como lubrificante, facilitando o deslizamento entre as partículas do solo, diminuindo assim a resistência à deformação e os valores de  $k_c$  e  $k_f$ .

A composição granulométrica dos solos varia de areia quase pura a elevado teor de argila e ou matéria orgânica. A areia quase não tem coesão, independente do seu teor de água, mas apresenta atrito interno relativamente alto. Por outro lado, os solos argilosos são bastante coesivos e suas propriedades físicas de coesão e atrito interno dependem do teor de água (Barger et al., 1966). Os mesmos autores afirmam que a resistência ao rolamento de um trator ou máquina agrícola diminui com o aumento de  $k_c$  e  $k_f$  e, como regra geral,  $k_c$  e  $k_f$  diminuem com o aumento do teor de água, o que confirma a importância de se conhecer as características de recalque do solo agrícola no estudo da interação pneu-rodado.

Com o objetivo de estimar a profundidade do rastro de uma roda rígida em solo macio, Bekker, citado por Koolen & Kuipers (1983), desenvolveu o modelo mostrado na Figura 13. Considerando um elemento de área na superfície da roda, o modelo considera que:

- a força de reação do solo no elemento de área é perpendicular à superfície da roda, ou seja, passa pelo eixo, apresentando valor igual à tensão  $p$  multiplicada pela área  $dA$ .
- a tensão  $p$  é igual à tensão sob o prato, que foi pressionado no solo na mesma profundidade do elemento de área em pauta.

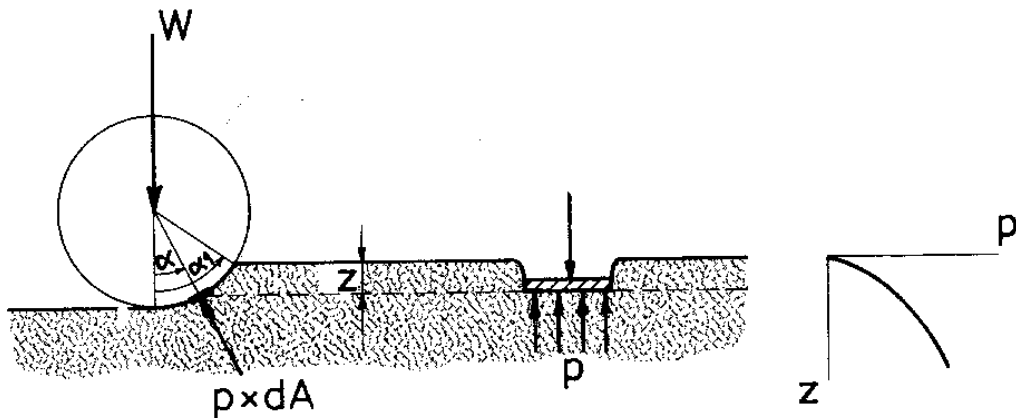


Figura 13: Ilustração da relação entre a teoria de recalque de Bekker e a resistência ao rolamento (Koolen & Kuipers, 1983).

#### 4.6 Interação pneu-solo

A agricultura exige locomoção “fora-de-estrada” de seus veículos e máquinas, assim como capacidade de propulsão para transferir o máximo da força desenvolvida por um motor sem prejuízo para a qualidade e a potencialidade do solo. De acordo do Abeels (1976), variações nas dimensões dos pneus influenciam a locomoção e, mais particularmente, a aptidão para a transmissão de grandes torques para a área de contato pneu-solo.

A transmissão de torque em solo macio, conforme Abeels (1985), implica em um corpo rígido, pneus deformáveis e um meio granular. O corpo rígido ou trator, por exemplo, tem suas características que sofrerão grandes variações quando equipamentos ou implementos estiverem engatados. Para propósitos de locomoção com pneus de borracha, o corpo rígido terminará nas rodas. O pneu é um tubo que envolve a roda, e suas características construtivas levam a uma deformabilidade característica, a qual é de grande importância nos efeitos da transferência de peso para o solo. Este, por sua vez, apresenta superfície deformável, e não rígida.

Um pneu “fora-de-estrada” deve ser considerado de forma diferente daqueles utilizados por caminhões ou máquinas de engenharia civil, por exemplo, pelo motivo de que é sustentado por uma superfície deformável. Neste caso, o pneu sofrerá uma deflexão até que entre em equilíbrio com a força oposta criada pelo meio e, naquele, o pneu sofrerá deflexão por se apresentar comprimido entre duas superfícies rígidas, a roda e a pista.

A passagem de um rodado pneumático sobre um solo agrícola difere em muitos aspectos de sua passagem sobre pistas duras (Soane et al., 1980/81). Somente em circunstâncias excepcionais, o solo agrícola tem resistência suficiente para suportar a carga aplicada em sua superfície pelos pneus sem exceder o limite de elasticidade, levando a deformações e compactação. Apesar de o método do bevameter para estimar a eficiência do pneu ter sido utilizado com sucesso no projeto e operação do primeiro veículo lunar, pouca utilização tem sido feita dos resultados dos ensaios na seleção de pneus para veículos agrícolas, mesmo reconhecendo-se que a tração, resistência ao rolamento, compactação e consumo de combustível são dependentes do tipo de pneu selecionado.

As características de desempenho de pneus agrícolas em diferentes condições de solo a várias cargas dinâmicas e pressão de inflação são de grande interesse para equipar adequadamente unidades de força motriz, a fim de executar os trabalhos de campo de forma mais eficiente (Upadhyaya & Wulfsohn, 1990). Uma estimativa conservadora do desperdício anual de combustível nos Estados Unidos da América devido a baixa eficiência trativa de máquinas agrícolas é da ordem de 757 milhões de litros (Gill & Vandenberg, citados por Shmulevich et al., 1996).

A interação pneu-solo continua a ser o principal foco de estudo de pesquisadores preocupados em aumentar consideravelmente o desempenho de pneus agrícolas em diferentes condições de solo. Sabe-se que o rendimento e a eficiência de um trator, consumo improdutivo de combustível e a compactação do solo pela passagem do trator no solo agrícola dependem desta interação (Lyasko, 1994).

Tratando da necessidade de pesquisas sobre os componentes de tração e transporte utilizados na agricultura, Burt (1993)

separou o assunto em pesquisa básica, cujas necessidades são de natureza um tanto estável, com tendência de mudar lentamente com o tempo, e pesquisa aplicada, cujas necessidades podem mudar rapidamente com o desenvolvimento da tecnologia construtiva dos elementos dos rodados. Indica que, na pesquisa básica, os trabalhos de Bekker e vários de seus colegas nos apontaram a direção correta para o entendimento dos componentes dos modelos de tração e mobilidade, que têm recebido adaptações e ajustes ao longo do tempo no sentido de melhorar a praticidade de uso. Segundo o mesmo autor, a literatura mostra, desde os anos 60, que a maior parte da pesquisa de tração vem ocorrendo na pesquisa aplicada ou de natureza a resolver problemas específicos, os quais periodicamente se revelam e os pesquisadores reagem, iniciando novos programas de pesquisa.

Durante os anos 60, houve um bom entendimento da operação dos pneus diagonais (Burt et al., 1979). A alteração mais significativa no projeto de pneus de trator ocorreu no início dos anos 70 com a introdução dos pneus agrícolas de construção radial (Taylor et al., 1976; Burt, 1993), os quais podem operar satisfatoriamente em pressões mais baixas, apresentam maior flexibilidade e tem um maior comprimento de contato pneu-solo que os pneus diagonais. Mais recentemente surgiram os pneus de baixa pressão e alta flutuação, que começam a ser avaliados para as condições brasileiras (Lopes, 2000; Cordeiro, 2000).

No estudo da interação pneu-solo, existe a necessidade de descrever a área de contato entre o pneu e o solo (Hallonborg, 1996). A carga no pneu e a área de contato resultam em pressão no solo, a qual é importante para avaliar o impacto ambiental de uma máquina agrícola com rodado pneumático.

Para se obter um desempenho ótimo de um veículo “fora-de-estrada”, é necessário entender a interação entre o rodado e o meio no qual ele opera pela sua área de contato, o que torna este valor de importância fundamental (Placketi, 1985). O tamanho e a forma da área de contato é determinado pelas propriedades estruturais do solo e do rodado e, como a maioria destes veículos são equipados com rodados pneumáticos, os problemas envolvendo a interação rodado-solo se tornam bastante complexos.

Os métodos utilizados para a determinação do tamanho e



forma da área de contato do pneu em solo deformável são baseados principalmente no resultado de ensaios conduzidos em condições estáticas (Blaszkiwics, 1990; Komandi, 1976; Taylor et al., 1980; Godbole et al., 1993), simulando a condição de um pneu em movimento. Estas medições são tomadas normalmente ao interromper o movimento de um pneu e demarcar os limites da área de contato, cujas medidas são tomadas após a retirada do pneu. Estas medições são, na realidade, estáticas, uma vez que ao parar e retirar o pneu, a área de contato se altera devido ao gradual desaparecimento da deflexão do pneu, à semelhança do que ocorre também com o solo.

A área de contato entre uma superfície rígida e um pneu pode ser adequadamente descrita por um círculo, principalmente se o pneu for do tipo diagonal e apresentar alta pressão de inflação (Hallonborg, 1996). Quanto menor a pressão, mais a geometria da área de contato se aproxima da forma elíptica. Da mesma forma, quanto menos rígido for o solo, mais elíptica será a área de contato.

A área de contato foi determinada por Godbole et al. (1993) assumindo a geometria do pneu em contato com uma superfície rígida, gerando área elíptica ou retangular. Afirmam que, na prática, a área de contato é diferente devido a variações no valor do recalque das diferentes superfícies, introduzindo um coeficiente de correção que assume valor maior que um para superfícies deformáveis e, obviamente, valor um para superfícies rígidas.

A área de contato  $A$  elíptica pura é calculada por:

$$A = (p/4).L.b$$

(14)

onde  $L$  e  $b$  são, respectivamente, o comprimento e a largura da área de contato. Por outro lado, baixas pressões de inflação ou altas cargas podem levar a uma sobrecarga nos pneus, provocando grandes deformações em solo macio. Estas condições de baixa pressão e ou altas cargas proporcionam áreas de contato próximas de uma elipse, com a parte central da área apresentando tendência a ser retangular. Para contornar este problema, Lyasko (1994) assumiu área de contato retangular com as bordas arredondadas. Esta aproximação levou à utilização de um coeficiente de correção  $h$ , que subtrai estas margens, sendo a área de contato agora calculada por:

$$A = (p/4).L.b.(1-2.h/p)$$

(15)

sendo L e b o comprimento e a largura da elipse circunscrita na área de contato.

Bekker, citado por Hallonborg (1996), utilizou um coeficiente de elipticidade I variando de 0,78 para elipse pura até próximo de 1,0 para os pneus largos “terra tyres”, sem apontar a forma exata para a decisão de qual valor utilizar, determinando a área de contato multiplicando-se I pelo comprimento e pela largura da área de contato.

Schwanghart (1990), sugeriu um modelo matemático para calcular a área de contato A e a pressão no solo sob o pneu, com algumas simplificações. O termo coeficiente de elipticidade b foi introduzido no modelo na forma:

$$A = b.L.b$$

(16)

onde b é a largura do pneu e L o comprimento de contato, calculado separadamente para a parte dianteira e traseira do pneu. Os valores do coeficiente de elipticidade variaram de 0,75 a 0,80, também sem indicar como decidir entre os valores.

A área de contato foi calculada por Komandi (1976) utilizando a expressão:

$$A = (L-b).b+b^2.p/4$$

(17)

onde L é o comprimento total e b a largura da área, apresentando ainda equações empíricas para o cálculo de L e b.

Para área de contato de pneus traseiros de trator submetidos a cargas baixas e próprias para os mesmos Upadhyaya & Wulfsohn (1990) utilizaram geometria elíptica. Para pneus de aeronaves, Kilner (1982), também utilizou área de contato elíptica. Para ensaios com pratos, área de contato elíptica foi utilizada por Soltynski, apud Hallonborg (1996).

Existem diversos modelos matemáticos para o cálculo da área de contato pneu-solo, porém, todos com a desvantagem de serem razoavelmente complicados (Schwanghart, 1990). Assumindo alguma simplificações, o mesmo autor estabeleceu um modelo que apresentou bons resultados.

Afirmam Sharma e Pandey (1996a) que as características de eficiência de um rodado dependem em grande parte não somente da pressão de contato, mas também do tamanho e da forma da área de contato. Concluem que, para um rodado pneumático, a aproximação elíptica é o melhor estimador para a área de contato pneu-superfície.

Para que a área de contato fosse simétrica em relação a um eixo transversal perpendicular ao pneu, seria necessário que o tráfego ocorresse em uma superfície totalmente elástica (Hallonborg, 1996), condição esta que não ocorre no caso do tráfego com fins agrícolas ou florestais. O tráfego “fora-de-estrada” ocorre com a formação de deformações plásticas, conseqüentemente, a área de contato não será simétrica, sendo maior na parte da frente do pneu (Wulfson & Upadhyaya, 1992a; Wulfson & Upadhyaya, 1992b; Schwanghart, 1990). Finalmente, se o pneu estiver operando em local com inclinação lateral ou for levado a uma constante inclinação lateral, a área de contato será assimétrica ao longo da linha longitudinal do pneu. Teoricamente, cada quadrante da área de contato poderá apresentar a sua própria forma elíptica (Hallonborg, 1996). As expressões matemáticas para o cálculo da área de contato assimétrica tendem a ser bastante complicadas.

Um rodado pneumático movendo-se em solo macio deflete, assim como recalca o solo. O processo na zona de contato pneu-solo exhibe aspectos de um pneu em uma superfície rígida, assim como aspectos de uma roda rígida em solo deformável (Koolen & Kuipers, 1983). Quanto maior a pressão de inflação e ou quanto mais macio o solo, menor a semelhança com o primeiro e maior a semelhança com o segundo caso. É difícil medir a forma da superfície de contato de um pneu em movimento (Gill & Vandenberg, apud Koolen & Kuipers, 1983). Os poucos dados disponíveis sugerem uma superfície em arco relativamente complicada, conforme mostra a Figura 14. A profundidade do rastro aumenta com o aumento da patinagem e com o decréscimo da resistência do solo. A razão  $L_1/L_2$  diminui com o aumento da pressão de inflação, com o aumento da patinagem e com o decréscimo da resistência do solo. Uma menor relação  $L_1/L_2$  significa que uma menor porção do comprimento total de contato ocorre atrás da linha central do pneu. O comprimento de contato ( $L_1+L_2$ ) aumenta levemente com o aumento da pressão de inflação e da patinagem e como a diminuição da resistência do solo. Deve-

se notar que o ponto de contato mais profundo não ocorre na posição vertical central do pneu.

Um problema no estudo da interação pneu-solo é a distribuição da pressão ao longo da área de contato. Como o recalque máximo resulta da condição de equilíbrio da carga no pneu e das pressões, o tipo de contorno da área de contato é uma suposição em todos os modelos analíticos (Schmid, 1995). No caso mais simples, o contorno de contato consiste na seção de um círculo e uma secante horizontal. Uma melhor aproximação consiste na substituição do pneu elástico ( $D$ ) por um rodado rígido imaginário de dimensão maior ( $D^* > D$ ), incluso na área de contato. O mesmo pesquisador propôs, mais tarde, uma forma parabólica para o contorno de contato, o qual se aproxima da seção circular ( $D^*$ ), porém, levando a um tratamento matemático mais elegante.

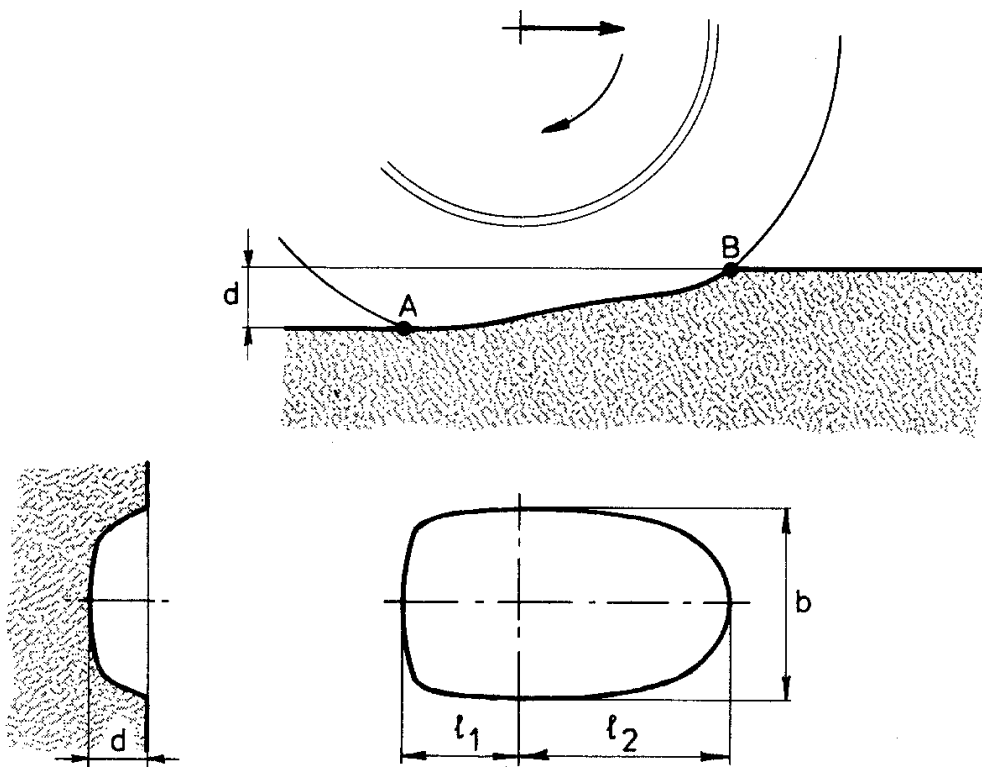


Figura 14: Deflexão da área de contato pneu-solo, segundo Koolen & Kuipers (1983).

O comprimento da área de contato foi deduzido por Bekker (apud Hallonborg, 1996, Komandi, 1976 & Lyasko, 1994), com base na deflexão e diâmetro do pneu. Da mesma forma, a largura da área de contato foi calculada a partir da deflexão e do raio da seção transversal do pneu. Os parâmetros para o cálculo da deflexão do pneu foram obtidos empiricamente para cada tipo de pneu, utilizando-se testes de carga em superfície rígida.

Somente a porção superior do solo é envolvida na locomoção (Abeels, 1985). Porterfield & Carpenter (1986), utilizando a pressão média de contato de um pneu em uma superfície rígida, encontraram que o nível

de compactação superficial depende da pressão de contato, enquanto que a compactação profunda depende da área de contato, largura do pneu e da carga suportada pelo mesmo.

O rodado pneumático é um vaso estrutural que comporta um volume de ar sob pressão, de forma a suportar a carga vertical imposta pelo veículo. Em interação com o solo, pode agir de duas maneiras diferentes: se a dureza do pneu é maior que a máxima tensão normal do solo, assumindo que não sofrerá deflexão, o pneu se comportará como um corpo rígido; por outro lado, se a dureza do pneu for menor, ele terá um comportamento de deformação (Placketi, 1985).

Chancellor, 1977, reportou um princípio geral de que a pressão exercida entre um rodado pneumático e a superfície sobre a qual ele atua é aproximadamente igual à pressão de inflação do pneu. Assim, se a carga vertical que age no pneu aumenta e a pressão de inflação permanece constante, o pneu se achatará de tal forma que o produto da pressão média pela área de contato será igual à carga vertical. Porém, alguns fatores poderão causar um desvio da pressão no solo com relação à pressão de inflação:

- As paredes duras da carcaça do pneu podem transferir alguma força para o solo e, assim, causar uma concentração de pressão nas bordas da área de contato.
- Em superfícies muito macias, o solo à frente da área de contato pode não ser suficiente para comprimir o pneu contra a pressão de inflação, resultando em baixa pressão nesta área.
- Quando a pressão de inflação é muito alta e o solo muito solto, o pneu agirá como uma roda rígida e a pressão de contato com o solo não responderá à pressão de inflação.
- Quando o pneu for equipado com garras, pode ocorrer concentração de pressão na superfície das garras. Este efeito é mais pronunciado em solos firmes do que em solos soltos.

Como demonstrado em diversos estudos (Bailey et al., 1996; Erbach & Knoll, 1992; Bailey e Burt, 1988, Raper et al., 1994; Arvidson & Ristic, 1996), um aumento na pressão de inflação do pneu aumenta a tensão vertical normal sob os pneus, com conseqüentes incrementos na compactação do solo, o que enfatiza a importância de utilizar a menor pressão de inflação

possível para cada combinação de pneu e carga no eixo do equipamento (Arvidson e Ristic, 1996; Lanças, 1996b; Lanças e Upadhyaya, 1997; Bailey et al. 1996).

A densidade do solo após o tráfego tende a aumentar com o aumento da pressão de inflação. O efeito da pressão de inflação se torna maior com o aumento da carga no eixo (Erbach & Knoll, 1992).

Pesquisando a distribuição de pressão entre um pneu liso e o solo, VandenBerg & Gill (1962) encontraram influência da pressão da parede lateral da carcaça do pneu para as pressões de inflação mais baixas ou para solos muito soltos.

Com a finalidade de determinar o efeito da pressão de inflação na pressão máxima na interface pneu-solo e no solo, compactação do solo e desempenho do pneu, Raper et al. (1994) conduziram um experimento em tanque de solo, concluindo que a carga dinâmica e a pressão de inflação afetam a pressão máxima na interface pneu-solo, medida na garra do pneu.

Diferenças nos valores de tensão normal no solo para diferentes pneus com a mesma carga foram encontradas por Arvidson & Ristic (1996). Como os autores utilizaram pneus com diferentes larguras, o resultado pode ter sido efeito da área de contato pneu-solo, o que não foi analisado no artigo, e não do tipo de construção do pneu.

Para verificar a influência da pressão de inflação na compactação do solo, Munson et al. (1994), mediram a tensão no solo, por meio de transdutores instalados a varias profundidades, quando submetido ao tráfego de um trator equipado com pneus radiais, com três pressões de inflação, sem carga e com carga suficiente para provocar uma patinagem de 8%. Concluíram que o trator utilizando pneus com pressão de inflação de 48 kPa causou menor tensão no solo do que com pressão de inflação de 106,5 kPa o qual, por sua vez, causou menores tensões do que com pressão de inflação de 165 kPa.

Bailey & Burt (1988), concluíram que as tensões no solo não sofrem influência da patinagem na primeira passada ou em passadas múltiplas e que, para o solo arenoso utilizado para o ensaio, o efeito de um alto valor de patinagem foi muito pequeno nos valores das tensões quando comparado ao efeito da carga dinâmica no pneu. Resultado semelhante foi

encontrado por Block et al. (1992).

Por falta de uma melhor aproximação para estimar a distribuição normal de pressão, Abd El-Gawwad et al. (1999) utilizou a teoria adotada por Bekker de que a pressão normal atuando na circunferência de um pneu é igual à pressão sob um prato recalçado na mesma profundidade. Os autores dividiram a área de contato pneu-solo em duas seções, a primeira onde o pneu aumenta gradualmente a carga no solo desde o ponto de contato inicial até a posição correspondente à linha vertical do eixo, e a segunda a partir desta linha, onde ocorre a diminuição da carga no solo, assumindo para isso que a forma do pneu permanece circular. Concluíram que os parâmetros relativos ao solo apresentam forte efeito no desempenho de pneus “fora-de-estrada”, o que torna necessário o desenvolvimento de novos modelos a serem utilizados para caracterizar o comportamento do terreno adequadamente.

Em preparação para uma missão de amostragem não tripulada ao planeta Marte, Coates (1991), avaliou o desempenho de tração de uma roda rígida do veículo proposto para a missão, o qual era equipado com articulação dupla e seis rodas, em um tanque contendo solo marciano simulado. Para a caracterização do solo, o autor utilizou, além da densidade, apenas o índice de cone e ensaios de recalque para a estimativa dos parâmetros  $k_c$ ,  $k_f$  e  $n$ .

Em experimentos de laboratório e de campo com a finalidade de verificar a relação entre a profundidade do recalque causado pelo pneu no solo e a profundidade na qual o tráfego aumenta a densidade do solo, Adam & Erbach (1995) encontraram uma relação entre a profundidade da compactação  $Y$  e a profundidade do recalque  $X$  da forma  $Y = b.X^m$ , onde  $b$  e  $m$  são parâmetros da regressão.

Com a finalidade de medir a deflexão do pneu se movimentando em superfícies duras e macias, Knight & Green (1962) montaram um potenciômetro linear acoplado a um potenciômetro circular no interior de um pneu sem câmara de um veículo militar. Concluíram que, em termos gerais, a forma que um pneu assumirá ao trafegar por uma linha reta depende de sua pressão de inflação e carga, da resistência e tipo de superfície sobre a qual ele opera e da velocidade com a qual se move. A importância de cada um destes parâmetros é aproximadamente na ordem em que foram



listado, tendo a velocidade o menor efeito.

A característica universal de um pneu pode ser modelada, de acordo com Bidermahn et al. (apud Sharma & Pandey, 1996b) e Lyasko (1994), na forma:

$$d^2/w = c_1 + c_2 \cdot d / (p_i + p_c)$$

(18)

onde,

d = deflexão do pneu;

W = carga vertical;

$p_i$  = pressão de inflação do pneu;

$p_c$  = pressão da carcaça do pneu;

$c_1$  e  $c_2$  = constantes.

Sharma & Pandey (1996b) consideraram  $(p_i + p_c)$  como sendo a pressão média no solo, simplificando desta forma a equação.

A deflexão do pneu em superfícies rígidas em função da altura da seção e de um coeficiente T do pneu foi determinada por Krick, citado por Godbole et al. (1993), tomando a forma:

$$d/S = 0,67 \cdot T^{0,8}$$

(19)

em que,

S = altura da seção do pneu;

$T = p_i \cdot D \cdot B / w$ ;

D = diâmetro do pneu;

B = largura do pneu.

Utilizando a altura da seção do pneu ao invés da largura no cálculo do coeficiente T, Godbole et al. (1993) reavaliaram a equação de Crick, encontrando uma relação similar para a deflexão, na forma:

$$d/S = 0,54 \cdot (T')^{0,79}$$

(20)

onde,

$T' = p_i \cdot D \cdot S / w$ .

A deformação do pneu d é determinada utilizando o coeficiente de deformação  $C_d$  a dada pressão de inflação  $p_i$ , assumindo, de acordo com Schwanghart, 1990, que 80% da carga total W atua na área

deformada do pneu:

$$d = 0,8 \cdot W / C_d$$

(21)

Os valores de  $C_d$  para cada tipo ou tamanho de pneu podem ser obtidos por medições em superfície rígida.

A variação da área de contato efetiva de um pneu, definida como a área de uma superfície rígida que realmente suporta a carga, é diretamente proporcional à carga e inversamente proporcional à pressão de inflação (Abeels, 1976).

Estudando o desempenho de pneus agrícolas em condições de solo macio, Perdoc e Arts (1987) concluíram que a capacidade de carga dos pneus é proporcional ao quadrado de sua largura, e que a redução na pressão de inflação leva a um decréscimo exponencial da capacidade de carga do pneu. Para minimizar o recalque do pneu no solo, os maiores benefícios são obtidos se o aumento na largura do pneu for acompanhado da diminuição simultânea da pressão de inflação.

Em 1990, Blaszkiewicz confirmou a falta de informações na literatura sobre as alterações da área de contato pneu-solo para diferentes condições de movimento do rodado, assim como a inexistência de técnicas para esta mensuração. Observações de deflexão do pneu para diferentes forças de tração, assim como resultados de ensaios de recalque no solo sob influência de diferentes forças de tração ou velocidade do trator indicam consideráveis respostas da área de contato entre pneus e solos deformáveis. Pode-se concluir então que a área de contato pneu-solo não terá um valor constante para diferentes condições de movimento e, assim, esta área precisa ser determinada para cada condição específica.

Nos últimos tempos, a modernização da agricultura leva à utilização de pneus mais largos (Hallonborg, 1996). O ímpeto de utilizar pneus maiores e mais largos não pode ser justificado por questões energéticas, mas por diminuir os saltos ("power hope") dos grandes tratores e diminuir os problemas de compactação do solo, permitindo trabalhar com menores pressões de inflação para a mesma carga e melhorando a trafegabilidade (Lanças et al., 1998; Lanças & Upadhyaya, 1997).

O trator causa maior compactação quando traciona uma

carga pela barra de tração do que quando opera sem patinagem (Munson et al., 1994). Os autores deixam a entender que este efeito seja da patinagem, porém, pode ter sido provocado pelo efeito de transferência de peso do trator para o eixo traseiro ao tracionar uma carga, efeito que não foi discutido na publicação em pauta.

#### **4.7 Transferência de peso**

Transferência de peso é o fenômeno que ocorre com o trator que, ao desenvolver uma certa força de tração, transfere para as rodas traseiras uma parte de seu peso na dianteira (Valmet, 1993?), parâmetro importante na determinação da carga dinâmica que atua no pneu traseiro do trator.

Já em 1928, McKibben apresentou os primeiros estudos do efeito da força na barra de tração sobre o peso efetivo nos eixos dianteiro e traseiro de um trator agrícola.

Baseando-se no fato de que o incremento no peso das rodas motoras de um trator por meio da transferência de peso do implemento e do eixo dianteiro é uma das mais importantes formas de aumentar a tração e diminuir a patinagem, Persson & Johansson (1967) desenvolveram um mecanismo de engate para implementos de arrasto ou carretas com a finalidade de controlar a transferência de peso para o eixo traseiro do trator.

Estudos sobre a cinemática envolvendo o acoplamento de diversos implementos a um trator foram apresentados por Heitshu (1952), avaliando a reação do solo em um ponto C ao centro da área de contato pneu-solo.

Centro de gravidade é definido como o ponto da máquina onde se aplica o seu peso-força cuja direção é normal à superfície da terra e de direção geocêntrica (Mialhe, 1980). A posição do centro de gravidade é referenciada a um triedro construído de um plano horizontal de apoio em nível e de dois planos verticais, um longitudinal e outro transversal, como ilustra a Figura 15.

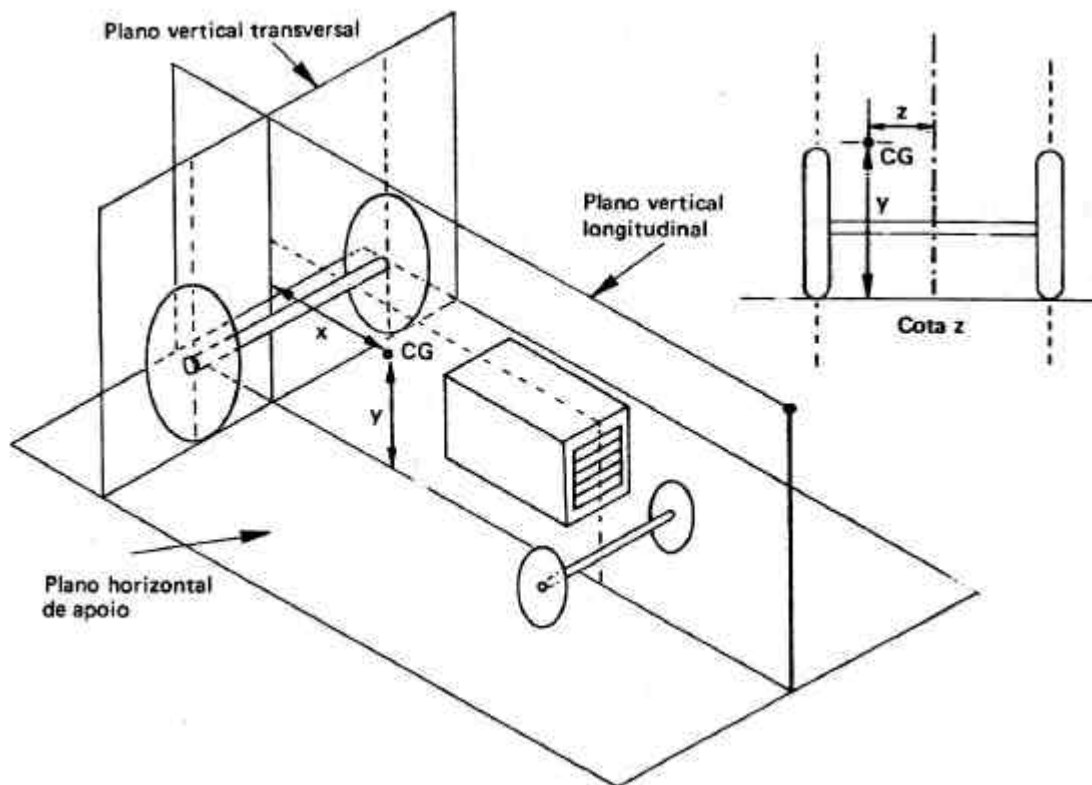


Figura 15: Triângulo de referência para definir a posição do centro de gravidade, mostrando o posicionamento de um trator e a localização das cotas  $x$ ,  $y$  e  $z$  (Mialhe, 1980).

Sendo os tratores aproximadamente simétricos em relação a um plano vertical perpendicular aos eixos situados a meia distância entre as rodas (Barger et al., 1966), o centro de gravidade estará contido neste plano, sendo então zero o valor de  $z$  na Figura 14, ou seja, ponderalmente simétrico, de acordo com Mialhe (1980).

A cota horizontal longitudinal do centro de gravidade, definida como a distância até o plano vertical transversal do triângulo, pode ser obtida medindo-se a distância entre eixos ( $x_1$ ) e efetuando-se a pesagem sob

as rodas traseira ( $R_1$ ) e dianteiras ( $R_2$ ) em uma superfície plana. A cota horizontal longitudinal do centro de gravidade  $x$  (ABNT, 1992; Baloch et al., 1986), é dada por:

$$x = x_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

(22)

Dos métodos disponíveis para a determinação da distância do centro de gravidade ao plano horizontal de apoio (cota vertical,  $y$ ) o método da pesagem apresenta maior conveniência e facilidade de aplicação (ABNT, 1992; Barger et al., 1966; Baloch et al., 1986).

Se as rodas dianteiras forem elevadas à altura  $y_2$  para a determinação de  $R_2'$ , pode-se obter outro plano contendo o centro de gravidade e, a intercessão desses planos localizará o centro de gravidade. Pela mesma equação 23, tem-se:

$$x_2' = R_2' \cdot x_1' / (R_1 + R_2)$$

(23)

O mesmo raciocínio, utilizando-se o triedro de referência, pode ser aplicado para a determinação do centro de gravidade de máquinas ou implementos acoplados ao trator por engate de três pontos (Mialhe, 1980).

Caso o implemento utilizado execute o seu trabalho suspenso no sistema hidráulico de engate de três pontos, a carga adicional no eixo traseiro do trator será calculada, segundo a FAO (1993), por:

$$W_{ad} = PI (x_1 + x_2 + x_3) / x_1$$

(24)

onde,

$W_{ad}$  = carga adicional no eixo traseiro;

PI = peso do implemento;

$x_1$  = distância entre eixos do trator;

$x_2$  = Distância entre o eixo traseiro e o olhal dos braços inferiores do sistema hidráulico de três pontos;

$x_3$  = distância do olhal ao centro de gravidade do implemento.

No caso de implemento atuando no solo ou exigindo um esforço de tração, a carga adicional poderá ser calculada, segundo VALMET (1993?), por:

$$W_{ad} = Ft \cdot H / x_1$$

(25)

onde,

$F_t$  = força de tração exigida na operação;

$H$  = altura da barra de tração ou dos braços inferiores do sistema hidráulico de três pontos.

Por razões óbvias de conservação do solo e da água, a maioria das operações motomecanizadas na agricultura ocorrem com o tráfego em nível, fazendo com que a declividade do terreno atue lateralmente no trator. Assim, mesmo considerando o trator como ponderalmente simétrico (Mialhe, 1980), a reação do solo será maior sob o pneu que trafega na parte “de baixo”, o que poderá ser determinado analisando-se os momentos atuantes no sistema inclinado.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Material

#### 5.1.1 Sistemas computacionais

Os programas e sistemas computacionais necessários para o desenvolvimento da pesquisa foram idealizados para microcomputadores padrão IBM-PC\* e compatíveis, com sistema operacional MS-DOS, utilizando linguagem CA-Clipper (Nantucket Corporation), versão 5.x, com exceção dos programas para o sistema de aquisição de dados (micrologger), que foram desenvolvidos com linguagem de programação específicas do próprio fabricante.

Para o processamento dos dados foram utilizada também a planilha eletrônica Excel e o programa estatístico Estat.

#### 5.1.2 Pneus

Os ensaios de deformação dos pneus foram realizados no Laboratório de Mecânica do Núcleo de Ensaios de Máquinas e Pneus Agrícolas (NEMPA), do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciência Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista (FCA-UNESP), localizado na Fazenda Experimental Lageado, em Botucatu, Estado de São Paulo.

O ensaio de deformação foi realizado utilizando-se três pneus de tração, normalmente utilizados em tratores agrícolas (Quadro 2), sendo um de construção diagonal, um de construção radial e um de construção mista de baixa pressão e alta flutuação (BPAF), com pressões de inflação de 68,9 kPa (10 psi) e

---

\* Citação de marcas e nomes de empresas não implicam em recomendação ou indicação por parte do autor.

206,8 kPa (30 psi), exercendo cargas de 1.000N; 5.000N; 10.000N; 15.000N; 20.000N e 25.000 N.

Quadro 2: Principais características dos pneus utilizados nos ensaios.

Características	BPAF	Diagonal	Radial
Marca	Trelleborg	Goodyear	Goodyear
Modelo	Twin 414	Dyna Torque II	DT 820
Dimensões	600/60-38	23.1-30	23.1 R 30
Número de lonas	8	12	8
Tração	R1	R1	R1
Profundidade das garras	0,05 m	0,04 m	0,055 m

Utilizou-se ainda:

- um compressor de ar marca Schulz, modelo Mundial, com produção de 0,28 m<sup>3</sup>/min e reservatório com capacidade para 0,175 m<sup>3</sup>, equipado com motor elétrico de 2 hp, e;
- um calibrador de pneus marca Flaig, para até 380 kPa (55 psi).

### 5.1.3 Determinação do centro de gravidade

A determinação do centro de gravidade (CG) do trator Massey Ferguson MF299 e do implemento (arado de discos), necessários para a determinação da pressão de contato pneu-solo, foi realizada também no Laboratório de Mecânica do Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agrícolas (NEMPA). Para tanto, utilizou-se:

- calços de madeira;
- um pórtico equipado com talha marca Koch, modelo SC3, com capacidade de elevação de 3 ton e altura de 3m;



- trena de 30 m, subdivisões de 0,01m;
- balança eletrônica com capacidade para 2.700 kg, precisão de 1 kg, equipada com quatro células de carga modelo 1DB com saída de 0,450 mV/V e caixa de comando eletrônico, fabricada por J-Star Industries, Inc. (Wisconsin, E.U.A), modelo EZ150, comercializada por Casale Equipamentos Ltda.

#### 5.1.4 Área experimental

Foi conduzido um ensaio na pista de testes do NEMPA, localizada na FCA-UNESP, com latitude de 22°50' Sul, longitude de 48°25' Oeste e altitude média de 770 m. O solo da área foi classificado como Latossolo Roxo (Carvalho et al., apud Cordeiro, 2000).

O resultado da análise física do solo, realizado no Laboratório de Física de Solos do Departamento de Engenharia Rural da FCA-UNESP, assim como do teor de matéria orgânica, realizado pelo Departamento de Solos da FCA-UNESP estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3: Resultados das análises físicas, média de quatro repetições.

Parâmetro analisado	Profundidade (m)		Unidade
	0 - 0,15	0,15 - 0,30	
Teor de argila	0,505	0,510	kg.kg <sup>-1</sup>
Teor de areia	0,450	0,450	kg.kg <sup>-1</sup>
Teor de silte	0,045	0,040	kg.kg <sup>-1</sup>
Limite de liquidez	0,3114	0,3093	kg.kg <sup>-1</sup>
Limite de plasticidade	0,2210	0,2211	kg.kg <sup>-1</sup>
Índice de plasticidade	0,0904	0,0882	kg.kg <sup>-1</sup>
Teor de água a -100 kPa	0,1895	-	kg.kg <sup>-1</sup>
Teor de matéria orgânica	20,0	18,5	g.dm <sup>-3</sup>

#### 5.1.5 Máquinas e implementos agrícolas

Nas diversas atividades de campo, foram utilizados os seguintes tratores e implementos, cujas características principais foram obtidas nos catálogos dos fabricantes:

- Trator marca Ford New Holland, modelo 5030 TR, potência de 55,2 kW no motor (75 cv), tração 4 x 2 TDA, pneus traseiros R1 18.4-30 e dianteiros R1 12.4-24, utilizado para transporte de água para irrigação e pulverização.

- Trator marca Massey Ferguson, modelo 265, potência de 47,9 kW no motor (65 cv), tração 4 x 2 TDA, pneus traseiros R1 18.4-30 e dianteiros R1 12.4-24, utilizado para preparo do solo com enxada rotativa.

- Trator marca Massey Ferguson, modelo 275, potência de 56,6 kW no motor (77 cv), tração 4 x 2, pneus traseiros R1 18.4-30 e dianteiros 6.50-16, utilizado para transporte de água para irrigação.

- Trator marca Massey Ferguson, modelo 299, potência de 92,6 kW no motor (126 cv), tração 4 x 2 TDA, pneus traseiros R1 18.4-34 e dianteiros R1 14.9-24, utilizado para preparo do solo com escarificador, grade aradora, grade intermediária e grade niveladora, transporte de água para irrigação, tracionar os rolos compactadores e efetuar o tráfego na área experimental.

- Trator marca SLC-John Deere, modelo 6600, potência de 89,0 kW no motor (121 cv), tração 4 x 2 TDA, pneus de baixa pressão e alta flutuação, sendo os traseiros R1 700/55-34 8 P.R. e dianteiros R1 500/60-26.5 6 P.R., utilizado para transporte e bombeamento de água para irrigação e para levantamento de dados de resistência à penetração e recalque do solo.

- Trator marca Valmet, modelo 128, potência de 90,5 kW no motor (123 cv), tração 4 x 2 TDA, pneus traseiros R1 18.4-34 e dianteiros R1 14.9-26, utilizado para transporte de água para irrigação.

- Escarificador marca Jan, modelo Jumbo Matic JM-7/7, de arrasto, com acionamento hidráulico pelo controle remoto, sete hastes parabólicas com ponteiros reversíveis com 0,05m de largura, equipado com discos de corte de

0,457m (18") de diâmetro à frente das hastes e rolo destorroador na parte posterior do equipamento.

- Grade niveladora marca Marchesan, modelo GNL/32, de arrasto, com acionamento hidráulico pelo controle remoto, 32 discos de 0,508 m (20") de diâmetro, com bordas recortadas à frente e bordas lisas atrás.

- Pulverizador de barras, marca Jacto, modelo Condor M12, montado, barra de 12 m de largura com 24 bicos tipo jato em leque modelo 10003 espaçados de 0,50 m, tanque com capacidade de 0,60 m<sup>3</sup>, utilizado no controle de ervas invasoras.

- Distribuidor de esterco líquido marca Fertilance, modelo 4000 BL, equipado com bomba lobular reversível com vazão de até 1000 l/min, utilizado para transporte e bombeamento de água para irrigação.

- Duas carretas-tanque montada em chassi com quatro rodas, capacidade para 3,0 m<sup>3</sup> cada, sem marca e modelo aparentes, utilizadas no transporte de água para irrigação.

- Distribuidor de esterco líquido marca Nogueira, capacidade para 3,5 m<sup>3</sup>, equipado com bomba pneumática para carga e descarga, utilizado para transporte de água para irrigação.

- Grade aradora de arrasto, marca Tatu, levante hidráulico pelo controle remoto, 10 discos com diâmetro de 0,86 m (34").

- Grade intermediária de arrasto, marca Tatu, levante hidráulico pelo controle remoto, 20 discos de 0,71 m (28").

- Grade niveladora de arrasto, marca Tatu, levante hidráulico pelo controle remoto, 32 discos de 0,46 m (18").

- Enxada rotativa marca Cemag, modelo MS70, com 28 enxadas tipo C (veloz), acionamento pela tomada de potência do trator, montada no sistema de levantamento hidráulico de três pontos.

- Rolo compactador marca Prata 1000 modelo triplo, composto por três rolos com diâmetro de 0,90 m e largura de 1,50 m contendo 0,8 m<sup>3</sup> de água em cada um, de arrasto, montados em tandem, utilizado para efetuar a compactação de uniformização das parcelas.

- Arado de discos montado no sistema hidráulico de três pontos, marca Jan, modelo AR-30, reversível com acionamento pelo controle remoto, 4 discos com diâmetro de 0,76 m (30").

#### **5.1.6 Componentes do Sistema de irrigação**

- Tubos de alumínio, diâmetro de 0,075m, comprimento de 6,0m, equipado com engate rápido.

- Válvulas de pé para aspersores com desarme automático, acoplável ao engate rápido de tubulação com diâmetro de 0,075 m, saída com diâmetro de 0,025 m.

- Tubos de subida, diâmetro 0,025 m e comprimento de 0,50 m.

- Aspersores marca Agropolo, modelo NY 30°, saídas de 4,9x 6,2 mm.

- Tampão para tubulação, diâmetro 0,075 m.

- Registro de linha, diâmetro 0,075 m.

- Mangueira flexível, diâmetro de 0,10 m, comprimento 6m, com adaptadores para a carreta Fertilance e para engate rápido do tubo de alumínio.

#### **5.1.7 Determinação do teor de água no solo**

As amostras deformadas foram coletadas utilizando-se enxadão e pá ou amostrador hidráulico, régua graduada de 0,30 m e um balde plástico. As amostras foram acondicionadas em latas de alumínio com tampa, contendo numeração de identificação.

No laboratório, utilizou-se:

- estufa de secagem marca Fanem, modelo 315 SE, regulada para temperaturas entre 105 1 110 °C, e

- balança eletrônica marca Mettler, modelo P-1200, capacidade para 1200 g, subdivisões de 0,1 g.

### 5.1.8 Coleta de amostras indeformadas

Foi construído um amostrador para a coleta de amostras indeformadas de solo utilizando-se anéis de aço inoxidável com dimensões aproximadas de 0,025 m de altura e 0,069 m de diâmetro (Figura 16).



Figura 16: Equipamento especialmente construído para coleta de amostras indeformadas de solo, tendo-se, da esquerda para a direita, um anel, a ferramenta porta-anéis com borda inferior cortante e o conjunto de percussão.

### 5.1.9 Sistema de aquisição de dados

Para a aquisição dos valores de resistência do solo à penetração, recalque e controle da carga no consolidômetro, foi utilizado um sistema de aquisição de dados fabricado por Campbell Scientific, Inc. (Logan, Utah, E.U.A.), modelo CR23X Micrologger.

Com a finalidade de elaboração dos programas, bem como para controlar a comunicação entre o micrologger e um microcomputador via interface serial RS232-C, para transferência de programas e dados, utilizou-se o sistema computacional PC208W, fornecido pela própria Campbell Scientific, Inc..

#### **5.1.10 Sistema de posicionamento geográfico**

A referência geográfica do campo experimental foi realizada utilizando-se um sistema de posicionamento global diferencial marca Trimble, modelo AgGPS132, com precisão sub-métrica, equipado com antena dupla para correção do sinal em tempo real (OmniSTAR) e barra de luzes para navegação em faixas.

#### **5.1.11 Outros sensores utilizados**

- Célula de carga marca Interface, modelo ST 5K, com capacidade para 50.000 N.
- Cronômetro digital marca Citizen, com precisão de 0,01 s.
- Micrômetro de deslocamento linear marca Kyowa, modelo DT-200, com capacidade para 20 mm e precisão de 0,005 mm.
- Potenciômetro marca Helipot, fabricado por Beckman Instruments Inc., modelo 7221, com variação de 0 a 20 k $\Omega$ .
- Termômetro de mercúrio com escala de -10 a 210 °C, subdivisões de 1 °C, marca INCOTERM.

#### **5.1.12 Consolidômetro**

Para a construção do consolidômetro mostrado na Figura 33, utilizou-se os seguintes componentes principais:

- Cilindro pneumático, diâmetro da haste 0,038m, curso de 0,084m, área atuante de 0,02 m<sup>2</sup>.
- Processador de ar comprimido com válvula reguladora de pressão incorporada, sistema de filtragem por centrifugação, injetor de óleo lubrificante com regulador de vazão, copos em nylon transparente, filtro para retenção de partículas maiores que 5 µm, pressão de entrada até 965,3 kPa (140 psi), marca Univer, equipado com manômetro com capacidade até 1034,2 kPa (150 psi), marca Festo.
- Válvula reguladora de pressão de ar, entrada até 1034,2 kPa (150 psi), intervalo de saída entre 6,9 e 413,7 kPa (1 a 60 psi), marca Norgren, modelo 11-018-100, equipada com manômetro Wika em banho de glicerina, capacidade entre 0 e 206,8 kPa (0 a 30 psi).
- Válvula reguladora de pressão de ar, entrada até 1034,2 kPa (150 psi), intervalo de saída entre 0,1 e 827,4 kPa (1 a 120 psi), equipada com manômetro Wika em banho de glicerina, capacidade para 965,3 kPa (140 psi), marca Univer, modelo Regulator.
- Válvula direcionadora anti-retorno, automática, 3/2 vias, marca Univer, modelo HZ1R 08-10-15-G-N.
- Válvula direcional de acionamento manual por alavanca, 3/2 vias.
- Válvula direcional de acionamento manual por botão giratório, 5/2 vias.
- Válvulas reguladoras de vazão, marca UNIVER, modelo AM5063.
- Base para amostras, diâmetro externo 0,12 m, diâmetro interno 0,112 m, altura externa 0,03 m e altura interna 0,015 m, construída em alumínio.

- Placas porosas, diâmetro 0,069 m, altura 0,005 m, construídas em bronze sinterizado.

## 5.2 Métodos

### 5.2.1 Coeficiente de deformação e largura do pneu

Coeficiente de deformação ( $C_d$ ) de um pneu é definido como a carga necessária (N) para que ele sofra uma deformação equivalente a 1 mm, sendo que seu valor, para cada tipo ou tamanho de pneu, pode ser obtido por medições em superfície rígida.

Para o ensaio, utilizou-se uma prensa hidráulica para o fornecimento de carga ao pneu, e uma balança eletrônica com capacidade para 2.700 kg. Sobre a balança, foi acoplada uma caixa de madeira contendo uma camada de massa de gesso e óleo de linhaça, que se constituiu na superfície plana e rígida para o ensaio dos pneus. Após a aplicação da carga pelo pistão hidráulico, a área de contato ficava gravada na camada de massa (Santos e Lanças, 1999; Mazetto e Lanças, 2000).

A carga de 1.000N foi considerada como referência para as demais medidas realizadas. A estrutura utilizada para os ensaios é apresentada na Figura 17.





Figura 17: Vista frontal (a) e lateral (b) da prensa de ensaios estáticos de pneus e pneus utilizados.

Os valores da largura de cada pneu a cada carga e pressão de inflação foram medidos indiretamente, na marca deixada pelo pneu na camada de massa colocada sobre a superfície rígida.

Os valores de  $C_d$  foram calculados para cada intervalo de carga e os resultados submetidos a análise de regressão linear múltipla utilizando-se o programa Estat considerando-se como variável dependente o coeficiente de deformação e como variáveis independentes a pressão de inflação do pneu e a carga exercida pelo pneu na superfície rígida da balança.

### 5.2.2 Interação pneu-solo

A Figura 18 mostra a geometria da interação de um pneu deformável de raio estático  $r$ , submetido a uma carga vertical  $W$  em um solo não rígido, de acordo com Schwanghart, 1990.

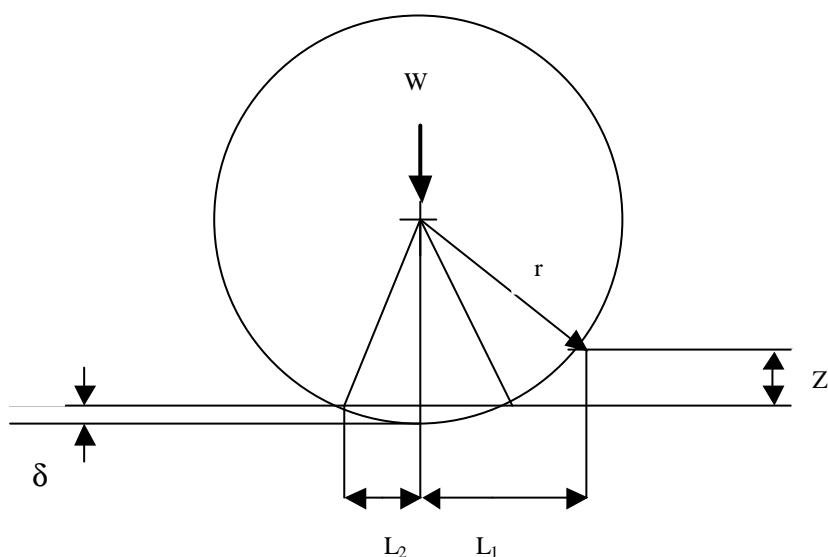


Figura 18: Geometria de um pneu incluindo o recalque do solo ( $Z$ ) e a deflexão do pneu ( $\delta$ ).

Pela trigonometria, tem-se:

$$r^2 = L_1^2 + (r - \delta - Z)^2, \quad \text{ou} \quad (27)$$

$$L_1 = [ 2 \cdot r \cdot (Z + \delta) - (Z + \delta)^2 ]^{1/2}, \quad \text{e} \quad (28)$$

$$r^2 = L_2^2 + (r - \delta)^2, \quad \text{ou} \quad (29)$$

$$L_2 = [ 2 \cdot r \cdot \delta - \delta^2 ]^{1/2}, \quad \text{então} \quad (30)$$

$$L = L_1 + L_2 = [ D \cdot (Z + \delta) - (Z + \delta)^2 ]^{1/2} + [ D \cdot \delta - \delta^2 ]^{1/2} \quad (31)$$

sendo  $D$  o diâmetro do pneu sem carga ( $D = 2 \cdot r$ ).

A deformação do pneu ( $\delta$ ) é determinada utilizando o coeficiente de deformação ( $C_d$ ) a dada pressão de inflação ( $p_i$ ), assumindo, de acordo com Schwanghart, 1990, que 80% da carga total  $W$  atua na área deformada do pneu:

$$\delta = 0,8 \cdot W / C_d \quad (32)$$

Sendo  $k_c/b + k\phi = k$ , temos que,

$$Z = (p / k)^{1/n} \quad (33)$$

onde,

$$p = W / A \text{ (kPa)}$$

$Z$  = recalque no solo (mm)

Introduzindo o termo Coeficiente de Elipticidade ( $\beta$ ), a área de contato pneu-solo ( $A$ ) será:

$$A = b \cdot L \cdot \beta \quad (34)$$

O Coeficiente de Elipticidade ( $\beta$ ) terá valor de  $\pi/4$  se a área de contato pneu-solo for uma elipse perfeita.

A relação da carga aplicada ( $W$ ) e a carga avaliada ( $W_{rated}$ ) em percentagem ( $l_w$ ) devido à  $p_i$  é necessária para calcular a variação na largura do pneu ( $b$ ):

$$l_w = (W / W_{rated}) \cdot 100 \quad (35)$$

Assim,

$$b = b_0 + b_1 \cdot l_w/100 \quad (36)$$

onde,

$b_1 = 0,03$  a  $0,05$  m (Schwanghart, 1990).

A solução para o cálculo da área de contato pneu-solo ( $A$ ) e, conseqüentemente, da pressão de contato pneu-solo ( $p$ ) pode ser resolvida por um processo iterativo, atribuindo-se valores variáveis ao recalque ( $z$ ) no solo, efetuando-se os cálculos e comparando-se o resultado com o valor atribuído até que a diferença seja mínima.

### **5.2.3 Metodologia experimental**

O ensaio de campo constou de quatro tratamentos, a saber: tráfego por um trator MF299, tração 4 x 2 TDA, equipado com pneus traseiros R1 18.4-34 com um implemento (arado de discos com peso total de 8.440 N) suspenso no sistema hidráulico de três pontos trafegando na área um, dois, quatro e seis dias após uma chuva ou irrigação, em quatro repetições em local com a mesma condição inicial.

As parcelas foram dispostas de forma a permitir a utilização do trator, instrumentado para o levantamento dos dados de índice de cone, recalque e coleta de amostras, com os pneus passando externamente à parcela. A passagem do trator para a aplicação de tráfego foi realizada com um dos conjuntos de pneus, esquerdo ou direito, passando ao centro da mesma.

Utilizou-se parcelas com 16 m de comprimento, subdivididas em cinco segmentos de três metros e um segmento de um metro. O segmento de um metro foi localizado entre o terceiro e o quarto segmento de três metros. Em cada segmento de três metros, determinou-se a resistência à penetração e o recalque antes e após o tráfego e, no segmento de um metro, coletou-se amostras indeformadas, também antes e após o tráfego, com a finalidade de determinar a pressão de preconsolidação. Entre um bloco e outro manteve-se uma área de manobras de 10 m.

Foram coletadas amostras de solo para as análises físicas e químicas nas profundidades de 0 a 0,15 e de 0,15 a 0,30m em cada um dos blocos.

Cada amostra composta originou-se de sub-amostras coletadas nas extremidades de cada parcela, totalizando oito sub-amostras por bloco.

#### **5.2.4 Preparo inicial do solo**

A área foi escarificada a 0,30 m de profundidade, gradeada com grade pesada a uma profundidade de mais ou menos 0,20 m e, posteriormente, com grade niveladora a uma profundidade de mais ou menos 0,15 m. Devido a grande quantidade de torrões remanescentes, fez-se novo preparo com enxada rotativa a 216 rotações por minuto a  $2 \text{ km.h}^{-1}$  e nova gradagem com grade niveladora.

#### **5.2.5 Controle do teor de água e instalação do ensaio**

A seguir, a área recebeu uma irrigação com uma lâmina d'água de mais ou menos 46 mm e, 3 dias após, gradagem com uma grade intermediária (Figura 19) e novo preparo com enxada rotativa (Figura 20) com rotação de 216 rpm a  $2 \text{ km.h}^{-1}$ .



Figura 19: Trator MF299 executando gradagem na área experimental.



Figura 20: Trator MF265 executando preparo final com enxada rotativa na área experimental.

No mesmo dia em que foi realizado o preparo com enxada rotativa, foi efetuada uma compactação de uniformização, utilizando-se os rolos compactadores montados em tandem (Figura 21), tracionados por trator MF299 a  $4,5 \text{ km.h}^{-1}$ . Em seguida, as parcelas foram marcadas com estacas de madeira e coletadas amostras de solo nas profundidades de 0 a 0,15 e de 0,15 a 0,30 m para a determinação do teor de água.



Figura 21: Compactação de uniformização da área experimental.

Após a instalação, a área experimental recebeu ainda duas irrigações com lâminas de 20 e de 43mm. A Figura 22 apresenta uma vista geral do ensaio instalado, mostrando a disposição da linha de irrigação situada no centro da área.

### 5.2.6 Sistema de irrigação

Foi instalado uma linha de irrigação no centro da área experimental, com oito aspersores distanciados de 12 metros, sendo a água bombeada para o sistema de irrigação por uma carreta aplicadora de fertilizantes líquidos, instalada na pista a jusante daquela onde foi instalado o ensaio, e a água transportada por tratores com carretas-tanque, conforme pode ser observado na Figura 23.





Figura 22: Vista da área experimental sendo preparada para o ensaio de campo.



Figura 23: Aspecto do transporte e bombeamento de água para irrigação do ensaio (foto maior) e dos aspersores em funcionamento (foto menor).



### 5.2.7 Índice de cone e recalque

Foi construído um equipamento hidráulico-eletrônico (figura 26) acoplado diretamente ao trator para o levantamento destes dados. Utilizou-se ferramentas intercambiáveis, cujas dimensões são apresentadas no Quadro 4. Para facilitar a troca das ferramentas, estas foram dotadas de um sistema de engate rápido.

Quadro 4: Ferramentas intercambiáveis utilizadas para o levantamento de dados de campo.

Descrição da ferramenta	Dimensões
Prato número um	0,075 x 0,20 m
Prato número dois	0,09 x 0,18 m
Prato número três	0,10 x 0,15 m
Amostrador de solo	0,02 m de diâmetro e 0,60 m de comprimento
Cone para resistência à penetração	0,02027 m diâmetro da base, ângulo sólido da ponteira de 30°.

Em cada segmento de parcela, foram coletados dados com as ferramentas 1 a 3 e 5 antes e após o tráfego do trator no dia de aplicação do tratamento.

O incremento nos valores do índice de cone (IC) devido ao tráfego foram calculados pela relação entre a diferença dos valor do IC (após o tráfego e antes do tráfego) e o valor do IC antes do tráfego, transformado em percentagem.

Os dados foram processados utilizando-se programa específico (Castro Neto et al., 1999a) e os gráficos foram elaborados com o auxílio da planilha eletrônica Excel.

### 5.2.8 Amostras de solo

As amostras indeformadas foram coletadas na profundidade de 0,025 a 0,05m com a finalidade de determinação da pressão de preconsolidação. As amostras coletadas no campo foram embaladas em folhas de alumínio e acondicionadas em caixa de isopor. Posteriormente, no laboratório, foram niveladas com as bordas do anel utilizando-se uma lâmina afiada (canivete).

Foram coletadas também amostras deformadas para determinação do teor de água em diversas fases do ensaio, em cada segmento de parcela utilizado para o levantamento dos dados, nas profundidades de 0 a 0,15 e de 0,15 a 0,30 m.

A determinação do teor de água foi realizada pesando-se as amostras em balança eletrônica com precisão de 0,01 g, colocadas para secar em uma estufa regulada para 105°C. As amostras foram novamente pesadas após a secagem por 24 horas, obtendo-se o teor de água por diferença, considerando-se a tara das latas.

### 5.2.9 Pressão de preconsolidação

Foi construído um consolidômetro pneumático-eletrônico (Figura 33) para a realização dos ensaios de adensamento uniaxial.

As amostras indeformadas de solo foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial com aplicação de pressões estáticas de 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, com leituras no defletômetro aos 15; 30; 60; 120; 240; 480 e 900 segundos, inicialmente, utilizando uma escala com subdivisões de 5  $\mu\text{m}$ .

O tempo final de cada carregamento foi determinado em pré-testes, considerando-se a ocorrência de 90% da deformação, segundo a metodologia da raiz quadrada do tempo, apresentada por Taylor, apud Holtz e Kovacs (1981). Para tanto, ajustou-se uma reta a partir dos três primeiros pares de dados da leitura do defletômetro no eixo das ordenadas e da raiz quadrada do tempo no eixo das

abscissas, projetando esta linha para tempo igual a zero. A partir deste ponto, é traçada uma segunda linha com todos os valores da abscissa 1,15 vezes maior que os valores correspondentes na primeira linha. A interseção desta segunda linha com a curva dos pontos obtidos no ensaio define o tempo no qual ocorreu 90% da deformação da amostra.

A pressão de preconsolidação foi determinada pelo método de Dias Júnior e Pierce (1995) e a simulação dos diferentes teores de água foi realizada saturando-se as amostras indeformadas e secando-as por evaporação lenta em ambiente de laboratório.

Os ensaios de compressão uniaxial realizados com as amostras indeformadas coletadas antes do tráfego foram agrupados em cinco classes de teor de água.

Após o tráfego, foram coletadas amostras indeformadas em três repetições por parcela, as quais foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial procurando-se realizar os ensaios com pequena variação no teor de água.

#### **5.2.10 Determinação dos centros de gravidade**

Os cálculos do centro de gravidade do trator MF 299 e do arado foram executados de acordo com a NBR 12567 (ABNT, 1992).

As Figuras 24 e 25 mostram parte do processo de determinação dos parâmetros necessários ao cálculo da posição do centro de gravidade do trator e do arado, respectivamente.

Para a determinação dos parâmetros do implemento, tomou-se por base os pinos de engate inferiores na parte anterior e a roda-guia na parte posterior.

#### **5.2.11 Análises estatísticas**

As análises estatísticas foram realizadas segundo o delineamento em blocos casualizados e, quando a análise de variância apresentou

diferenças entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. As equações de regressão foram geradas com o auxílio da planilha eletrônica Excel ou por programas de computador desenvolvidos utilizando-se programação estruturada em linguagem clipper 5.x.



Figura 24: Vista parcial da determinação dos parâmetros necessários ao cálculo da posição do centro de gravidade do trator.

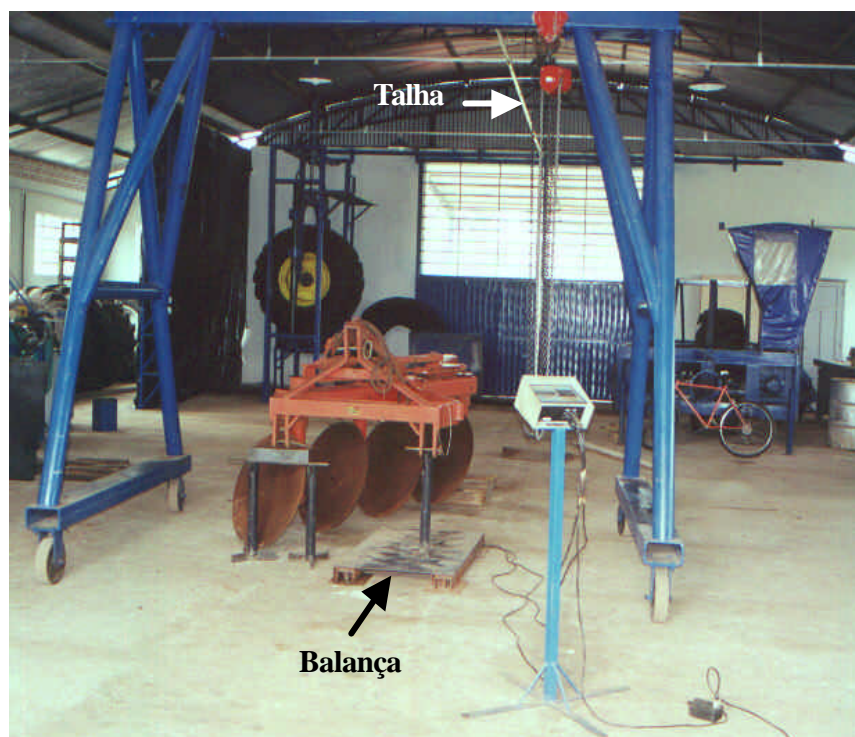


Figura 25: Determinação do peso do arado, tomado no pino de engate dianteiro esquerdo, objetivando a determinação do centro de gravidade do implemento.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Construção e calibração de equipamento hidráulico-eletrônico

Foram construídas duas estruturas acopláveis à parte traseira do trator SLC-John Deere, com a finalidade de instalação dos equipamentos necessários à coleta de amostras e levantamento de dados de resistência à penetração e recalque do solo em campo, tomando-se por base o penetrômetro hidráulico-eletrônico desenvolvido por Santos, 1998.

Nestas estruturas foram instalados:

- O sistema de aquisição de dados (micrologger);
- Um sistema hidráulico de duplo comando, com 0,05 m de diâmetro da haste e curso de 0,60 m ;
- Uma válvula direcional de três vias de acionamento manual por meio de uma manopla;
- Uma válvula reguladora de vazão, instalada no circuito hidráulico com o objetivo de regular a velocidade de avanço do pistão;
- Uma célula de carga com capacidade de 50.000 N;
- Sistemas de engate rápido, sendo fêmea na extremidades da célula de carga e macho na extremidade das ferramentas (Figura 29). A célula de carga foi acoplada na haste do pistão por meio de um engate rosqueável.
- Um sistema para medir o deslocamento do pistão hidráulico, desenvolvido por Santos, 1998.

A Figura 26 mostra a estrutura montada sem a instrumentação (a) e com a instrumentação necessária ao trabalho (b) e, a Figura 29, as ferramentas utilizadas no sistema, mostrando o detalhe do engate rápido macho.

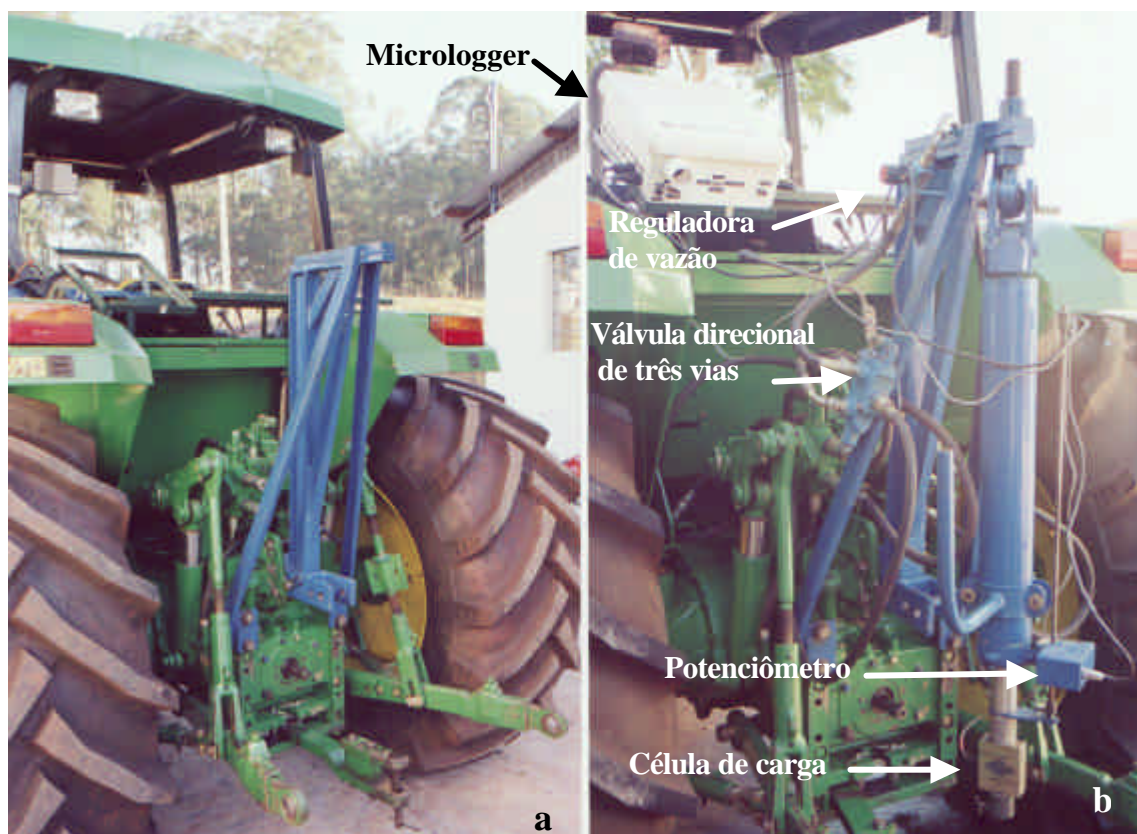


Figura 26: Estrutura porta-ferramentas sem a instrumentação (a) e com parte da instrumentação (b).

A célula de carga foi calibrada em confronto com um equipamento para ensaios de tração e compressão computadorizado, marca EMIC, modelo DL10000, equipado com célula de carga recentemente calibrada pelo INMETRO, encontrando-se o valor de 4.968,7 para o multiplicador (multiply) a ser utilizado no sistema de aquisição de dados, e  $-83,493$  para o offset, conforme pode ser observado na Figura 27.

O potenciômetro foi calibrado medindo-se o deslocamento com uma trena de aço, obtendo-se um valor de 0,2035 para o multiply e  $-100$  para o offset.

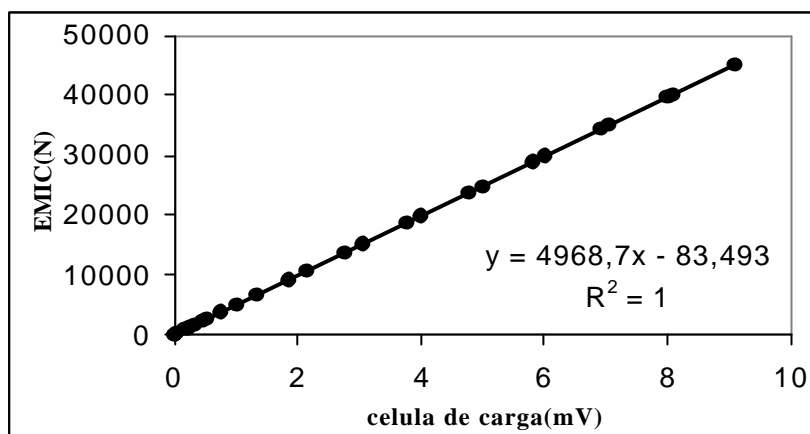


Figura 27: Curva de calibração da célula de carga de 50.000 N.

A velocidade de deslocamento do pistão foi calibrada utilizando-se um cronômetro digital e a válvula reguladora de vazão até que a velocidade de deslocamento fosse de mais ou menos 1,83 m/min para a utilização como penetrômetro de cone (ASAE, 1999b) ou de 0,9 m/min para a utilização como módulo de recalque.

A ação do pistão provoca um deslocamento vertical do conjunto trator-instrumentos que também é medido pelo potenciômetro. Executou-se então um ensaio em superfície de concreto com a finalidade de determinar a equação de correção da profundidade da ferramenta em função da carga exercida pelo sistema, conforme pode ser observado na Figura 28.

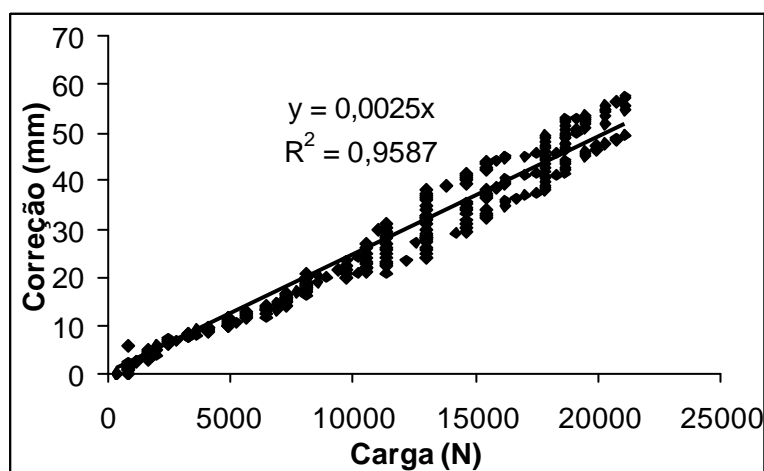




Figura 28: Correção do deslocamento vertical do sistema trator-instrumentos em função da carga aplicada pelo pistão hidráulico.

As ferramentas utilizadas no sistema são apresentadas na Figura 29 a seguir.

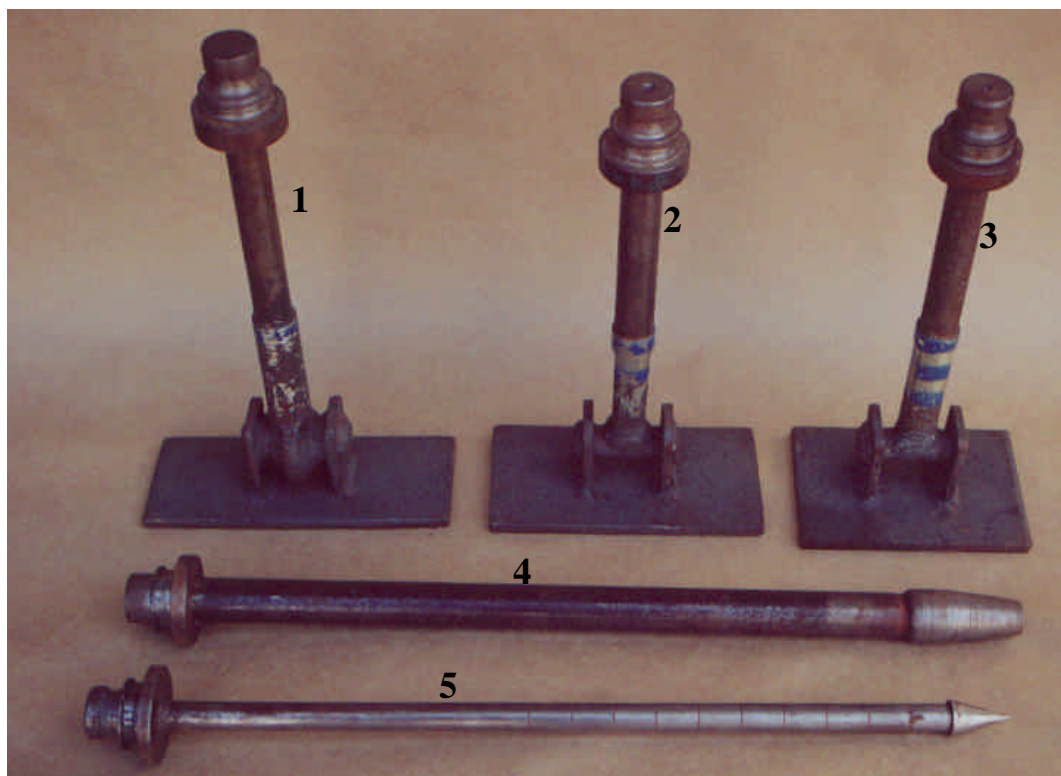


Figura 29: Ferramentas utilizadas para a determinação do recalque (1 a 3), para retirada de amostras deformadas de solo (4) e para determinação da resistência à penetração (5).

Foi desenvolvido um programa para o sistema de aquisição de dados com a finalidade de gravar as informações de profundidade e carga a cada 0,3 s, ou seja, 3,33 Hertz. Na Figura 30 é apresentado o fluxograma utilizado para o desenvolvimento do programa.

Na mesma estrutura, foi instalado um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS), com a finalidade de efetuar a localização geográfica dos pontos amostrais, sendo desenvolvido uma nova rotina para a aquisição dos dados diretamente no micrologger. A Figura 31 mostra a instrumentação utilizada, assim como o microcomputador acoplado ao sistema de

aquisição de dados (micrologger) com a finalidade de transferir as informações para posterior processamento.

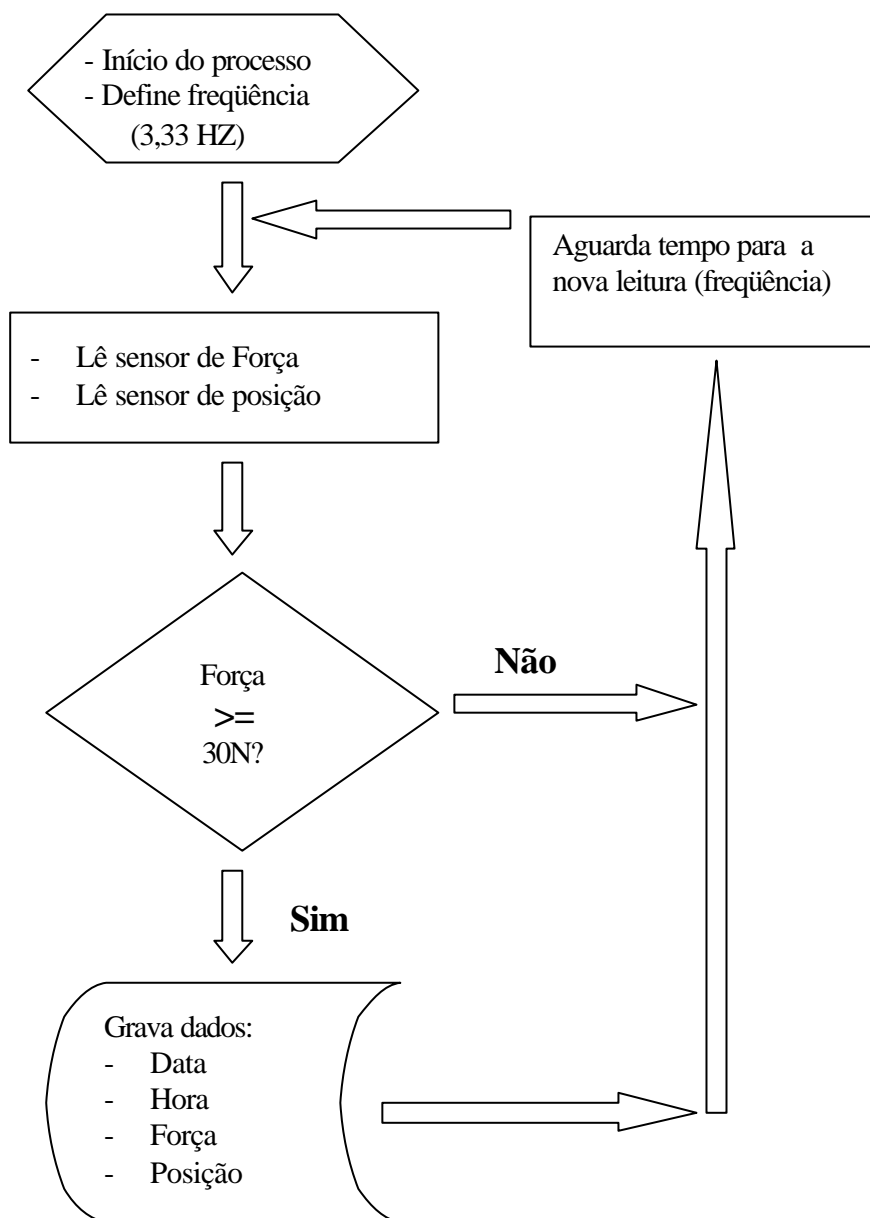


Figura 30: Fluxograma simplificado do programa utilizado no sistema de aquisição de dados.

Após cada coleta de dados, estes foram transferidos para um microcomputador portátil conectado ao sistema de aquisição por intermédio da

interface RS-232C, para posterior processamento. O processo de transferência de dados foi realizado pelo programa PC208W (Campbell Scientific, Inc.).

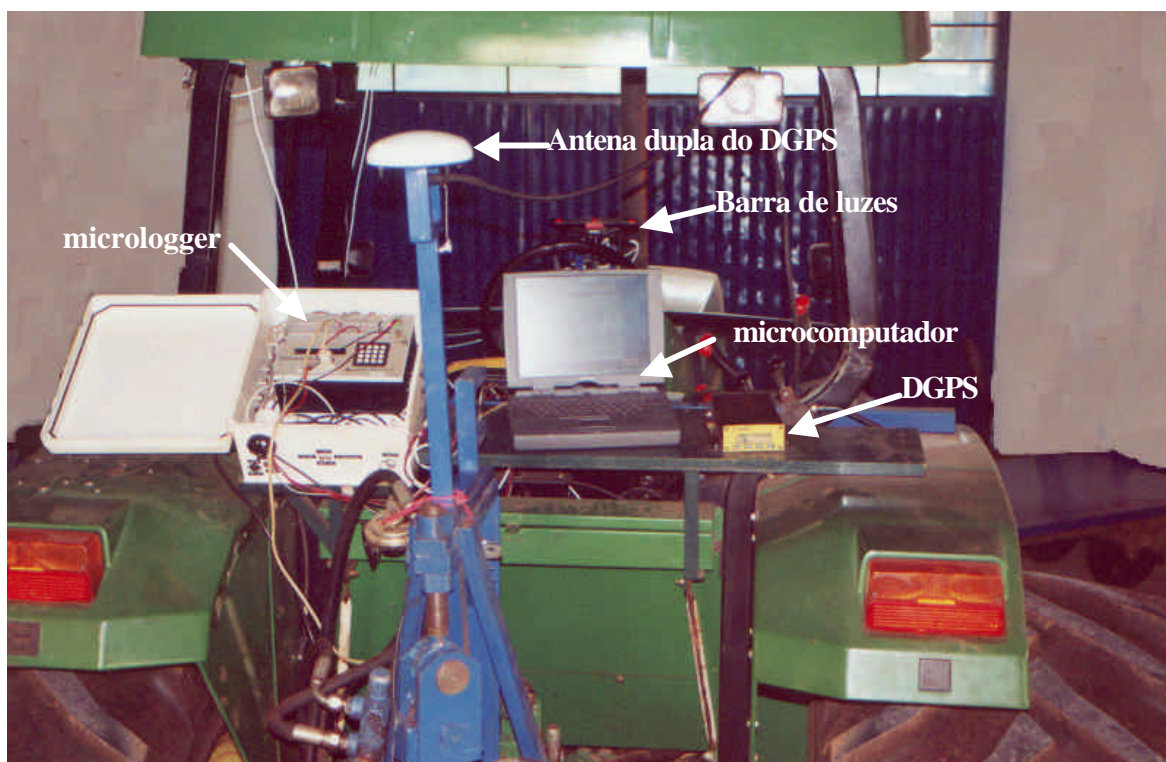


Figura 31: Instrumentação para coleta de dados de resistência à penetração, recalque e amostras de solo georeferenciados por DGPS.

Após transferidos para o microcomputador, os dados foram processados por um sistema informatizado (Castro Neto et al., 1999a), no qual foi gerado um arquivo texto no padrão ASCII, permitindo a transferência dos resultados para programas gráficos.

A Figura 32, gerada com a utilização do programa para confecção de mapas Surfer (Gold Software, Inc.), versão 5.01, mostra a posição geográfica da pista, assim como a área ocupada pelo ensaio.

O sistema construído e utilizado no ensaio de campo mostrou-se ágil e adequado à finalidade proposta, não apresentando problemas mecânicos, hidráulicos ou eletrônicos durante o período de testes ou de utilização nos ensaios.

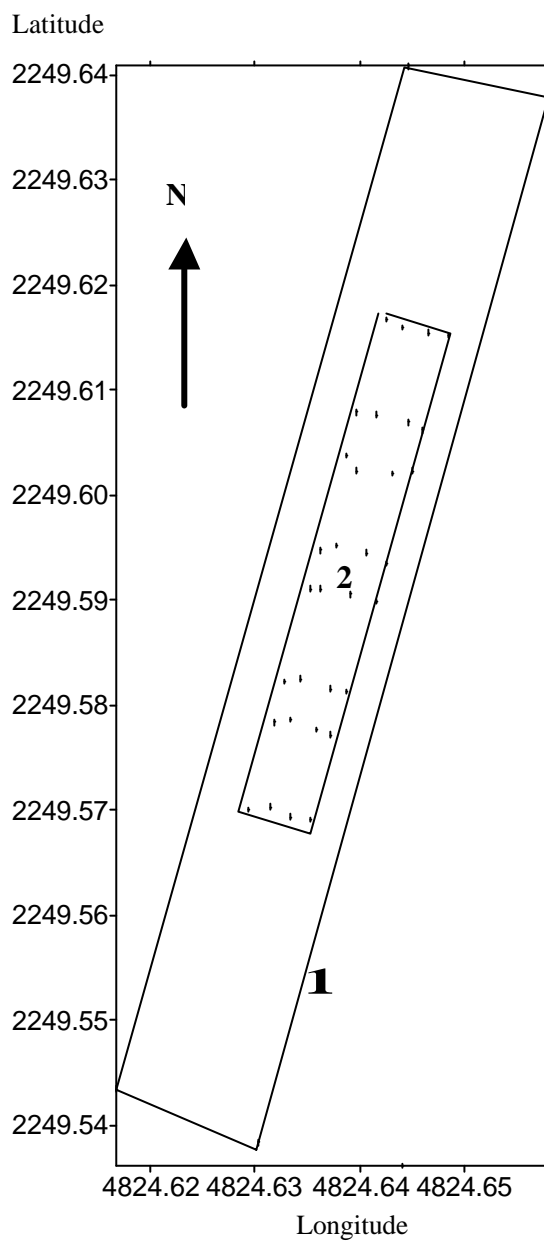


Figura 32: Localização geográfica da pista de ensaios utilizada (1) e localização do ensaio na pista (2), em graus, minutos e centésimos de minutos.

## 6.2 Compressão uniaxial (consolidômetro)

A fim de possibilitar a realização dos ensaios de compressão uniaxial, foi projetada e construída uma prensa de acionamento pneumático, utilizando como sensores uma célula de carga com capacidade para 50.000N e um

micrômetro de deslocamento linear, conectados aos sistema de aquisição de dados (micrologger), e um cronômetro digital para o controle do tempo da cada carga atuando sobre a amostra.

O equipamento, mostrado na Figura 33, apresentou custo significativamente inferior (aproximadamente 40%) ao de um equipamento similar importado, foi construído com componentes adquiridos no mercado nacional, mostrando-se preciso para a finalidade a que foi destinado.

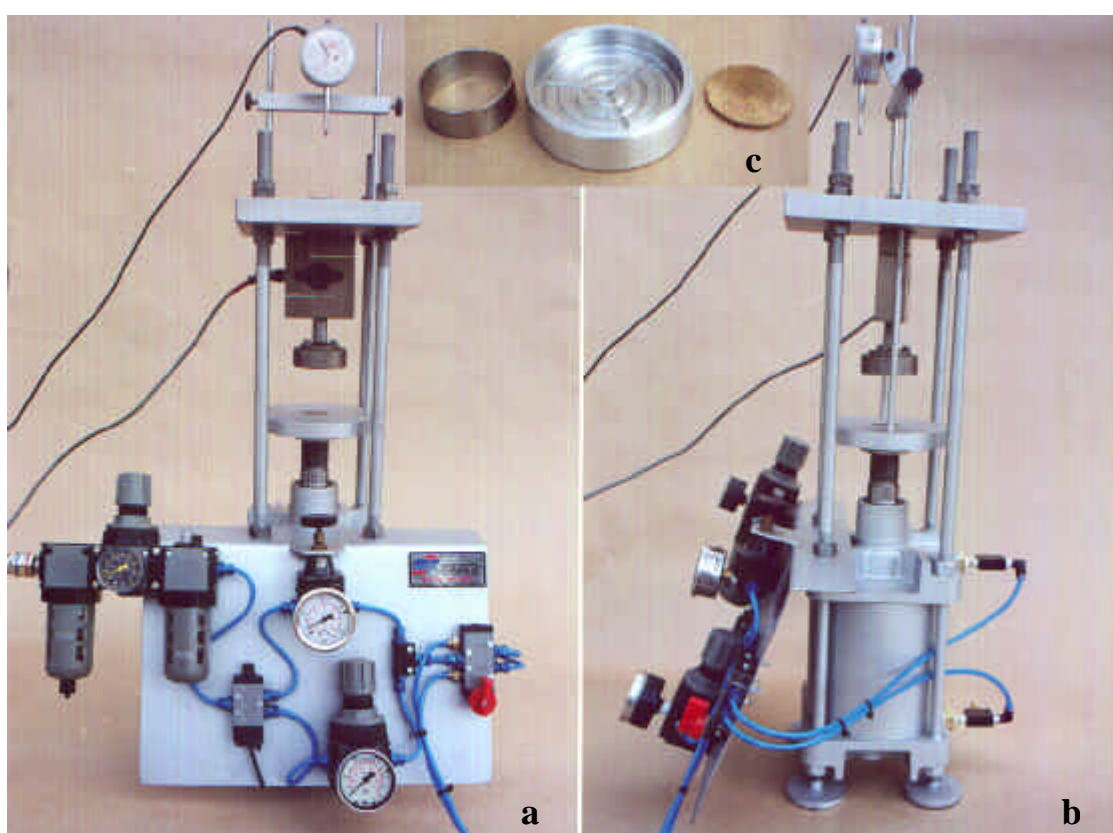


Figura 33: Vista frontal (a) e lateral (b) do consolidômetro, mostrando no detalhe (c), da esquerda para a direita, um anel, a base para amostras e uma placa porosa.

### 6.3 Coeficiente de deformação de pneus agrícolas

Foram realizadas análises de regressão múltipla tendo-se os valores do coeficiente de deformação como variável dependente e da carga exercida

e da pressão de inflação como variáveis independentes. A síntese das análises de variância são apresentadas no Quadro 5 e as equações de regressão no Quadro 6.

Quadro 5: Síntese das análises da variância da regressão múltipla para o coeficiente de deformação do pneu em função da carga exercida e da pressão de inflação do pneu.

Pneu	Graus de Liberdade		Quadrado Médio	F
	Regressã	Resídu		
	o	o		
BPAF	2	37	451856,60	58,5935**
Diagonal	2	37	187690,55	84,7433**
Radial	2	37	208486,22	74,8455**

\*\* - Significativo ( $P < 0,01$ ).

Quadro 6: Equações de regressão múltipla para o coeficiente de deformação ( $C_d$ ) em função da carga exercida ( $W$ ) e da pressão de inflação do pneu ( $p_i$ ).

Pneu	Equação de regressão	$R^2$
BPAF	$C_d = 31,4441 + 0,018497 \cdot W - 1,2220 \cdot p_i$	0,7600
Diagonal	$C_d = 50,9816 + 0,010069 \cdot W - 0,9994 \cdot p_i$	0,8208
Radial	$C_d = 76,8492 + 0,009040 \cdot W - 1,1872 \cdot p_i$	0,8018

Cada uma das equações representa uma família de retas, uma para cada valor da pressão de inflação. Observa-se na Figura 34 que o pneu de baixa pressão e alta flutuação deforma-se mais que os pneus diagonal e radial com o aumento da carga exercida pelo pneu em uma superfície rígida, sendo que estes últimos apresentam comportamento semelhante.

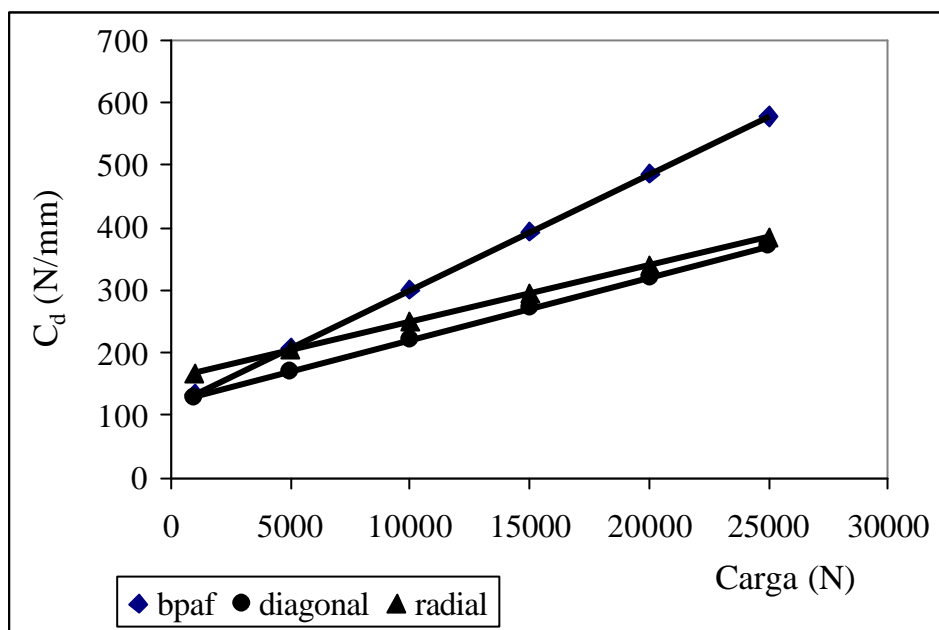


Figura 34: Variação dos coeficientes de deformação em função da carga exercida pelos pneus, calculados para a pressão de inflação de 68,9 kPa (10 psi).

#### 6.4 Largura dos pneus

A Figura 35 mostra a variação da largura relativa dos pneus, definida como a relação entre a largura de contato do pneu com uma superfície rígida e a largura nominal da seção do pneu, de acordo com a carga exercida, para as pressões de inflação de 68,9 kPa (10 psi) e 206,8 kPa (30 psi). A equação logarítmica foi a que melhor se ajustou aos dados para cada pressão de inflação, indicando a utilização do logaritmo da carga exercida na elaboração das regressões múltiplas.

Os Quadros 7 e 8 apresentam as análises da variância e as regressões múltiplas tendo como variável dependente a largura relativa (LR) e como variáveis independentes o logaritmo da carga e a pressão de inflação dos pneus.

As equações se ajustaram muito bem aos dados, como pode ser observado pelos valores dos coeficientes de determinação, apresentando-se como uma solução de uso mais simples em comparação com aquela apresentada por Schwanghart (1990), que considera um incremento de 0,03 a 0,05 m na largura

do pneu a cada vez que se aumenta em 100% a carga no pneu, sem indicar como determinou o valor para cada pneu.

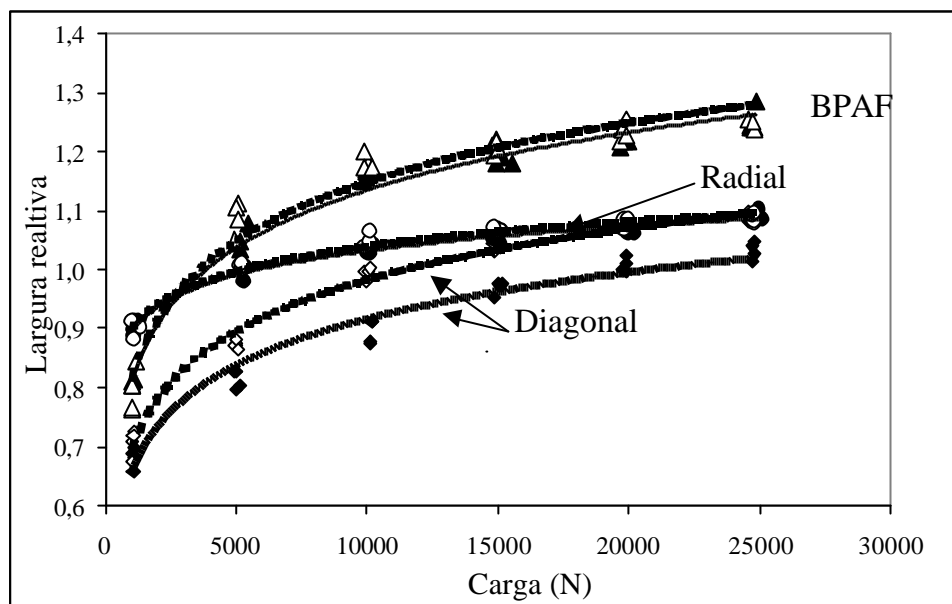


Figura 35: Largura relativa (largura efetiva/largura nominal) de pneu BPAF, diagonal e radial com pressão de inflação de 68,9 kPa (linhas tracejadas) e 206,8 kPa (linhas contínuas) em função da carga exercida na superfície.

Quadro 7: Síntese das análises da variância da regressão múltipla para a largura relativa em função da carga exercida e da pressão de inflação do pneu.

Pneu	Graus de Liberdade		Quadrado Médio	F
	Regressã	Resídu		
	o	o		
BPAF	2	45	0,5221	270,4462**
Diagonal	2	45	0,4142	967,6008**
Radial	2	45	0,0946	957,6673**

\*\* - Significativo ( $P < 0,01$ ).

Quadro 8: Equações de regressão múltipla para a largura relativa (LR) em função do logaritmo da carga exercida ( $\ln(W)$ ) e da pressão de inflação do pneu ( $p$ ).



Pneu	Equação de regressão	R <sup>2</sup>
BPAF	$LR = -0,112986 + 0,138105 \cdot \ln(W) - 0,000167 \cdot p_i$	0,9232
Diagonal	$LR = -0,089726 + 0,119833 \cdot \ln(W) - 0,000465 \cdot p_i$	0,9773
Radial	$LR = 0,486872 + 0,060374 \cdot \ln(W) - 0,000052 \cdot p_i$	0,9770

### 6.5 Teor de água do solo no ensaio de campo

A variação no teor de água no solo foi obtida pelo fornecimento de água por chuva ou irrigação e pela transferência de água do solo para a atmosfera pelo processo de evaporação. A Figura 36 mostra a variação dos fatores meteorológicos, coletados na Estação Climatológica Principal localizada no Departamento de Ciências Ambientais da FCA-UNESP, a mais ou menos 500 metros do local do ensaio, bem como o valor e data das irrigações efetuadas na área experimental.

Os valores médios de cinco amostras dos teores de água no solo para os tratamentos aplicados no ensaio são apresentados no Quadro 9 para as profundidades de 0 a 0,15 m e de 0,15 a 0,30 m.

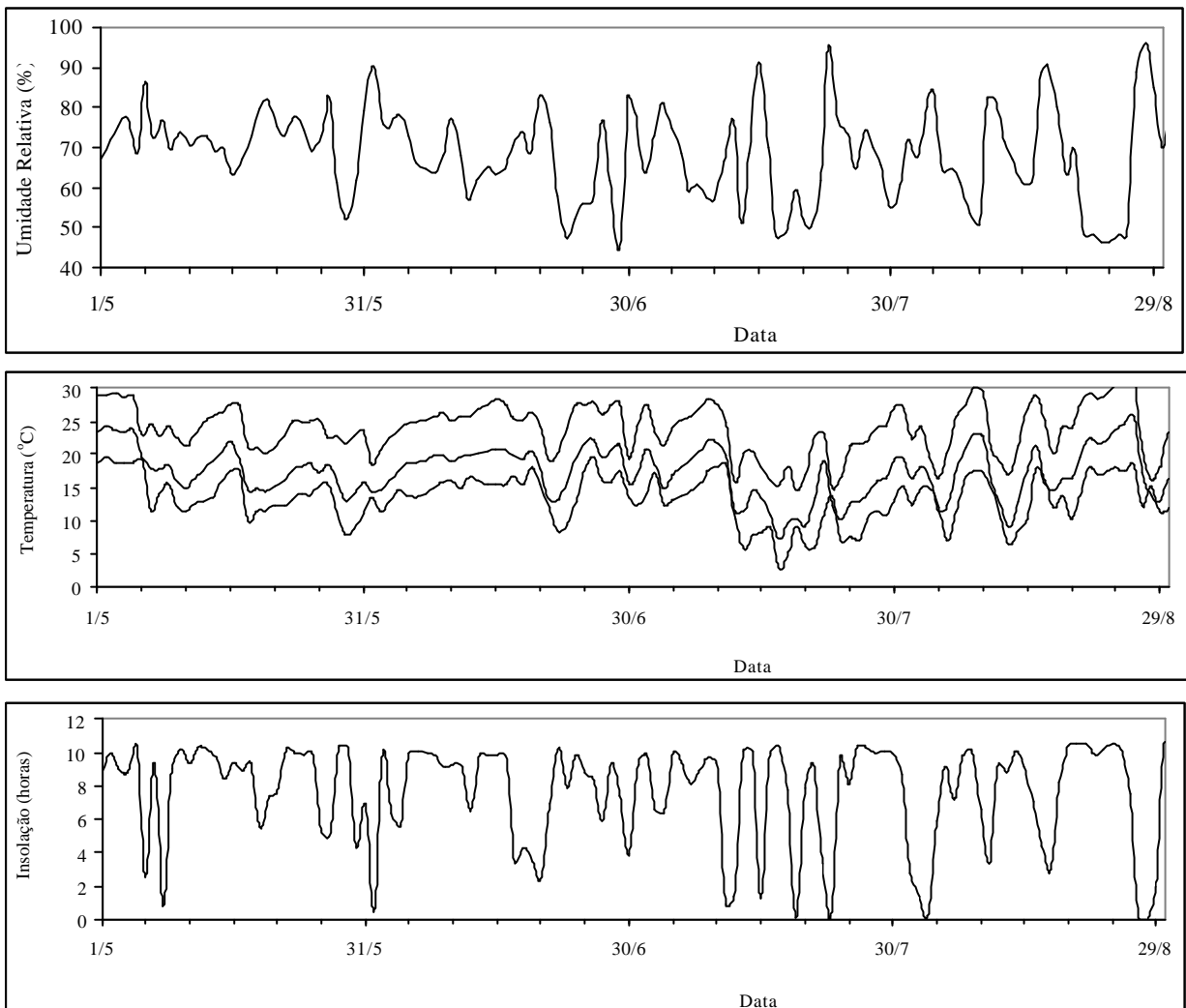
Quadro 9: Teor médio de água no solo ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) e valores do desvio padrão da média obtidos durante o ensaio de campo.

Profundidad e	Dias após a chuva				Média
	1	2	4	6	
0 a 0,15 m	0,240 ± 0,010	± 0,204 0,010	± 0,180 0,015	± 0,174 0,013	± 0,200
0,15 a 0,30 m	0,247 0,029	± 0,220 0,029	± 0,200 0,018	± 0,204 0,015	± 0,218
Média	0,244	0,212	0,190	0,189	20,9

O Quadro 10 mostra a síntese das análises da variância, considerando-se as duas profundidades como subparcelas, onde se observa diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade para os tratamentos na parcela (dias após a “chuva”) e na subparcela (profundidade no solo).

Os resultados mostram que o teor de água é menor na camada superficial, o que é explicado pela proximidade desta camada com a superfície de transferência de água entre o solo e a atmosfera.

A diminuição do teor de água no solo à medida que aumentou o número de dias após a chuva, não apresentou diferença significativa pelo teste de Tuckey a 5% de probabilidade, o que indica a necessidade de maior intervalo de tempo entre os tratamentos em ensaios desta natureza.



Irrigações



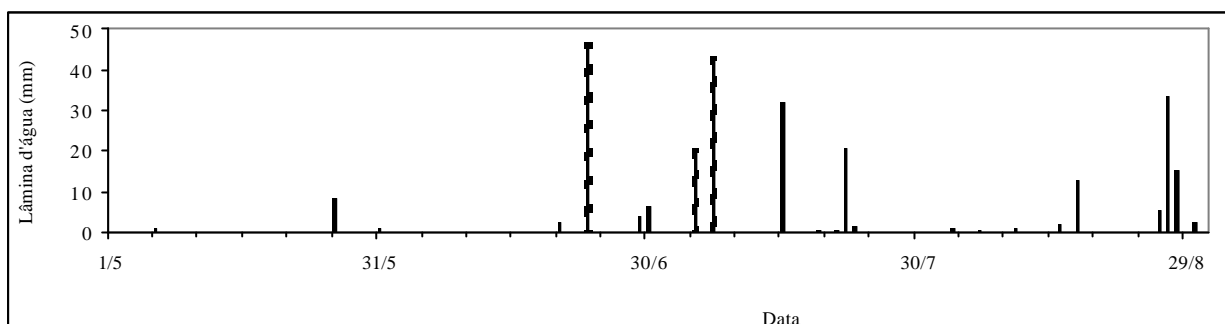


Figura 36: Valores de umidade relativa do ar, temperatura máxima, média e mínima, insolação, precipitação e identificação dos dias de irrigação na área experimental.

Quadro 10: Síntese da análise da variância e teste de médias para teor de água no solo.

Fatores	Valor de F
Blocos	0,27 NS
Dias (D)	10,94 **
Profundidade (P)	19,91 **
Interação D x P	1,44 NS
Dias após a "chuva"	Teor de água no solo (kg.kg <sup>-1</sup> )
1 dia	0,244 a
2 dias	0,212 ab
4 dias	0,190 b
6 dias	0,189 b
Profundidade (m)	Teor de água no solo (kg.kg <sup>-1</sup> )
0,15 A 0,30	0,218 a
0 a 0,15	0,200 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tuckey a 5% de probabilidade.

NS: não significativo ( $P > 0,05$ )

\*\* : significativo ( $P < 0,01$ )

## 6.6 Recalque do solo

Para o parâmetro recalque do solo, foram determinados os coeficientes  $k_c$ , relativo à coesão do solo,  $k_\phi$ , relativo ao ângulo de atrito interno do solo e o coeficiente adimensional  $n$ , utilizando-se os resultados das pressões em função da profundidade obtidos com três pratos de dimensões diferentes.

Foi detectada diferença significativa apenas para o coeficiente  $k_\phi$  para os tratamentos sem e com tráfego, como pode ser observado no Quadro 11.

Quadro 11: Valores de F das análises da variância dos coeficientes do recalque do solo para dias após a chuva nas parcelas e tráfego (sem e com) nas subparcelas.

Causas de variação	G.L.	$k_c$	$k_\phi$	$n$
Blocos	3	0,44 NS	0,33 NS	0,26 NS
Tratamentos (Dias)	3	2,16 NS	2,74 NS	1,27 NS
Tratamentos (Tráfego)	1	2,89 NS	5,09 *	1,83 NS
Interação Dias x Tráfego	3	1,07 NS	1,00 NS	1,39 NS

NS: Não significativo ( $P > 0,05$ ).

\*: Significativo ( $P < 0,05$ ).

O teste de Tuckey a 5% de probabilidade mostrou que o coeficiente  $k_\phi$  apresenta valor significativamente menor para a condição de ausência de tráfego do que para a condição de determinação após o tráfego (Quadro 12).

Quadro 12: Valores médios do coeficiente  $k_{\phi}$  para as condições de ausência e presença de tráfego.

Tratamento	Média
Com tráfego	22.571,6631 a
Sem tráfego	11.507,5206 b

Médias seguidas por letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tuckey a 5% de probabilidade.

Não foi observada dependência linear entre os coeficientes do recalque e o teor de água no solo, como pode ser observado no Quadro 13. Este fato pode ser explicado devido à pequena variação do teor de água do solo obtida neste trabalho, confirmando mais uma vez a não existência de diferenças significativas entre os teores de água para os quatro tratamentos aplicados.

Desta forma, com a finalidade de determinar o valor do recalque (Z) em função da pressão aplicada ao solo (p), para a condição anterior ao tráfego, utilizou-se a equação:

$$Z = [ p / (-572,7 / b + 11507,5) ]^{1/0,9107} \quad (37)$$

e, após o tráfego, utilizou-se a equação:

$$Z = [ p / (-1183,2 / b + 22571,7) ]^{1/0,8578} \quad (38)$$

em que,

b = largura do prato ou pneu (m)

p = pressão aplicada (kPa)

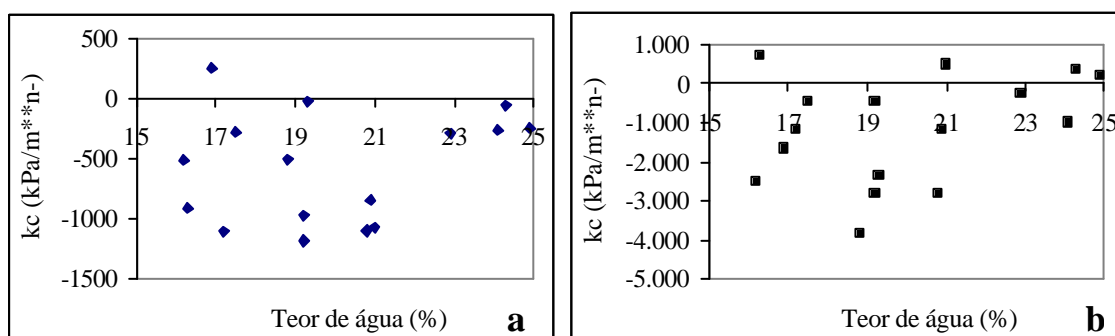
Quadro 13: síntese das análises da variância das análise de regressão linear entre os coeficientes do recalque do solo, sem e com tráfego, em função do teor de água no solo.

Parâmetro	F	Coefficiente Correlação	Teste T para R
$k_c$ , sem tráfego	0,70 NS	0,2185	0,838 NS
$k_c$ , com tráfego	1,72 NS	0,3309	1,312 NS
$k_\phi$ , sem tráfego	2,53 NS	-0,3912	-1,590 NS
$k_\phi$ , com tráfego	3,32 NS	-0,4380	-1,823 NS
$n$ , sem tráfego	0,08 NS	-0,0766	-0,288 NS
$n$ , com tráfego	0,65 NS	-0,2099	-0,803 NS

NS: não significativo ( $P > 0,05$ )

Na Figura 37 são apresentados os valores observados dos coeficientes da equação de recalque em confronto com o teor de água no solo.

A baixa sensibilidade do coeficiente  $n$  do recalque do solo com os parâmetros estudados está de acordo com os resultados encontrados por Santos, 1998, o mesmo não ocorrendo para os parâmetros  $k_\xi$  e  $k_\phi$ , provavelmente devido à pequena variação nos teores de água obtida neste trabalho.



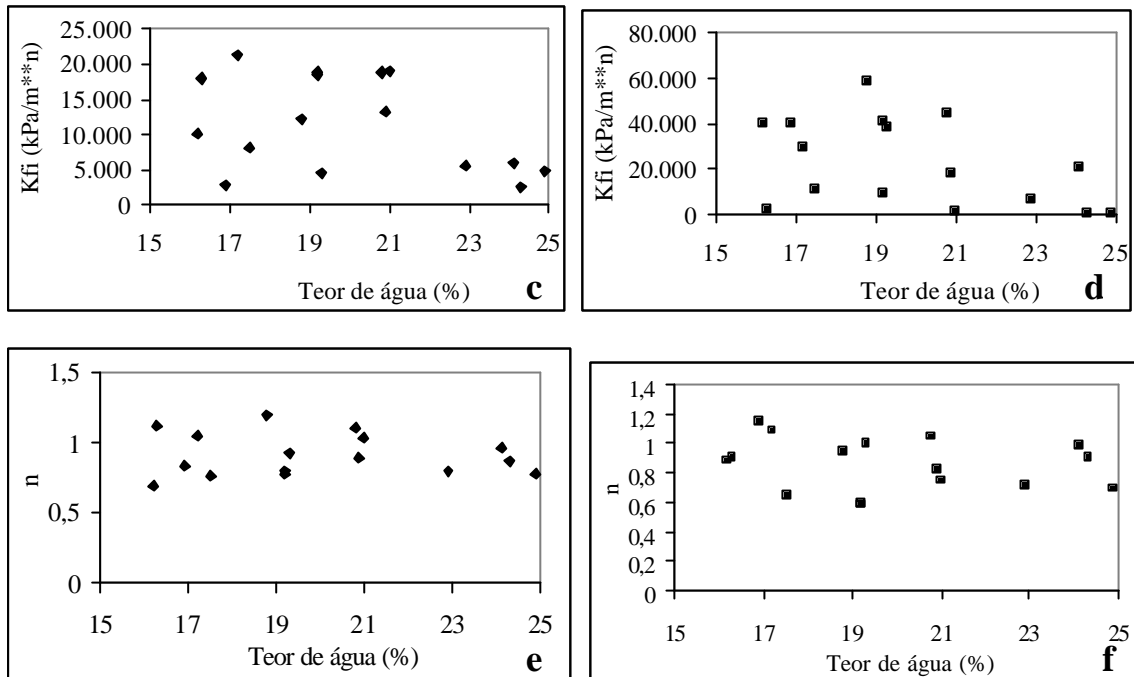


Figura 37: Distribuição dos pontos amostrais dos coeficientes de recalque do solo  $k_s$  sem tráfego (a) e com tráfego (b),  $k_s$  sem tráfego (c) e com tráfego (d) e  $n$  sem tráfego (e) e com tráfego (f), em função do teor de água no solo na profundidade de 0 a 0,15 m.

### 6.7 Centro de gravidade do trator

Os parâmetros determinados para o trator MF299 constam no Quadro 14, assim como aqueles calculados a partir das determinações realizadas no Laboratório de Mecânica do NEMPA.



Quadro 14: Parâmetros obtidos para a determinação do centro de gravidade do trator MF299.

Parâmetro	Valor	Unidade
<b>MEDIDOS</b>		
Peso sob o pneu dianteiro do lado esquerdo	12.810	N
Peso sob o pneu dianteiro do lado direito	13.420	N
Peso sob o pneu traseiro do lado esquerdo	21.950	N
Peso sob o pneu traseiro do lado direito	22.440	N
Distância entre eixos	2,74	m
Distância do olhal dos braços inferiores até o eixo traseiro	1,03	m
Bitola (medida no rodado traseiro)	1,73	m
Vão livre (medido no rodado traseiro)	1,25	m
Altura da barra de tração	0,40	m
Altura do olhal dos braços inferiores na posição do hidráulico elevado	0,92	m
<b>CALCULADOS</b>		
Peso no eixo traseiro	44.390	N
Distância do centro de gravidade ao plano vertical transversal (x)	1,018	m
Distância do centro de gravidade ao plano vertical longitudinal (z)	0,013*	m

\* Deslocado à direita do plano vertical longitudinal.

### 6.8 Centro de gravidade do implemento

Os parâmetros medidos e calculados relativos ao arado que foi utilizado acoplado ao trator e suspenso quando trafegou na área experimental, com a finalidade de provocar transferência de peso do eixo dianteiro para o eixo traseiro do trator, são apresentados no Quadro 15

Quadro 15: Parâmetros obtidos para a determinação do centro de gravidade do implemento (arado reversível de 4 discos, marca Jan).

Parâmetro	Valor	Unidade
<b>MEDIDOS</b>		
Peso no engate inferior esquerdo	1.490	N
Peso no engate inferior direito	3.930	N
Peso sob a roda guia	3.020	N
Comprimento (em nível, desde os engates até a roda guia)	2,60	m
Altura dos engates	0,68	m
<b>CALCULADOS</b>		
Peso do arado	8.440	N
Distância do centro de gravidade aos engates dianteiros	0,93	m

### 6.9 Pressão de contato pneu-solo

Devido a grande quantidade de cálculos a serem executados para a determinação da pressão de contato pneu-solo em condição dinâmica, envolvendo inclusive processo iterativo, foi desenvolvido um sistema computacional em linguagem Clipper, versão 5.x.

O sistema foi projetado em forma de menus auto-explicativos, de forma a facilitar a operação do conjunto de programas. As opções do sistema estão apresentadas no Quadro 16.

No cadastro de tratores são armazenadas as informações referentes ao número de ordem do trator, marca, modelo, centro de gravidade, peso, distância entre eixos, distância do olhal dos braços inferiores do sistema hidráulico de três pontos até o plano transversal (ou eixo traseiro) e altura da barra de tração.

No cadastro de pneus serão registrados o número de ordem, marca, modelo, tipo (BPAF, diagonal ou radial), dimensões, pressão recomendada e parâmetros das equações de regressão para o cálculo da largura relativa e do coeficiente de deformação.

Quadro 16: Opções dos diversos menus do sistema para determinação da pressão de contato pneu-solo (PCPS).

Menu principal	Menu secundários	Menu terciários
CADASTROS	Usuários	Inclusão
		Consulta/alteração/exclusão
		Listagem
	Utilização	Consulta/data
		Consulta/código
		Listagem
	Tratores	Compactação
		Inclusão
		Consulta/alteração/exclusão
	Pneus	Listagem
		Inclusão
		Consulta/alteração/exclusão
	Áreas	Listagem
		Inclusão
		Consulta/alteração/exclusão
	Implementos	Listagem
Inclusão		
		Consulta/alteração/exclusão

	Reindexação	ão
	Cálculos	Listagem
	Consulta/alteração	
	cálculos	
OPERAÇÃO		
RELATÓRIOS	Resultado cálculo	
	Cálculos executados	
	Planilhas	
	Etiquetas	

Código, identificação e valor dos coeficientes da equação de recalque do solo serão armazenados no cadastro de áreas.

O cadastro de implementos contém os dados do número de ordem, descrição e tipo de acoplamento (barra de tração ou engate de três pontos). Caso seja acoplado ao engate de três pontos do trator, deve ser fornecido o peso, a distância do centro de gravidade até os pinos de engate aos braços inferiores, o tipo de serviço (suspenso ou atuando no solo); caso trabalhe atuando no solo, é necessário fornecer a força exigida e a altura de trabalho do olhal dos braços inferiores. A força exigida pelo implemento deve ser fornecida também para aqueles acoplados à barra de tração do trator.

A opção de operação do sistema apresenta duas alternativas: a primeira, reindexação, é utilizada para gerar ou recuperar os arquivos de índice, os quais podem ser perdidos ou deteriorados por falha no fornecimento de energia elétrica ao computador ou outras falhas operacionais.

Para execução de um cálculo, deve-se fornecer as seguintes informações ao sistema:

- código da área de interesse;
- código do trator a ser utilizado;
- código dos pneus utilizados no eixo traseiro do trator; e

- código do implemento a ser utilizado.

Caso o operador do sistema não saiba os códigos utilizados nos cadastros, o próprio sistema apresenta uma opção de auxílio em tempo de execução, a qual será acionada simplesmente teclando-se <enter> à solicitação do códigos.

Uma vez confirmada a digitação dos dados, o sistema efetuará os cálculos, conforme descrito no fluxograma apresentado na Figura 38 e apresentará os resultados no monitor de vídeo.

Os dados relativos a cada cálculo executado serão gravados, podendo ser consultados e/ou alterados posteriormente, com busca pelo número de ordem do cálculo, ou impressos, utilizando-se a opção “resultado calculo” no menu de relatórios.

São disponíveis ainda os seguintes relatórios:

- cálculos executados: emite uma relação dos cálculos executados, podendo o operador do sistema especificar o período desejado.
- Planilhas: utilizadas para auxiliar na coleta de dados para a inclusão nos cadastros de tratores, pneus, áreas e implementos.
- Etiquetas de identificação: também com a opção de emissão, em ordem alfabética ou numérica, para tratores, pneus, áreas e implementos, utilizando-se etiquetas auto-adesivas em formulários contínuos, duas carreiras, dimensões de 8,9 x 23,4 mm.

Para as condições do conjunto trator-implemento utilizado no tráfego na área experimental, encontrou-se o valor de 116,9 kPa para a pressão de contato pneu-solo.

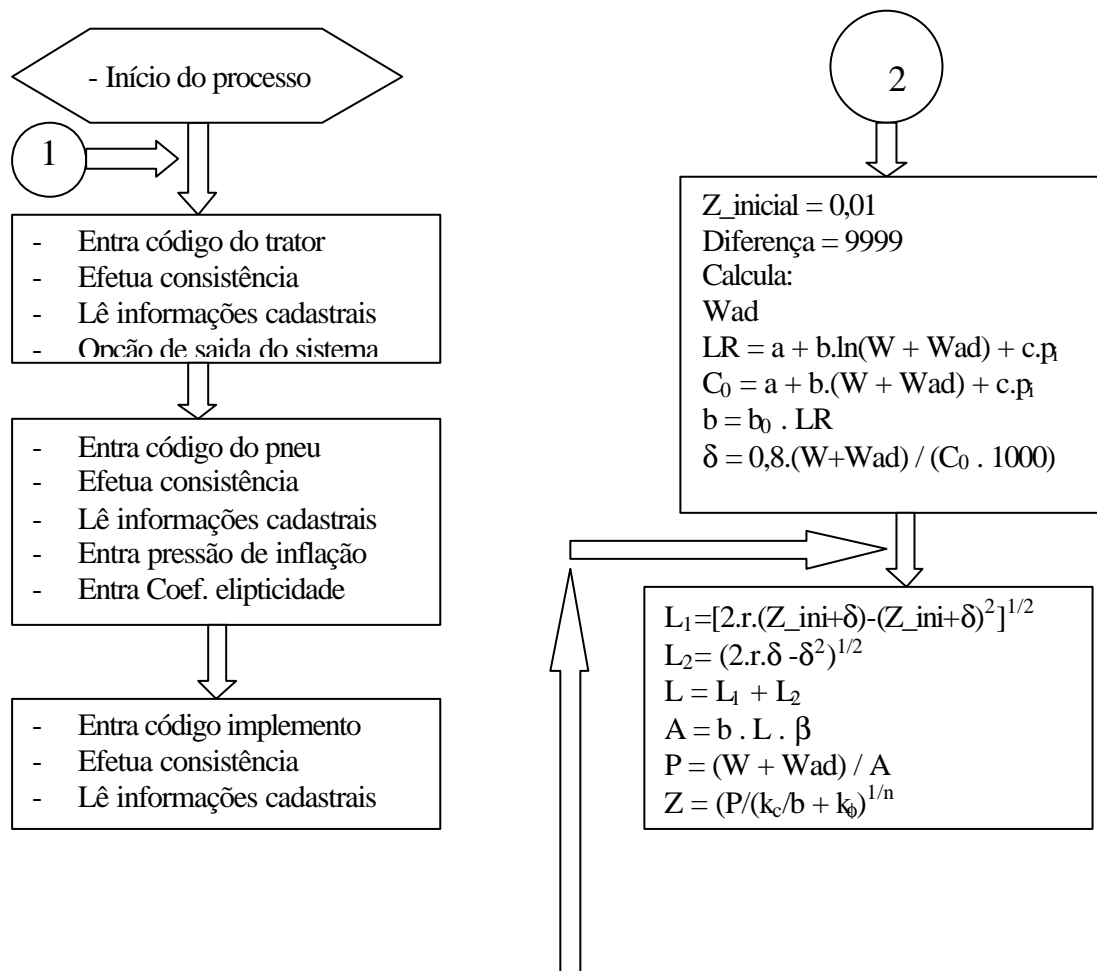
## **6.10 Pressão de preconsolidação**

São apresentados no Quadro 17 os teores de água médios referentes às cinco classes nas quais foram agrupados os ensaios de compressão uniaxial, correspondentes às amostras indeformadas coletadas antes do tráfego.

Quadro 17: Valores do teor médio de água, desvio padrão da média e número de amostras das classes de agrupamento dos ensaios de compressão uniaxial, sem tráfego.

Classe	Teor de água kg.kg <sup>-1</sup>	Desvio Padrão Da média	Número de Ensaios
1	0,3660	0,0270	12
2	0,2285	0,0307	14
3	0,1725	0,0129	19
4	0,1271	0,0147	14
5	0,0539	0,0168	17

Foram realizados dezessete pré-testes visando a determinação do tempo de atuação de cada uma das cargas nos ensaios de compressão uniaxial, de acordo com o método da raiz quadrada do tempo, desenvolvido por Taylor, citado por Holtz e Kovacs (1981). Os testes para cada uma das pressões exercidas é apresentado Figura 39. Em todos os pré-testes, encontrou-se um tempo máximo de 4 minutos de aplicação da carga para a ocorrência de, pelo menos, 90 % da deformação máxima.



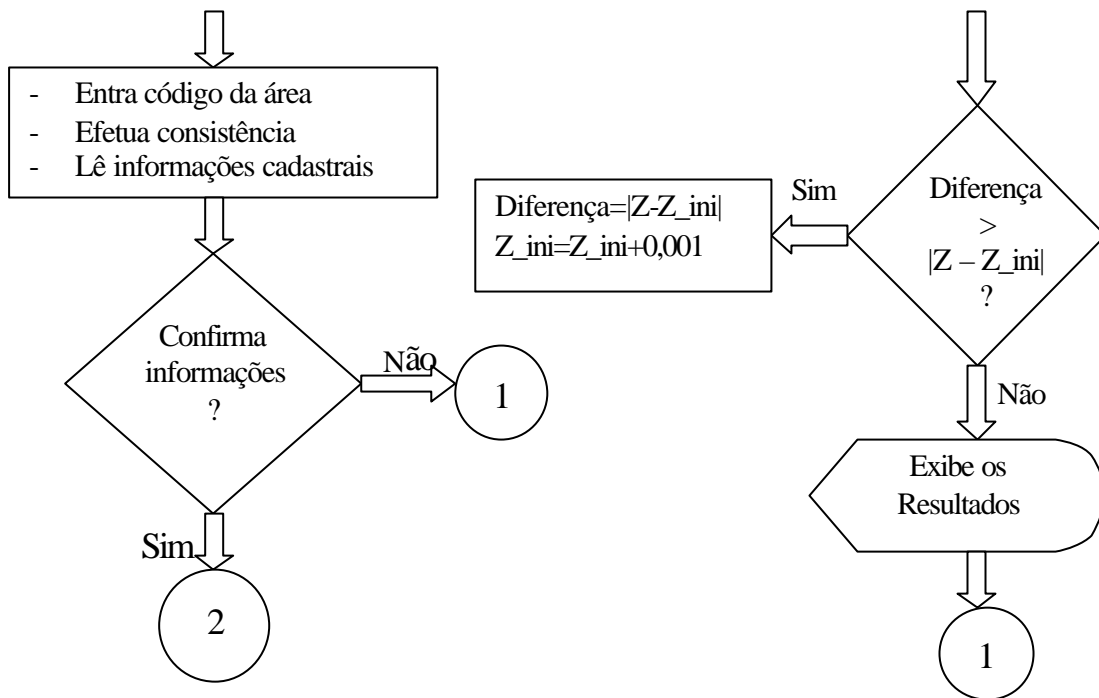
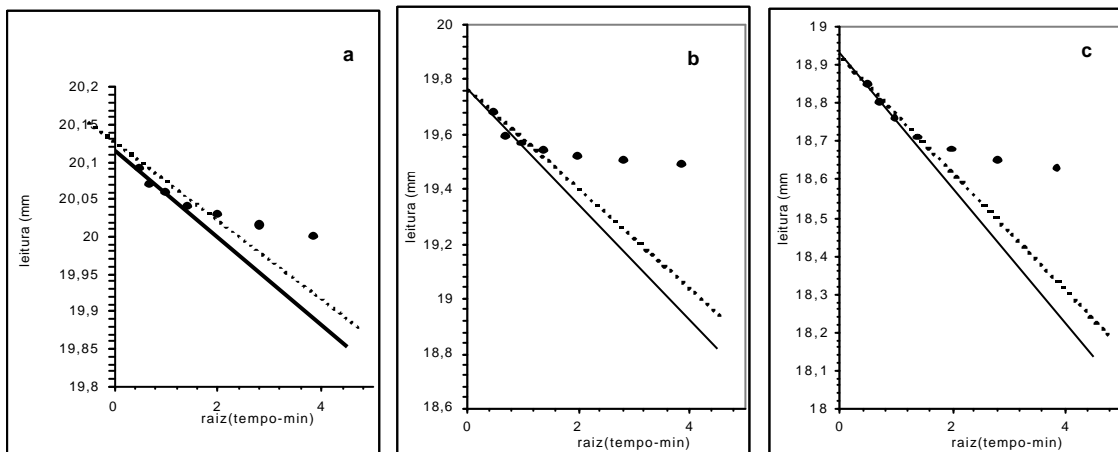


Figura 38: Fluxograma para o desenvolvimento das rotinas de cálculo da pressão de contato pneu-solo.



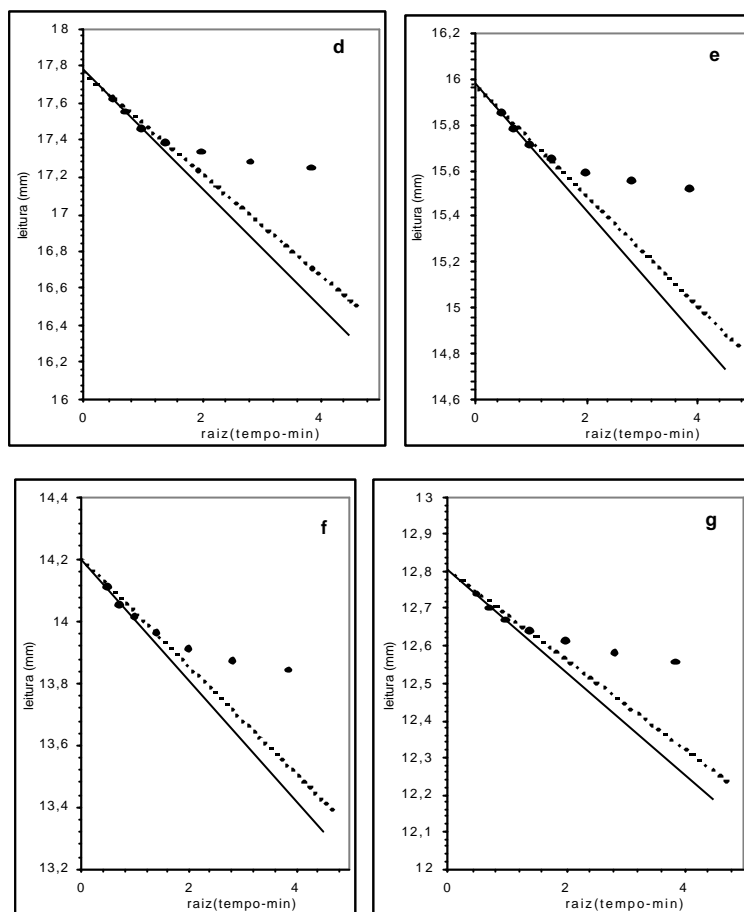


Figura 39: Determinação do tempo de atuação das pressões de 25 kPa (a), 50 kPa (b), 100 kPa (c), 200 kPa (d), 400 kPa (e), 800 kPa (f) e 1600 kPa (g) no ensaio de compressão uniaxial de acordo com o método de Taylor (Holtz e Kovacs, 1981).

Estes resultados encontrados foram próximos daqueles encontrados por Macedo (1993), Carpenedo (1994), Rubin et al. (1998), Silva et al. (1998), Genro Júnior (1999), Silva (1999), Bach (1999) e Silva et al. (2000).

As curvas de compressão do solo foram obtidas traçando-se os valores da densidade do solo ( $D_s$ ) em função da pressão aplicada ( $\sigma$ ), unindo-se os pontos por linhas suaves (Figura 40).

Observa-se que a curva de compressão do solo tende à linearidade à medida que aumenta o teor de água (Figura 40), concordando com as afirmações de Dias Junior & Pierce (1995) e de Silva (1999), sendo que este último



afirma que esta relação será linear quando o solo não sofreu nenhuma pressão prévia ou está muito úmido.

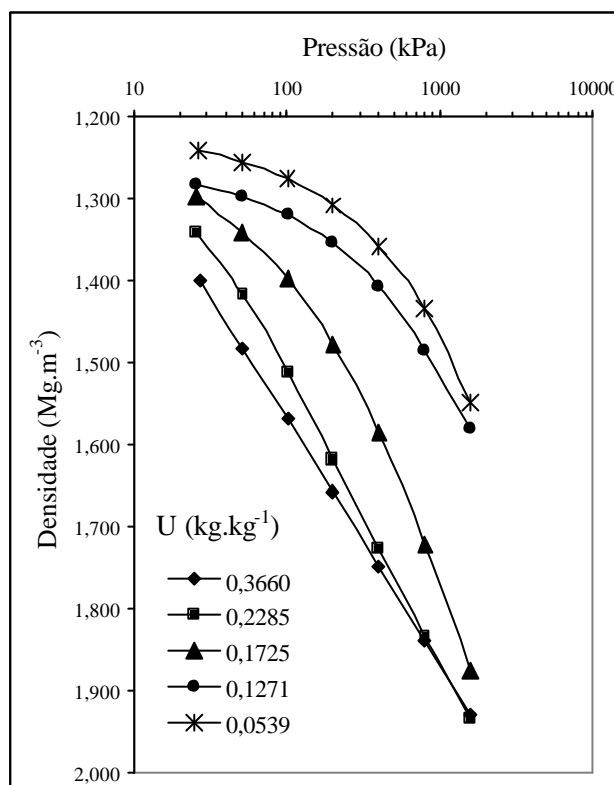


Figura 40: Curvas de compressão do solo para cinco classes de agrupamento dos ensaios de compressão uniaxial, sem tráfego construídas pela união dos pontos por linhas suaves.

A pressão de preconsolidação foi determinada no ponto de intercessão da reta de compressão secundária com a reta de compressão virgem. A reta da compressão secundária foi obtida ajustando-se um reta aos pontos correspondentes às pressões de 20, 50, 100 e 200 kPa da curva de compressão secundária para teores de água menores do que  $0,19 \text{ kg.kg}^{-1}$ . Para teores de água maiores do que este valor, a reta de compressão secundária foi obtida pela equação da reta que passa por dois pontos correspondentes às pressões de 20 e 50 kPa da

curva de compressão secundária. A reta de compressão virgem foi obtida pela equação da reta que passa por dois pontos correspondentes às pressões de 800 e 1600 kPa. Para cada classe, a pressão em que a reta de compressão virgem cruza com a reta de compressão secundária é a pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), cujos resultados são apresentados no Quadro 18.

Quadro 18: Equações das retas de compressão secundária e das retas virgens e valores da pressão de preconsolidação para as cinco classes de teor médio de água no solo (U) dos ensaios de compressão uniaxial, sem tráfego.

U (kg.kg <sup>-1</sup> )	Equação de compressão secundária	Equação da parte reta da curva de compressão virgem	$\sigma_p$ (Kpa)
0,3660	Ds=0,1318.ln( $\sigma$ )+0,9657	Ds=0,1299.ln( $\sigma$ )+0,9699	9,1
0,2285	Ds=0,1084.ln( $\sigma$ )+0,9904	Ds=0,1452.ln( $\sigma$ )+0,8633	31,6
0,1725	Ds=0,0866.ln( $\sigma$ )+1,0093	Ds=0,2235.ln( $\sigma$ )+0,2277	301,6
0,1271	Ds=0,0351.ln( $\sigma$ )+1,1644	Ds=0,1382.ln( $\sigma$ )+0,5634	340,1
0,0539	Ds=0,0331.ln( $\sigma$ )+1,1291	Ds=0,1652.ln( $\sigma$ )+0,3303	422,8

Os valores da pressão de preconsolidação foram submetidos a análise de regressão, de acordo com o modelo proposto por Dias Junior, citado por Kondo e Dias Júnior (1999a), da forma  $\sigma_p = 10^{(aU + b)}$ , onde a e b são parâmetros da regressão. Os resultados estão apresentados no Quadro 19.

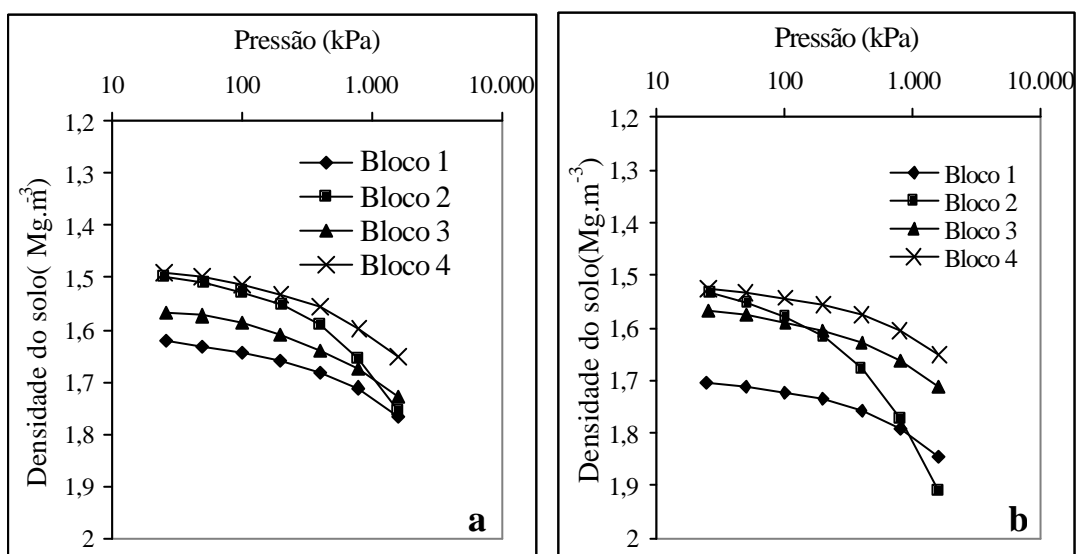
Quadro 19: Resultados da análise de regressão na forma  $\sigma_p = 10^{(aU + b)}$  para as cinco classes de agrupamento dos ensaios de compressão uniaxial, sem tráfego.

Parâmetro	Valor
A	-6,3572
B	3,199
r <sup>2</sup>	0,8759*

\*: Significativo ( $P < 0,05$ ).

A Figura 41 apresenta as curvas de compressão do solo obtidas após a aplicação dos tratamentos, ou seja, após o tráfego. São apresentados no Quadro 21 os teores médios de água no início do ensaio de compressão uniaxial, o valor da pressão de preconsolidação antes do tráfego (estimado), o valor da pressão de preconsolidação após o tráfego e o incremento na pressão de preconsolidação devido ao tráfego.

Observou-se diferença significativa dos valores da pressão de preconsolidação antes e após o tráfego (Quadro 20), porém, não foi observada diferença entre os tratamentos, o que pode ser atribuído à pequena variação no teor de água no solo durante o período experimental.



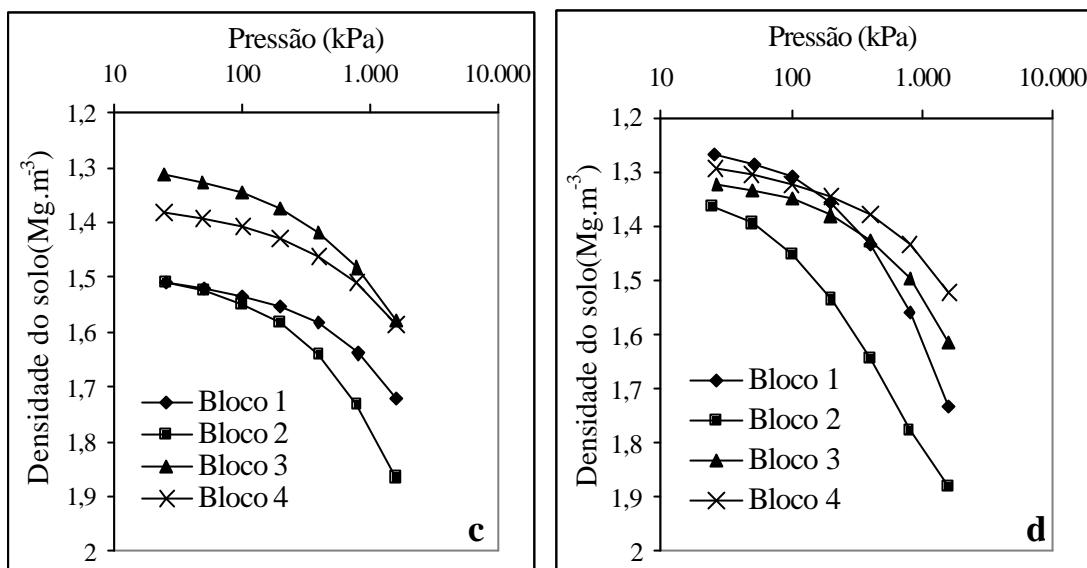


Figura 41: Curvas de compressão do solo após o tráfego para 1 dia (a), 2 dias (b), 4 dias (c) e 6 dias (d) após a chuva, em quatro repetições (blocos).

### 6.11 Densidade do solo

A síntese da análise da variância dos valores médios da densidade do solo, determinadas nas amostras indeformadas antes do início dos ensaios de compressão uniaxial são apresentados no Quadro 21, considerando-se o delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas. O teste de F mostrou significância para os tratamentos com e sem tráfego, número de dias após a chuva e interação entre tráfego e número de dias, indicando que a densidade do solo é um parâmetro mais sensível às variações na compactação do solo agrícola.

Quadro 20: Valores médios do teor de água no início dos ensaios de compressão uniaxial,  $\sigma_p$  estimado pela equação  $\sigma_p = 10^{(-6,3572.U+3,199)}$  (antes do tráfego) e determinados (após o tráfego) e incremento de  $\sigma_p$  devido ao tráfego.

Tratamento*	Repetição	Teor de água (kg.kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	$\sigma_p$ estimado (kPa)	$\sigma_p$ após o tráfego (kPa)	Incremento em $\sigma_p$ (kPa)		
1	1	0,1400	203,7	500,9	297,2	145.	
							9
1	2	0,1430	194,9	448,4	253,5	132.	
							1
1	3	0,1250	253,7	382,3	128,6	50.7	
1	4	0,1301	235,5	427,4	191,9	81.5	102.6
2	1	0,1331	225,3	456,8	231,5	102.	
							7
2	2	0,1551	163,3	424,5	261,2	159.	
							9
2	3	0,1215	267,1	431,0	163,9	61.4	
2	4	0,1400	203,7	465,4	261,7	128.	113.1
							5
3	1	0,1444	191,0	447,8	256,8	134.	
							5
3	2	0,1590	154,2	406,8	252,6	163.	
							8
3	3	0,1227	262,4	411,8	149,4	56.9	
3	4	0,1116	308,7	447,4	138,7	44.9	100.0
4	1	0,1562	160,7	409,1	248,4	154.	
							6
4	2	0,1897	98,4	104,2	5,8	5.9	
4	3	0,1433	194,1	439,7	245,6	126.	
							5
4	4	0,1229	261,6	446,8	185,2	70.8	89.5

Média - - 211,6 B 415,6 A

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tuckey a 5%.

\* Tratamentos 1, 2, 3 e 4 se referem ao tráfego por um trator com implemento suspenso 1, 2, 4 6 seis dias após a chuva, respectivamente.

Quadro 21: Síntese da análise da variância para densidade do solo.

Fatores	Valor de F
Blocos	1,20 NS
Tráfego	102,85 **
Dias	20,71 **
Interação Dias x Tráfego	7,34 **
<b>Desdobramentos:</b>	
Dias após a chuva : sem tráfego	2,39 NS
Dias após a chuva : com tráfego	25,66 **
Tráfego : 1 dia após a chuva	44,48 **
Tráfego : 2 dias após a chuva	22,88 **
Tráfego : 4 dias após a chuva	4,36 *
Tráfego : 6 dias após a chuva	67,55 **

\*\* : Significativo (P < 0,01).

\* : Significativo (P < 0,05).

NS: não significativo (P>0,05)

No Quadro 22 são apresentados os valores médios da densidade do solo antes e após o tráfego para todos os tratamentos. Não foi verificada diferença significativa pelo teste de Tuckey a 5% de probabilidade entre os tratamentos antes do tráfego, o que confirma a uniformidade da área antes da aplicação dos tratamentos de tráfego. Após o tráfego, as maiores densidades foram observadas quando este ocorreu um ou dois dias após a chuva, o que permite afirmar que o tráfego em áreas agrícolas logo após as chuvas provoca danos na estrutura física do solo.

Em todos os tratamentos, com exceção de seis dias após a chuva, houve diferença significativa entre as densidades do solo antes e após o tráfego, o que permite inferir que, para as condições climáticas e edáficas do ensaio pode-se trafegar com um trator, exercendo pressão igual ou inferior àquela exercida pelo trator utilizado no tráfego da área experimental, sem causar aumento na densidade do solo, ou seja, sem provocar compactação adicional, a um intervalo de tempo entre 4 e seis dias após a ocorrência de chuva.

Quadro 22: Valores médios antes e após o tráfego e incremento percentual da densidade do solo.

Dias após a chuva	Ds (Mg.m <sup>-3</sup> ) antes do tráfego	Ds (Mg.m <sup>-3</sup> ) após tráfego	Incremento (%)
1 dia	1,235 a B	1,540 a A	24.7
2 dias	1,282 a B	1,530 a A	19.3
4 dias	1,220 a B	1,398 b A	14.6
6 dias	1,188 a A	1,265 c A	6.5
Média	1,231 B	1,433 A	

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

### 6.12 Índice de cone

A Figura 42 apresenta os resultados da resistência à penetração (RP) em função da profundidade no solo, determinadas antes e após o tráfego, para cada um dos tratamentos, em cinco repetições por parcela.

Observa-se o mesmo comportamento da curva para os resultados de RP antes do tráfego para os quatro tratamentos, sendo que as diferenças ficam mais pronunciadas à medida que aumenta o número de dias após a chuva, ou seja, diminui o teor de água no solo, concordando com os resultados apresentados por Guerra & Lanças (2000).

Observa-se ainda que o maior efeito do tráfego sobre o solo ocorre na camada de 50 a 100 mm, tanto para a condição “antes do tráfego”, na qual o solo recebeu uma compactação de uniformização com a utilização dos rolos compactadores, como para a condição “após o tráfego”.



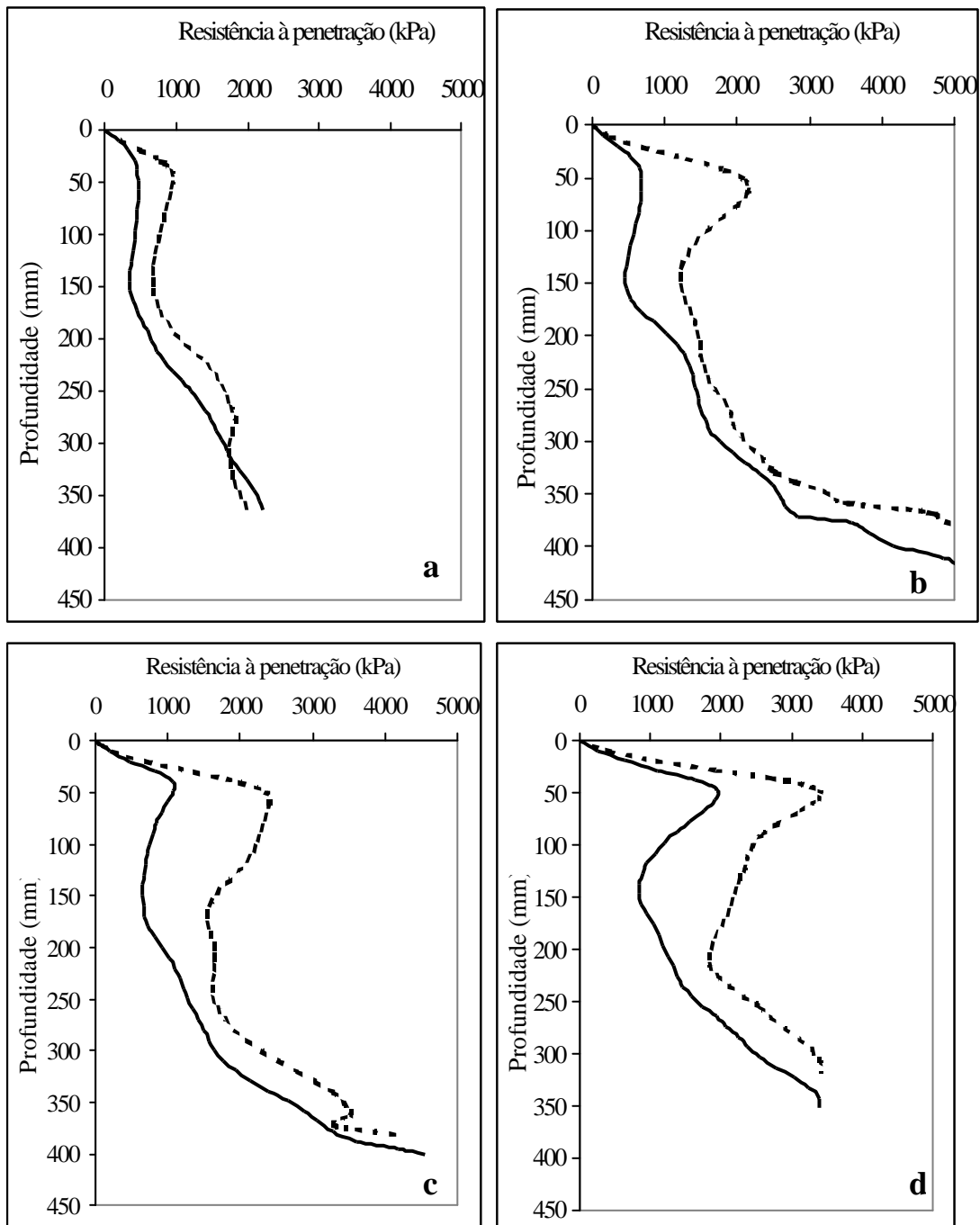


Figura 42: Resistência à penetração do solo antes (linhas contínuas) e após (linhas tracejadas) o tráfego para os tratamentos de 1 dias (a), 2 dias (b), 4 dias (c) e 6 dia (d) após a chuva.

Deve-se atentar para o fato de que os valores absolutos da RP, neste caso, não devem ser comparados entre si em função dos diferentes teores de água do solo para os quais foram feitos os ensaios de penetrometria. Para que fosse possível a comparação entre os índices de cone dos diversos tratamentos, foi efetuado novo levantamento de dados, mais ou menos três meses após o ensaio inicial, após um longo período sem chuvas, que possibilitou uma secagem natural e uniforme do solo.

A análise da variância dos teores de água do solo nas profundidades de 0 a 0,15m e de 0,15 a 0,30 m mostrou efeito significativo apenas da profundidade do solo, cujos dados médios estão apresentados no Quadro 23.

Quadro 23: Teores de água do solo nas profundidades de 0 a 0,15 e de 0,15 a 0,30 m, tomados por ocasião do levantamento de dados de penetrometria de todas as parcelas, após um período sem chuvas.

Profundidade (m)	Teor de água (kg.kg <sup>-1</sup> )
0 a 0,15	0,1371 a
0,15 a 0,30	0,1734 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tuckey a 5% de probabilidade.

Uma síntese da análise da variância dos índices de cone calculados para várias profundidades ou camadas de solo está apresentada no Quadro 24. O efeito do tráfego foi estatisticamente significativo para todas as profundidades, ao passo que o número de dias após a chuva e a interação entre o número de dias e a presença ou ausência de tráfego foi estatisticamente significativa para todas as profundidades, à exceção da camada de 0,20 a 0,30 m, onde apenas a presença ou ausência de tráfego apresentou significância. Este fato reforça a observação de que o tráfego e a ação dos rolos compactadores exercem influência marcante nas camadas mais superficiais do solo.

O desdobramento de dias após a chuva dentro de tráfego foi estatisticamente significativo apenas para a condição “após o tráfego”, pois o mesmo ocorreu em diferentes teores de água no solo, ao passo que, na condição “sem

tráfego” todas as parcelas foram submetidas à ação dos rolos compactadores na mesma condição de umidade com o objetivo de uniformizar a compactação inicial do solo e, a ausência de significância, indica que o objetivo foi alcançado com êxito.

Quadro 24: Síntese da análise da variância para os valores dos índices de cone nas profundidades de 0 a 0,15 m (IC<sub>15</sub>), 0 a 0,30 m (IC<sub>30</sub>), 0 a 0,10 m (IC<sub>10</sub>), 0,10 a 0,20 m (IC<sub>10-20</sub>) e 0,20 a 0,30 m (IC<sub>20-30</sub>).

Fatores	Valor de F				
	IC <sub>15</sub>	IC <sub>30</sub>	IC <sub>10</sub>	IC <sub>10-20</sub>	IC <sub>20-30</sub>
Blocos	0,80 NS	1,18 NS	1,35 NS	1,17 NS	1,22 NS
Tráfego	184,54 **	100,18 **	188,88 **	163,69 **	21,00 *
Dias	9,97 **	7,68 **	8,95 **	8,38 **	1,17 NS
Interação Tráfego x Dias	13,87 **	8,81 **	13,55 **	8,30 **	1,50 NS
<b>Desdobramentos</b>					
Dias : sem tráfego	0,34 NS	0,71 NS	0,39 NS	0,90 NS	-
Dias : após tráfego	23,50 **	15,78 **	22,11 **	15,79 **	-
Tráfego : 1 dia	59,93 **	48,48 **	53,13 **	55,39 **	-
Tráfego : 2 dias	96,41 **	58,15 **	79,78 **	73,26 **	-
Tráfego : 4 dias	41,19 **	45,68 **	24,71 **	63,16 **	-
Tráfego : 6 dias	0,77 NS	2,37 NS	0,01 NS	5,51 *	-

NS: não significativo ( $P > 0,05$ )

\*: significativo ( $P < 0,05$ )

\*\* : significativo ( $P < 0,01$ )

Por outro lado, o desdobramento do tráfego dentro do número de dias após a chuva mostrou-se estatisticamente significativo para os tratamentos 1, 2 e 4 dias após a chuva para todas as profundidades. Para o tratamento de 6 dias após a chuva, houve significância apenas para a profundidade de 0,10 a 0,20 m ( $P < 0,05$ ), fato que pode ser atribuído ao gradiente de umidade do solo, e ao fato que a maior ação dos agentes compactantes do solo atuam nesta faixa de profundidade.

Os Quadros 25 a 29 apresentam as médias dos valores dos índices de cone para todos os tratamentos, para as profundidades analisadas. Como para a profundidade de 0,20 a 0,30 m não houve efeito de dias após a chuva e nem de interação, são apresentadas apenas as médias relativas às condições anterior e posterior ao tráfego, não fazendo parte portanto da discussão que se segue.

Quadro 25: Valores médios dos Índices de cone na profundidade de 0 a 0,15 m, para 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva, antes e após o tráfego.

Dias após a chuva	IC <sub>15</sub> antes do tráfego (kPa)	IC <sub>15</sub> após tráfego (kPa)
1 dia	1527,2 a B	5333,6 ab A
2 dias	1649,1 a B	6476,9 a A
4 dias	1479,0 a B	4634,8 b A
6 dias	1940,8 a A	2370,9 c A
Média	1649,0 B	4704,1 A

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Para todas as profundidades, não houve diferença significativa nos valores dos índices de cone para 1, 2, 4 ou 6 dias após a chuva para a condição anterior ao tráfego, mostrando o efeito adequado da compactação de uniformização da área experimental.

Quadro 26: Valores médios dos Índices de cone na profundidade de 0,30 m, para 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva, antes e após o tráfego.

Dias após a chuva	IC <sub>30</sub> antes do tráfego (kPa)	IC <sub>30</sub> após tráfego (kPa)
1 dia	2075,0 a B	5345,8 a A
2 dias	2436,1 a B	6018,0 a A
4 dias	1872,1 a B	5047,0 a A
6 dias	2382,3 a A	3105,6 b A
Média	2191,4 B	4879,1 A

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

O tratamento relativo a 6 dias após a chuva apresentou índice de cone significativamente inferior aos demais para a condição após o tráfego, não apresentando diferença estatística para a condição anterior e posterior ao tráfego, indicando que o solo já havia atingido um teor de água suficiente para que pudesse suportar o tráfego efetuado sem sofrer compactação adicional.

Quadro 27: Valores médios dos Índices de cone na profundidade de 0,10 m, para 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva, antes e após o tráfego.

Dias após a chuva	IC <sub>10</sub> antes do tráfego (kPa)	IC <sub>10</sub> após tráfego (kPa)
1 dia	1314,2 a B	4551,6 a A
2 dias	1416,1 a B	5383,1 a A
4 dias	1327,7 a B	3535,3 a A
6 dias	1763,7 a A	1727,4 b A
Média	1455,4 B	3799,3 A

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Quadro 28: Valores médios dos Índices de cone na profundidade de 0,10 a 0,20 m, para 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva, antes e após o tráfego.

Dias após a chuva	IC <sub>10-20</sub> antes do tráfego (kPa)	IC <sub>10-20</sub> após tráfego (kPa)
1 dia	1983,5 a B	6398,0 a A
2 dias	2681,0 a B	7758,0 a A
4 dias	1834,7 a B	6548,6 a A
6 dias	2440,5 a B	3832,6 b A
Média	2234,9 B	6134,3 A

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Quadro 29: Valores médios dos Índices de cone na profundidade de 0,20 a 0,30 m, antes e após o tráfego.

Condição	Índice de cone (kPa)
Antes do tráfego	2846,2 b
Após o tráfego	4603,9 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tuckey a 5% de probabilidade.

Estas análises indicam que o índice de cone é um bom parâmetro para avaliação da compactação do solo e da trafegabilidade, desde que as determinações sejam efetuadas com baixo teor de água no solo, aumentando assim a sensibilidade das avaliações, uma vez que em solos com elevado teor de água, apesar do menor esforço exigido para cravar a haste no solo, o efeito lubrificante da água poderá mascarar as diferenças de compactação nas camadas do solo. Por outro lado, este fato exige a utilização de penetrômetros mecânicos ou hidráulicos, uma vez que a pressão necessária para avaliações de resistência à penetração em solos secos não é praticável para a maioria dos casos com a utilização de penetrômetros manuais.

A síntese da análise da variância dos incrementos nos índices de cone nas camadas de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,30 m devido ao tráfego de um trator efetuado 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva mostrou significância dos tratamentos (dias após a chuva e profundidade no solo), assim como interação entre os tratamentos, conforme pode ser observado no Quadro 30.

Quadro 30: Síntese da análise da variância e teste de médias para o incremento do índice de cone para as camadas de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,30 m submetidas ao tráfego 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva.

<b>Fatores</b>	<b>Valor de F</b>
Blocos	1,09 NS
Dias (D)	7,18 **
Profundidade (P)	31,87 **
Interação D x P	6,45 **

NS: não significativo ( $P > 0,05$ )

\*\* : significativo ( $P < 0,01$ )

Para as duas primeiras camadas, o tráfego 6 dias após a chuva provocou um incremento significativamente menor que nos demais tratamentos e, para a terceira camada, não houve diferença significativa entre os dias após a chuva e, comparando-se com as duas camadas superiores, esta camada apresentou incremento significativamente menor nos valores dos índices de cone para qualquer número de dias após a chuva, indicando que esta camada (0,20 a 0,30 m) não sofreu os efeitos do tráfego nas condições em que foi realizado (Quadro 31).

Quadro 31: Valores médios dos incrementos nos valores dos índices de cone devidos ao tráfego (%), nas camadas de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,30 m, para 1, 2, 4 e 6 dias após a chuva.

Dias após a chuva	0 a 0,10 m	0,10 a 0,20 m	0,20 a 0,30 m	Média
1 dia	258,3 a A	230,6 a A	69,4 a B	186,1 a
2 dias	296,7 a A	224,8 a A	54,1 a B	191,9 a
4 dias	168,5 a B	260,3 a A	110,7 a B	179,8 a
6 dias	-1,3 b A	66,5 b A	26,0 a A	30,4 b
Média	180,6 A	195,5 A	65,0 B	

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

O incremento médio nos valores do índice de cone para as três camadas estudadas ficou em mais ou menos 185% para 1, 2 e 4 dias após a chuva, não diferindo entre si. Para seis dias após a chuva, o incremento no índice de cone diminuiu para 30,4 %, o que realça a importância de se determinar com precisão o momento adequado para retomar qualquer atividade motomecanizada após a ocorrência de chuvas, comprovando os resultados da pressão de preconsolidação.

As camadas de 0 a 0,10 e de 0,10 a 0,20 m sofreram, em média para os tratamentos relativos a número de dias após a chuva, os mesmos incrementos nos valores dos índices de cone (mais ou menos 190 %), sendo que a camada de 0,20 a 0,30 m apresentou um incremento significativamente menor, na ordem de 65%.

Portanto, pode-se inferir que a camada de solo que responde imediatamente ao efeito compactante causado pelo tráfego de um trator agrícola está situada entre a superfície e algum ponto entre 0,10 e 0,20 m.



### 6.13 Dias trabalháveis

A análise e compilação dos dados anteriormente apresentados, permitiram determinar o tempo de espera para a realização do tráfego de máquinas nas condições edafo-climáticas e de histórico de solo reinantes no local do experimento. Assim, conforme mostra a Figura 43, o tempo de espera para realização de tráfego de forma a não aumentar a compactação está na faixa de 4 a 6 dias, uma vez que somente o tratamento de 6 dias após a chuva não apresentou diferença estatística para os valores de índice de cone, para a condição antes e após o tráfego, uma vez que o valor da pressão de preconsolidação é maior que o valor da pressão aplicada pelo tráfego. Assim, pode-se obter o número de dias trabalháveis através da subtração dessa faixa de tempo indesejada dos dias totais.

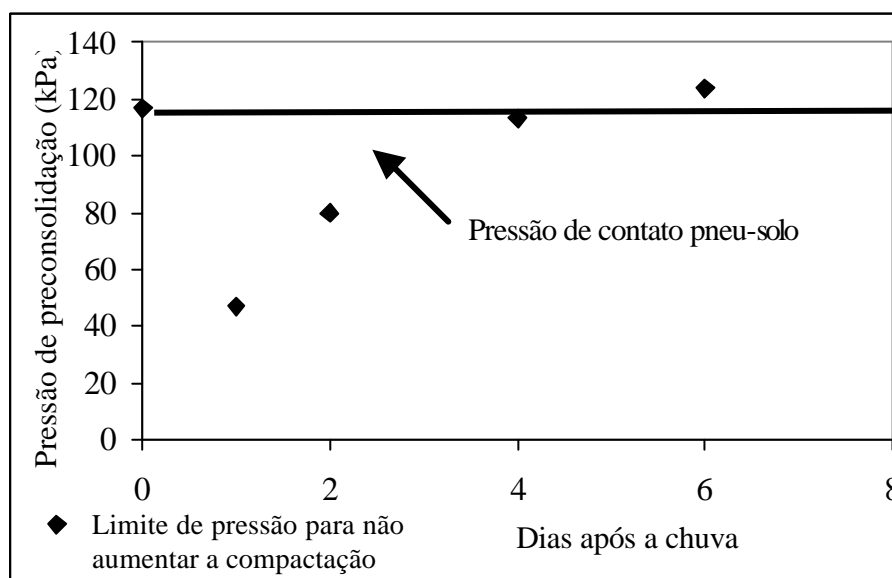


Figura 43: Pressão de preconsolidação calculada para os teores de água no solo obtidos a um, dois, quatro e seis dias após a chuva e pressão de contato pneu-solo (linha contínua), exercida pelo conjunto trator-implemento utilizado para o tráfego no ensaio de campo.

Esta metodologia poderá ser utilizada no planejamento das operações agrícolas mecanizadas, relacionando-a a informações do balanço hídrico climático, ou na operacionalização das mesmas operações mediante o

acompanhamento das condições hídricas do solo utilizando, por exemplo, o balanço hídrico seriado.

#### 6.14 Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros

Os resultados anteriormente discutidos permitem emitir as seguintes considerações:

- O coeficiente de deformação ( $C_d$ ) do pneu pode ser determinado por uma equação da forma  $C_d = a + b \cdot W + c \cdot P_i$ , sendo  $W$  a carga inicial,  $P_i$  a pressão de inflação e  $a$ ,  $b$  e  $c$  parâmetros da equação, dependentes do tipo de construção BPAF, diagonal ou radial.

- A utilização da largura relativa dos pneus, mostrou-se prática e eficiente para expressar a variação da largura do pneu em função da pressão de inflação e da carga vertical no pneu.

- O recalque  $Z$  do solo, em função da pressão aplicada pelo pneu no solo e de sua largura, pode ser calculada por  $Z = [ p / (-572,7 / b + 11507,5) ]^{1/0,9107}$  para a condição anterior ao tráfego e por  $Z = [ p / (-1183,2 / b + 22571,7) ]^{1/0,8578}$  para a condição posterior ao tráfego.

- Nos ensaios de compressão uniaxial, mais de 90% das deformações ocorrem em um tempo inferior a 4 minutos.

- A equação  $\sigma_p = 10^{(-6,3572 \cdot U + 3,199)}$  foi determinada para estimar a pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) em função da umidade gravimétrica ( $U$ ), com coeficiente de determinação de 0,8759.

- As maiores densidades foram observadas para o tráfego ocorrido 1 ou 2 dias após a chuva, realçando o fato de que trafegar em áreas agrícolas logo após as chuvas provoca sérios danos na estrutura do solo.

- O incremento na densidade do solo foi de 24,7%, 19,3% e 14,6%, respectivamente para as condições de tráfego a um, dois e quatro dias após a chuva, não ocorrendo incremento significativo para seis dias após a chuva.

- O índice de cone, determinado com teor de água no solo relativamente baixo, mostrou-se um parâmetro eficiente, prático e rápido para detectar diferenças de compactação do solo.

- O incremento médio nos valores do índice de cone para as três camadas estudadas foi de, aproximadamente, 185% para 1, 2 e 4 dias após a chuva e de 30,4% para 6 dias após a chuva, comprovando os resultados da pressão de preconsolidação, realçando a importância de se determinar com precisão o momento adequado para retomar qualquer atividade motomecanizada após a ocorrência de chuvas na tentativa de evitar a compactação adicional do solo.

- A análise do incremento na resistência à penetração do solo, devido ao tráfego de um trator agrícola, mostrou que a camada de solo que responde imediatamente a esta ação está situada entre a superfície e algum ponto entre 0,10 e 0,20 m de profundidade.

Para futuros trabalhos relacionados a esta pesquisa, pode-se sugerir, entre outras, as seguintes linhas de trabalho:

- Avaliação das dimensões, formas e número de pratos, bem como outras metodologias para a determinação dos parâmetros de recalque de solos agrícolas.

- Correlação entre os parâmetros de recalque do solo e entre a pressão de preconsolidação com outros parâmetros de obtenção mais fácil, como o índice de cone, por exemplo, juntamente com o teor de água do solo.

- Avaliação do modelo proposto em uma faixa mais ampla de umidade do solo.

- Desenvolvimento de sistemas computacionais para a previsão de dias trabalháveis com máquinas agrícolas com base na metodologia proposta e modelos agroclimáticos.

- Desenvolvimento de sistemas computacionais para a operacionalização dos dias trabalháveis com máquinas agrícolas, em tempo real,

visando evitar a degradação de sistemas agrícolas, florestais ou pecuários pela compactação adicional do solo.

- Adaptação da metodologia proposta para a determinação do número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas para as condições de plantio direto.

## 7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas, pode-se concluir:

- O equipamento hidráulico-eletrônico para determinação de propriedades físicas do solo operou de maneira eficiente, rápida e acurada para uso em condições de ensaios de campo.
- A utilização de ferramentas intercambiáveis mostrou-se prática e permitiu grande agilidade na coleta de dados.
- O equipamento construído para testes de compressão uniaxial (consolidômetro) apresentou custo inferior ao de um equipamento similar importado e mostrou-se preciso para a finalidade a que foi destinado.
- A metodologia e o sistema computadorizado para o cálculo da pressão de contato pneu-solo mostrou prática, indicando que o rodado do conjunto trator-implemento utilizado no tráfego exerceu pressão de 116,9 kPa no solo.
- As curvas de compressão do solo tendem à forma linear a medida que se aumenta o teor de água da amostra, com menor ajuste aos dados observados.
- Para as condições edafo-climáticas e de histórico do solo da área experimental, o tempo de espera para a realização de tráfego de um conjunto trator-implemento com rodado exercendo uma pressão dinâmica de 116.9 kPa, sem causar aumento na densidade do solo, ou seja, sem provocar compactação adicional, está na faixa de 4 a 6 dias.
- Os maiores efeitos da aplicação dos rolos compactadores e do tráfego por um trator agrícola ocorreram em profundidades inferiores a 0,20 m.
- O tráfego pelo trator agrícola 6 dias após a chuva provocou aumento na resistência à penetração do solo apenas para a camada de 0,10 a 0,20 m.

- A metodologia desenvolvida permitiu a determinação de parâmetros físicos de solo para previsão e monitoramento da trafegabilidade do solo objetivando evitar a ocorrência de compactação adicional do solo, podendo ser incorporada em sistemas agrometeorológicos com a finalidade de determinação de dias trabalháveis com máquinas agrícolas.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABD EL-GAWWAD,K.A., CROLLA, D.A., SOLIMAN, A.M.A., EL-SAYED,F.M. Off-road tyre modeling-IV: extended treatment of tyre-terrain interaction for the multi-spoke model *J.Terramechanics*, v.36, p.77-90, 1999.
- ABEELS, P.F.J. Rim, tire and soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL DYNAMICS, 1985, Auburn, Alabama-USA. Proceedings... Auburn: National Tillage Machinery Laboratory and Auburn University, 1985, p.630-42.
- ABEELS, P.F.J. Tire deflection and contact studies. *J.Terramechanics*, v.13, n.3, p.183-96, 1976.
- ADAM,K.M., ERBACH,D.C. Relationship of tire sinkage depth to depth of soil compaction. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.38, n.4, p.1011-16, 1995.
- AFFÉRRI, A.Z. *Estimativa das condições de tráfego em solo agrícola*. Piracicaba, 1992. 118p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Área de Concentração: Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- AGENDES, M.O.de O., MOTA, F.S. *Dias climaticamente aptos para trabalhos com máquinas agrícolas em planossolo bem drenado artificialmente, em Pelotas*. Pelotas, 1986, 14p. Boletim de pesquisa no. 1.
- AL-ADAWI, S.S., REEDER, R.C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.39, n.5, p.1641-9, 1996.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Agricultural equipment tire loading and inflation pressures. In: *ASAE Standards 1999: standards engineering practices data*. 46.ed. St. Joseph, 1999a. p.272-83 (ANSI/ASAE S430.1)

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. In: *ASAE Standards 1999: standards engineering practices data*. 46.ed. St. Joseph, 1999b. p.991-3 (ASAE EP542)

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Soil cone penetrometer. In: *ASAE Standards 1999: standards engineering practices data*. 46.ed. St. Joseph, 1999c. p.834-5 (ASAE S313.1)

ARVIDSSON, J., RISTIC, S. Soil stress and compaction effects for four tractor tyres. *J.Terramechanics*, v.33, n.5, p.223-32, 1996.

ASSIS, S.V. *Modelo para estimar o número de dias trabalháveis com tratores agrícolas, em função de parâmetros do solo e do clima*. Viçosa, 1988, 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa.

ASSIS, S.V.de, SEDIYAMA, G.C., VIANELLO, R.L., MARTYN, P.J. Probabilidade de ocorrência de dias trabalháveis com tratores agrícolas em Uberaba, Minas Gerais. *R.Ceres*, v.36, n.206, p.299-316, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12567: Trator agrícola – determinação do centro de gravidade*. Rio de Janeiro, 1992. 5p.

BABER, A.S. *Simulation model for predicting tractability conditions for crop production systems*. Ames, Iowa, 1984. 96p. Thesis(Agricultural Engineering) – Iowa State University.

BABER, A.S., COLVIN, T.S., MARLEY, S.J. *Predicting field tractability with a simulation model*. East Lansing: Am.Soc.Agric.Eng., 1985. 15p. (Paper, 85-1025)



- BABEIR, A.S., COLVIN, T.S., MARLEY, S.J. Predicting field tractability with a simulation model. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.29, n.6, p.1520-5, 1986.
- BACH, A.V., REINERT, D.J., REICHERT, J.M., SILVA, V.R., RUBIN, R.B. Deformação do solo e sua relação com a densidade inicial e grau de saturação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1999, Rio de Janeiro-RJ. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. (Editado em CD-ROM)
- BAIER, W. Estimation of field workdays in Canada from the versatile soil moisture budget. *Canadian Agric. Eng.*, v.15, n.2, p.84-7, 1973.
- BAILEY, A.C., BURT, E.C. Soil stress states under various tire loadings. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.31, n.3, p.672-82, 1988.
- BAILEY, A.C., RAPER, R.L., WAY, T.R., BURT, E.C., JHOHNSON, C.E. Soil stresses under a tractor tire at various loads and inflation pressures. *J.Terramechanics*, v.33, n.1, p.1-11, 1996.
- BALOCH, J.M., BUKHARI, S.B., MUGHAL, A.O.A., MIRANI, A.N. Effect of restrained linkage-geometry on tractor performance. *Agric.Mech. Asia, Africa L.Am.*, v.17, n.4, p.20-4, 1986.
- BARGER, E.L., LILJEDAHL, J.B., CARLETON, W.M., MCKIBBEN, E.G. Tratores e seus motores. Rio de Janeiro: USAID, 1966. 398 p. (tradução de V.L.SCHILLING).
- BICKI, T.J., SIEMENS, J.C. Crop response to wheel traffic soil compaction. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.34, n.3, p.909-13, 1991.
- BLASZKIEWICZ, Z. A method for the determination of the contact area between a tyre and the ground. *J.Terramechanics*, v.27, n.4, p.263-82, 1990.

- BLOCK, W.A., JOHNSON, C.E., BAILEY, A.C., BURT, E.C., RAPER, R.L. *Soil stress measurement under rigid wheel loading*. Charlotte: Am.Soc.Agric.Eng., 1992. 9p. (Paper, 92-1054)
- BORGES, E.N. *Resposta da soja e do eucalipto a camadas compactadas do solo*. Viçosa, 1986, 54p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa.
- BURT, E. Soil-tire/track interaction-current and future research needs. *J.Terramechanics*, v.30, n.5, p.317-23, 1993.
- BURT, E.C., BAILEY, A.C., PATTERSON, R.M., TAYLOR, J.H. Combined effects of dynamic load and travel reduction on tire performance. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.22, n.1-3, p.40-5, 1979.
- BUSSCHER, W.J., BAUER, P.J., CAMP, C.R., SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil & Tillage Res.*, v.43, p.205-17, 1997.
- CAMARGO, O.A., ALLEONI, L.R.F. *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba: Degaspar, 1997. 132 p.
- CARPENEDO, V. *Compressibilidade de solos em sistemas de manejo*. Porto Alegre-RS, 1994. 106p. Tese(Doutorado em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CARROW, R.N. Influence of soil compaction on three turfgrass species. *Agron.Jour.*, v.72, n.6, p.1038-42, 1980.
- CASTRO NETO, P. *Estimativa da evapotranspiração real baseada na evapotranspiração potencial e na umidade do solo*. Viçosa, 1979, 47p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/agrometeorologia) – Universidade Federal de Viçosa.

- CASTRO NETO, P., LANÇAS, K.P., NAGAOKA, A.K. Sistema para avaliação da compactação do solo em áreas de reforma da cultura da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO DA SBI-Agro, 2, 1999a, Campinas-SP. Anais... Campinas: Softex Agrosoft, 2000. (Editado em CD-ROM)
- CASTRO NETO, P., NAGAOKA, A.K., LANÇAS, K.P. Agricultura de precisão: sistema de processamento de dados para elaboração de mapas de isocompactação. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu-SP. Anais... Botucatu-SP: UNESP-FCA, 1999b. p.449-53.
- CASTRO NETO, P., NAGAOKA, A.K., LANÇAS, K.P. Agricultura de precisão: mapas de isocompactação. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu-SP. Anais... Botucatu-SP: UNESP-FCA, 1999c. p.454-59.
- CASTRO NETO, P., NAGAOKA, A.K., LANÇAS, K.P., BENEZ, S.H. Resistência à penetração do solo antes e após a colheita mecanizada da soja sob diferentes sistemas de manejo. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu-SP. Anais... Botucatu-SP: UNESP-FCA, 1999d. p.444-8
- CASTRO NETO, P., SOARES, A.M. *Avaliação sazonal de métodos para estimativa da evapotranspiração potencial diária em Lavras, Estado de Minas Gerais*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6, 1989, Maceió. *Resumos...* Maceió: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1989a. p.265-74.
- CASTRO NETO, P., SOARES, A.M. *Métodos para estimativa da evapotranspiração potencial*. Escola Superior de Agricultura de Lavras, 1989b, 6p. (Boletim técnico)
- CETIN, H. An experimental study of soil memory and preconsolidation adjacent to an active tectonic structure: the Meers fault, Oklahoma, USA. *Eng. Geology*, v.57, p.169-78, 2000.
- CHANCELLOR, W.J. Compaction of soil agricultural equipment. *Bull. Div. Agric. Sci.. Univ. Calif.*, n.1881, p.1-53, 1977.

- CHANDLER, H.W., STAFFORD, J.V. A simple field test for predicting ease of cultivation. *Soil & Tillage Res.*, v.10, p.269-75, 1987.
- CINTRA, F.L.D., MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. *R.Bras.Ci.Solo*, v.7, p.197-201, 1983.
- COATES, W. Tractive performance of a rigid wheel on a simulated martian soil. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.34, n.3, p.740-7, 1991.
- CORDEIRO, M.A.L. *Desempenho de trator agrícola em função do pneu, da lastragem e da velocidade de deslocamento*. Botucatu, 2000. 153p. Tese(doutorado em Agronomia, área de concentração em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- CORRÊA, A.A.M. *O desenvolvimento da mecanização agrícola no Brasil*. Monografia, Rio de Janeiro-RJ, 1996, 17p.
- DEFENSE MAPPING SCHOOL. *Soil trafficability*. Fort Belvoir, Virginia, 1986. 62 p. (Student pamphlet, DMS no. ST222)
- DIAS JUNIOR, M.deS., FERREIRA, M.M., FONSECA, S., SILVA, A.R., FERREIRA, D.F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. *R.Árvore*, v.23, n.4, p.371-80, 1999.
- DIAS JUNIOR, M.deS., PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Tech.*, v.8, p.139-51, 1995.
- DIAS JÚNIOR, M.deS., PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *R.Bras.Ci.Solo*, v.20,p.175-82, 1996.

- DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Tópicos em Ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.55-94
- DUMAS, W.T., TROUSE, A.C. SMITH, L.A., KUMMER, F.A., GILL, W.R. Development and evaluation of tillage and other cultural practices in a controlled traffic system for cotton in the southern coastal plains. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.16, p.872-5, 880, 1973.
- DYER, J.A., BAIER, W. Weather-based estimation of field workdays in fall. *Canadian Agric. Eng.*, v.21, n.2, p.119-22, 1979.
- EARL, E. Prediction of trafficability and workability from soil moisture deficit. *Soil & Tillage Res.*, v.40, p.155-68, 1997.
- ELLIOTT, R.L., LEMBKE, W.D., HUNT, D.R. A simulation model for predicting available days for soil tillage. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.20, n.8, p.4-8, 1977.
- ERBACH, D.C. KNOLL, K.K. *Inflation pressure effect on soil compaction*. Nashville: Am. Soc.Agric.Eng., 1992. 13p. (Paper, 92-1582)
- F.A.O. *Agricultural engineering in development: agricultural tyres*. Rome: FAO, 1993. 71 p. (FAO Agricultural Services Bulletin 104)
- FENNER, P. T. *Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita da madeira*. Botucatu, 1999, 135p. Tese (Livre-docência na disciplina de Exploração Florestal do Departamento de Ciências Florestais) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

- FERNANDES, H.C. *Máquinas de exploração florestal: compactação das trilhas e dias potencialmente úteis para o trabalho*. Botucatu, 1996. 145p. Tese(doutorado em Agronomia, área de concentração em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- FERNANDES, J. *A subsolagem no controle da compactação do solo na cana-soca (Saccharum spp) variedade CB 41-76 e seus efeitos no rendimento agrícola e no sistema radicular*. Piracicaba, 1979. 158p. Tese(Mestrado em Solos e Nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- FIRTH, J., MURPHY, G. Skidtrails and their effect on the growth and management of young *Pinus radiata*. *New Zealand Jour.For.Sci.*, v.19, n.1, p.22-8, 1989.
- FLORES, J.A., BARGEN, K.V., GRISSO, R.D. *Soil moisture criteria for estimating workdays*. Columbus: Am.Soc.Agric.Eng., 1990. 19p. (Paper, 90-1083)
- FRISBY, J.C. Estimating good working days available for tillage in Central Missouri. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.13, p.641-3, 1970.
- FULTON, C.V., AYRES, G.E. *Expected number of days suitable for fields work in Iowa at selected probability levels*. Chicago: Am.Soc.Agric.Eng., 1975. 7p. (Paper, 75-1503)
- GABRIEL FILHO, A. *Influência da variação de algumas propriedades físicas do solo no desenvolvimento de plantas de eucalipto (Eucalyptus grandis)*. Botucatu, 1993. 100p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- GALETI, P.A. *Mecanização agrícola – preparo do solo*. Campinas-SP: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1981. 230 p.

- GENRO JUNIOR, S.A., SILVA, V.R., REINERT, D.J., REICHERT, J.M., ZANETTE, A.  
Relação da pressão de pre-consolidação com o estado inicial de compactação e grau de saturação em água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1999, Rio de Janeiro-RJ. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileiro de Ciência do Solo, 1999, 1 p. (Editado em CD-ROM)
- GODBOLE, R., ALCOCK, R., HETTIARATCHI, D. The prediction of tractive performance on soil surfaces. *J.Terramechanics*, v.30, n.6, p.443-59, 1993.
- GUERRA, S.P.S., LANÇAS, K.P., ABILIO, M., FENNER, P.T. Compactação do solo e déficit hídrico no comportamento do sistema radicular de mudas de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11, 1999, Botucatu. *Resumos/Biológicas...* Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 1999. p.247.
- GUERRA, S.P.S., LANÇAS, K.P., MAZETTO, F.R. Utilização do DGPS e do penetrômetro hidráulico-eletrônico para localização de pontos e avaliação da compactação do solo. In: REUNIÃO CIENTÍFICA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS DO LAGEADO, 7, 2000, Botucatu. *Resumos...* Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2000. p.85.
- GUIA RURAL. *Tratores e máquinas agrícolas*. São Paulo-SP: Julho, 1991. 170p.
- HADAS, A., WOLF, D., RAWITZ, E. Residual compaction effects on cotton stand and yields. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.30, n.3, p.691-6, 1985.
- HALLONBORG, U. Super ellipse as tyre-ground contact area. *J.Terramechanics*, v.33, n.3, p.125-32, 1996.
- HASSAN, A.E., BROUGHTON, R.S. Soil moisture criteria for tractability. *Canadian Agric. Eng.*, v.17, n.2, p.124-9, 1975.
- HEITSHU, D.C. The kinematics of tractor hitches. *Agric.Eng.*, v.33, n.6, p.343-6, 356, 1952.

- HETZ, E. Tiempo disponible para ejecutar operaciones agrícolas mecanizadas em Nuble Central: 1982-1987. *Agro-Ciencia*, v.4, n.1, p.59-65, 1988.
- HETZ, E., RIQUELME, J. Desarrollo y validación de un modelo computacional que determina días apropiados para ejecutar faenas agrícolas mecanizadas. *Agro Sur*, v.17, n.2, p.95-104, 1989.
- HOLTMAN, J.B., PICKETT, L.K., ARMSTRONG, D.L., CONNOR, L.J. A systematic approach to simulating corn production systems. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.16, p.19-23, 1973.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1981. 733 p.
- JONES, J.W., VERMA, B.P. A digital simulation of the dynamic soil moisture status. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.14, n.4, p.660-4, 1971.
- KILNER, J.R. Pneumatic tire model for aircraft simulation. *Jour.Aircraft*, v.19, n.10, p.851-7, 1982.
- KLAR, A.E. Organização das plantas. In: \_\_. *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. São Paulo: Nobel, 1984. p.215-32.
- KNIGHT, S.J., FREITAG, D.R. Measurement of soil trafficability characteristics. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.5, p.121-32, 1962.
- KNIGHT, S.J., GREEN, A.J. Deflection of a moving tire on firm to soft surfaces. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.5, n.2, p.116-20, 1962.
- KOMANDI, G. The determination of the deflection, contact area, dimensions, and load carrying capacity for driven pneumatic tires operating on concrete pavement. *J.Terramechanics*, v.13, n.1, p.15-20, 1976.



- KONDO, M.K. *Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos*. Lavras-MG, 1998. 95p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras.
- KONDO, M.K., DIAS JUNIOR, M.deS. Compressibilidade de três Latossolo em função da umidade e uso. *R. Bras. Ci. Solo*, v.23, p.211-8, 1999a.
- KONDO, M.K., DIAS JUNIOR, M.deS. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, v.23, p.497-506, 1999b.
- KONDO, M.K., DIAS JUNIOR, M.deS. Estimativa do efeito do uso e da umidade do solo sobre a compactação adicional de três Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, v.23, p.773-82, 1999c.
- KOOLEN, A.J., KUIPERS, H. *Agricultural soil mechanics*. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 241 p.
- LANÇAS, K.P. *A compactação do solo agrícola*. Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1996a. 23p.
- LANÇAS, K.P. Recalque do solo – curvas pressão-deslocamento. In: *Dinâmica dos solos na interação com rodados e ferramentas agrícolas*, notas de aula VI, p. 4-9. 1997.
- LANÇAS, K.P. *Desempenho operacional de pneus radiais em função da pressão de inflação, da lastragem e do deslizamento das rodas de tratores agrícolas*. Botucatu, 1996b. 171 p. Tese (Livre docência na disciplina de Mecânica Aplicada do Departamento de Engenharia Rural) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- LANÇAS, K.P., CASTRO NETO, P., NAGAOKA, A.K. Índice de cone e mapas de isocompactação do solo agrícola utilizando um penetrômetro hidráulico-eletrônico e um sistema de posicionamento global diferencial. In: *SIMPÓSIO SOBRE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2*, 1999, Piracicaba-SP. Anais... Piracicaba-SP: ESALQ-USP, 1999.

- LANÇAS, K.P., CASTRO NETO, P., NAGAOKA, A.K., GUERRA, S.P.S. Índice de cone e mapas de isocompactação do solo agrícola, obtidos com a utilização de um penetrômetro hidráulico-eletrônico e um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS). In: BALASTREIRE, L.A. *O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil*. Piracicaba: L.A.Balastreire, 2000a. p. 113-23.
- LANÇAS, K.P., CASTRO NETO, P., NAGAOKA, A.K., GUERRA, S.P.S. Soil cone penetration resistance and moisture maps for sugar cane field. In: AgEng2000, 2000, Warwick-UK. Abstracts... Warwick: European Society of Agricultural Engineers, 2000b, p.337-8.
- LANÇAS, K.P., SANTOS FILHO, A.G., UPADHYAYA, S.K. Soil compaction evaluation in function of soil conditions, tire characteristics, and wheel slip. In: EURAGENG, 1998, Oslo. Proc... Oslo, 1998. (Paper, 98-A-031).
- LANÇAS, K.P., UPADYAYA, S. K. *Pneus radiais para tratores: guia para seleção correta da pressão de inflação*. Botucatu, Energia na Agricultura, 1997. 33p. (Boletim técnico nº 1).
- LIPIEC, J., HAKANSSON, I., TARKIEWICZ, S., KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil & Tillage Res.*, v.19, p.307-17, 1991.
- LOPES, A. *Desempenho de um trator agrícola em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de deslocamento em um solo argiloso*. Botucatu, 2000. 131p. Tese(doutorado em Agronomia, área de concentração em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.
- LYASKO, M.I. The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tire on a rigid surface. *J.Terramechanics*, v.31, n.4, p.239-246, 1994.

- MACEDO, V.R.M. *Compressibilidade de um Podzólico Vermelho-Escuro fisicamente degradado e recuperado*. Porto Alegre-RS, 1993. 88p. Dissertação(Mestrado em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MAH, M.M. *Parâmetros físicos ( $K_c, K_f, n$ ) referentes à resistência ao rolamento e suas relações com a umidade, em dois solos*. Viçosa-MG, 1980, 52 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização agrícola) – Universidade Federal de Viçosa.
- MANTOVANI, E.C. *A soil surface traffic – corn yield model for a soil under cerrado vegetation in Brazil with less than 10 years of cultivation*. West Lafayette, IN, 1984. 171 p. Thesis(Agricultural mechanization) – Purdue University.
- MAZETTO, F.R., LANÇAS, K.P. Determinação da área de contato de pneus agrícolas utilizando uma prensa hidráulica estática. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12, 2000, São José do Rio Preto. *Resumos...* São José do Rio Preto: Universidade Estadual Paulista, 2000. p.260.
- McKIBBEN, E.G. Effect of drawbar pull upon the effective weight on front and rear wheels of farm tractor. *Agric.Eng.*, v.9, n.8, p.243-5, 1928.
- McKYES, E. *Agricultural Engineering soil mechanics*. Amsterdam: Elsevier, 1989. 291 p.
- McKYES, E. *Soil cutting and tillage*. Amsterdam: Elsevier, 1985. 217 p.
- MIALHE, L.G. *Manual de mecanização agrícola*. São Paulo: Editora Ceres, 1974. 301p.
- MIALHE, L.G. *Máquinas motoras na agricultura*. São Paulo: Edusp, 1980. 367p.

- MORAES, M.H. *Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e no desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja (Glycine max (L.) Merrill)*. Piracicaba, 1988. 106p. Dissertação(Mestrado em Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- MORAES, M.H., BENEZ, S.H. Efeito de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma terra roxa estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. *Eng. Agrícola*, v.16, n.2, p.31-41, 1996.
- MORTON, C.T., BUCHELE, W.F. Emergence energy of plant seedlings. *Agric.Eng.*, v.41, n.7, p.428-31,453, 1960.
- MULLER, L., TILLE, P., KRETSCHMER, H. Trafficability and workability of alluvial clay soil in response do drainage status. *Soil & Tillage Res.*, v.16, p.273-87, 1990.
- MULLIGAN, M.F., SMUCKER, A.J.M., SAFIR, G.F. Tillage modifications of dry edible bean root colonization by VAM fungi. *Agron.Jour.*, v.77, n.1, p.140-4, 1985.
- MUNSON, K.L., ERBACH, D.C., BERN, C.J. Tire inflation pressure and soil compaction. Kansas City: Am.Soc.Agric.Eng., 1994. 11p. (Paper, 94-1052)
- NAGAOKA, A.K., CASTRO NETO, P., LANÇAS, K.P., BENEZ, S.H. Índices de cone na linha e na entrelinha de plantio da soja em diferentes tipos de manejo do solo. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu-SP. Anais... Botucatu-SP: UNESP-FCA, 1999. p.470-4.
- OHU, J.O., RAGHAVAN, G.S.V., McKYES, E. Cone index prediction of compacted soils. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.31, n.2, p.306-10, 1988.

- OLIVEIRA, M.L.de, BARBOSA, J.A., SOUZA, C.M.de, DIAS, G.P. Estimativa da compactação do solo pelo método da curva de compactação virgem do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1997, Rio de Janeiro-RJ. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997, 4 p.
- PAVLICS, F. *Instruments for the measurement of physical soil values. In.: A soil value system for land locomotion mechanics, Report n. 5, 1958. ( Department of the Army, Ordnance Tank Automotive Command) p. 14-24*
- PECHE FILHO, A., COELHO, J.L.D. Aspectos gerais de mecanização na cultura do feijão. In: SILVEIRA, G.M. IV Ciclo de Estudos Sobre Mecanização Agrícola. Campinas, Fundação Cargill, p.97-155. 1990.
- PERDOK, U.D., ARTS, W.B.M. The performance of agricultural tyres in soft soil conditions. *Soil & Tillage Res.*, v.10, p.319-30, 1987.
- PEREIRA, F.J.S., GARCIA, A.G.Y., VEIGA, C.M., MOLIN, P.J. Variabilidade espacial da resistência à penetração e umidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza-CE. Separata... Fortaleza-CE: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000. 3 p.
- PERSSE, S.P.E., JOHANSSON, S. A weight-transfer hitch for pull-type implements. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.10, n.6, p.847-9, 1967.
- PERUMPRAL, J.V. Cone penetrometer applications – a review. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.30, n.4, p.939-44, 1987.
- PLACKETT, C.W. A review of force prediction methods of off-road wheels. *J. Agric. Eng. Res.*, v.31, p.1-29, 1985.

- PORTERFIELD, J.W., CARPENTER, T.G. Soil compaction: an index of potential compaction for agricultural tires. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.29, n.4, p.917-22, 1986.
- RAPER,R.L., BAILEY,A.C., BURT,E.C., JOHNSON,C.E. *Prediction of soil stresses caused by tire inflation pressures and dynamic loads*. Atlanta: Am.Soc.Agric.Eng., 1994. 14p. (Paper, 94-1547)
- REEDER, R.C., WOOD, R.K., FINCK, C.L. Five subsoiler designs and their effect on soil properties and crop yields. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.36, n. 6, p.1525-31, 1993.
- REINERT, D.J. *Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf*. Michigan, 1990. 129p. Dissertação(Doctor of Philosophy-Department of crop and soil sciences) – Michigan State University
- RENEDO, V.S-G. *Dinámica y mecánica de suelos*. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1996. 426 p.
- ROSENBERG, S.E., ROTZ, C.A., BLACK, J.R., MUHTAR, H. *Prediction of suitable days for field work*. Madison: Am.Soc.Agric.Eng., 1982. 17p. (Paper, 82-1832)
- ROUNSEVELL, M.D.A., JONES, R.J.A. A soil and agroclimatic model for estimating machinery work-days: the basic model and climatic sensitivity. *Soil & Tillage Res.*, v.26, p.179-91, 1993.
- RUBIN, R.B., SILVA, V.R., REINERT, D.J., REICHERT, J.M., ZANETTE, A. Compressibilidade de dois solos sob plantio direto em função do estado inicial de compactação do solo. In: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 6, 1998, Brasília-DF. *Resumos...* Brasília-DF: Sociedade Brasileira de Plantio Direto na Palha, 1998. p.12-3.

RUMSEY, J.W., TORRES, D.de. *Soil trafficability in California loam soils*. New Orleans: Am.Soc.Agric.Eng., 1989. 12p. (Paper, 89-1547)

RUTLEDGE, P.L., McHARDY, F.V. The influence of the weather on field tractability in Alberta. *Canadian Agric. Eng.*, v.10, n.2, p.70-3, 1968.

SANTOS FILHO, A.G., LANÇAS, K.P. Efeito da geometria do prato de recalque para levantamento de parâmetros físicos do solo. *Energ.Agric.*, v.13, n.1, p. 18-31, 1998.

SANTOS FILHO, A.G.dos. *Caracterização física do solo para avaliação do desempenho de rodados pneumáticos de tratores agrícolas*. Botucatu, 1998. 194p. Tese(doutorado em Agronomia, área de concentração em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

SANTOS, C.A.dos. *Projeto e construção de um penetrômetro hidráulico-eletrônico*. Botucatu-SP, 1998, 105 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

SANTOS, P.I.B, LANÇAS, K.P. Determinação da área de contato entre um pneu agrícola e uma superfície rígida utilizando-se o método da prensa hidráulica. *Energ.Agric.*, v.14, n.3, p.57-64, 1999.

SCHMID, I.C. Interaction of vehicle and terrain results from 10 years research at IKK. *J.Terramechanics*, v.32, n.1, p.3-26, 1995.

SCHWANGHART, H. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ISTVS, 10, 1990, Kobe, Japão. Proceedings... Kobe, Japão, 1990. p.193-204.

- SEDIYAMA, G.C., PRUITT, W.O., COSTA, J.M.N.da, BERNARDO, S. Modelo para computação da irrigação suplementar e do número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas na produção da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *R.Ceres*, v.26, n.145, p.238-50, 1979.
- SELIRIO, I.S., BROWN, D.M. Estimation of spring workdays from climatological records. *Canadian Agric. Eng.*, v.14, n.2, p.79-81, 1972.
- SHARMA, A.K., PANDEY, K.P. A review on contact area measurement of pneumatic tyre on rigid and deformable surfaces. *J.Terramechanics*, v.33, n.5, p.253-64, 1996a.
- SHARMA, A.K., PANDEY, K.P. The deflection and contact characteristics of some agricultural tyres with zero sinkage. *J.Terramechanics*, v.33, n.6, p.293-9, 1996b.
- SHMULEVICH, I., RONAI, D., WOLF, D. A new field single wheel tester. *J.Terramechanics*, v.33, n.3, p.133-41, 1996.
- SILVA JÚNIOR, R.L., MOLIN, J.P., AMARAL, J.R. Caracterização de um penetrômetro hidráulico montado em trator com instrumentação eletrônica para aquisição de dados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza-CE. Separata... Fortaleza-CE: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000. 3 p.
- SILVA, V.R. *Compressibilidade de um Podzólico e um Latossolo em função do estado inicial de compactação e saturação em água*. Santa Maria-RS, 1999. 98p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Área de Concentração em Biodinâmica de Solos) – Universidade Federal de Santa Maria.
- SILVA, V.R., REINERT, D.J., REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo.. *R. Bras. Ci. Solo*, v.24, p.239-49, 2000.



- SILVA, V.R., RUBIN, R.B., REINERT, D.J., REICHERT, J.M., SOUTO, J. Pressão crítica de pré-adensamento e índice de compressão em função do grau de saturação. In: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 6, 1998, Brasília-DF. *Resumos...* Brasília-DF: Sociedade Brasileira de Plantio Direto na Palha, 1998. p.65-7.
- SMITH, C.W., JOHNSTON, M.A., LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. *Soil & Tillage Res.*, v.41, p.53-73, 1997.
- SOANE, B.D., BLACKWELL, P.S., DICKSON, J.W., PAINTER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: a review. I. soil and wheel characteristics. *Soil & Tillage Res.*, v.1, p.207-37, 1980/1981.
- SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. Soil Compaction problems in world agriculture. In: \_\_. Soil compaction in crop production. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.1-22.
- SOEHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agric.Eng.*, v.39, n.5, p.276-81,290, 1958.
- SOUZA, A.de, ASSIS, S.V.de, OLIVEIRA, C.R.de, LAURETTO, M. Modelo para estimar o número de dias trabalháveis com tratores agrícolas. *Lavoura Arrozeira*, v.45, n.401, p.8-12, 1992.
- SOUZA, Z.M., ALVES, M.C., Influência de usos e manejos na densidade do solo, porosidade e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho-Escuro de cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza-CE. Separata... Fortaleza-CE: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000. 3 p.

- SVERZUT, C.B., MANTOVANI, E.C., LINS E SILVA, M.L. Mapeamento da resistência do solo à penetração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza-CE. Separata... Fortaleza-CE: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000. 11 p.
- TAYLOR, J.C., BELTRAME, L.F.S. Por que, quando e como utilizar a subsolagem. *Lavoura Arrozeira*, v.3, p.34-44, 1980.
- TAYLOR, J.H., BURT, E.C., BAILEY, A.C. Effect of total load on subsurface soil compaction. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.23, n.1-3, p.568-70, 1980.
- TAYLOR, J.H., BURT, E.C., BAILEY, A.C. Radial tire performance in firm and soft soils. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.19, n.6, p.1062-4, 1976.
- THOMASSON, A.J. Soil and climatic aspects of workability and trafficability. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANIZATION, 10, 1982, Osijek-Yugoslavia. Proceedings... Osijek-Yugoslavia, 1982. P.551-7.
- TREIN, C.R., BOENI, M. Pressão de pre-consolidação do solo influenciado pelo teor de água do solo e pressão de inflação dos pneus do trator. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza-CE. Separata... Fortaleza: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000, 3p.
- TULU, M.Y., HOLTMAN, R.B., FRIDLEY, R.B., PARSONS, S.D. Timelines costs and available working days – shelled corn. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.17, p.798-800, 1974.
- UPADHYAYA, S.K., CHANCELLOR, W.J., PERUMPRAL, J.V., SCHAFER, R.L., GILL, W.R., VANDENBERG, G.E. Advances in soil dynamics. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1994. 313 p.

- UPADHYAYA, S.K., CHANCELLOR, W.J., SHMULEVICH, I., WOLF, D., HADAS, A. A *traction/soil compaction prediction model*. Chicago: Am.Soc.Agric.Eng., 1995. 22p. (Paper, 95-1329)
- UPADHYAYA, S.K., WULFSOHN, D. Relationship between tire deflection characteristics and 2-D tire contact area. *Trans.Agric.*, v.33, n.1, p.25-30, 1990.
- VALMET DO BRASIL S.A. *Pneus agrícolas e lastragem*. s.l., 1993?. 24p.
- VANDENBERG, G.E., GILL, W.R. Pressure distribution between a smooth tire and the soil. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.5, n.2, p.105-7, 1962.
- VIEIRA, L.B. *Parâmetros físicos ( $K_c, K_f, n$ ) referentes à resistência ao rolamento em nove solos, sob duas condições de umidade*. Viçosa-MG, 1982, 45 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização agrícola) – Universidade Federal de Viçosa.
- VIEIRA, L.B., DIAS, G.P. *Penetrometria e caracterização física do solo*. Viçosa, 1997, 21 p. (Caderno Didático).
- VON BARGEN, K., MENG, J., SCHROEDER, M.A. *Field working time for agricultural equipment management in Nebraska*. San Luis Obispo: Am.Soc.Agric.Eng., 1986. 17p. (Paper, 86-1024)
- VOORHEES, W.B. Wheel-induced soil physical limitations to root growth. *Adv.Soil Sci.*, v.19, p.73-95, 1992.
- WITNEY, B.D. *Choosing and using farm machines*. Edinburgh: Land Technology, 1995. 412 p.
- WITNEY, B.D., ERADAT OSKOUI, K., SPEIRS, R.B. A simulation model for predicting soil moisture status. *Soil & Tillage Res.*, v.2, p.67-80, 1982.

WOOD, R.K., REEDER, R.C., MORGAN, M.T., HOLMES, R.G. Soil physical properties as affected by grain cart traffic. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.36, n.1, p.11-4, 1993.

WÖSTEN, J.H.M., BOUMA, J. Using simulation to define moisture availability and trafficability for a heavy clay soil in the Netherlands. *Geoderma*. V.35, p.187-96, 1985.

WULFSOHN, D., UPADHYAYA, S.K. Determination of dynamic three-dimensional soil-tyre contact profile. *J.Terramechanics*, v.29, n.4/5, p.433-64, 1992a.

WULFSOHN, D., UPADHYAYA, S.K. Prediction of traction and soil compaction using three-dimensional soil-tyre contact profile. *J.Terramechanics*, v.29, n.6, p.541-64, 1992b.