

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

INFLUÊNCIA DA DENSIDADE E DO TEOR DE ÁGUA DO SOLO NO
ÍNDICE DE CONE DE UM LATOSSOLO VERMELHO ESCURO.

Por:

MANFREDO LUIZ LINS E SILVA

Orientador: Prof. Dr. CLÁUDIO BIANOR SVERZUT

Co-orientador: Dr. EVANDRO CHARTUNI MANTOVANI

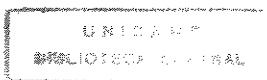
Barcar

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Manfredo Luiz Lins e Silva e aprovada pela Comissão Julgadora em 22 de dezembro de 1994. Campinas, 20 de fevereiro de 1995.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Cláudio Bianor Sverzut
Presidente da Banca

Campinas, Dezembro de 1994.



DEDICATÓRIA

Dedico este capítulo da minha vida acadêmica aos meus pais Oswaldo e Idaisa e a minha querida noiva Rita.

Faço esta dedicatória pelo o que vocês representam na minha vida, ao meu pai pelo exemplo de luta e perseverança que sempre empenhou na sua vida de homem dedicado à família e à agricultura, à minha mãe pela dedicação e amor desprendidos aos filhos e à Rita pelo incentivo e paciência em aceitar as horas e finais de semanas dedicados por mim ao estudo.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Cláudio Bianor Sverzut pelo incentivo, orientação e amizade.

Aos pesquisadores da EMBRAPA-CNPMS Drs. Evandro Chartuni Mantovani e Bárbara Heliodora Machado Mantovani pelo apoio para a realização deste trabalho, orientação técnica, empenho pessoal e amizade.

Ao comitê de orientação, professor Dr. Luiz Antonio Daniel e Nelson Luís Capelli, pelo apoio técnico, colaboração e amizade.

Ao colega e amigo Walter Luiz Castro Mewes pelo auxílio em todas as etapas do trabalho em especial no campo.

Aos funcionários do Laboratório de Protótipos e Instrumentação Dércio Tabossi, Francisco F. dos Santos Filho, José Maria da Silva, Luiz Carlos dos Santos Silva, Roberto Carlos de Souza e Marcos Aurélio Miguel (Lab. Instrumentação) pelas idéias, apoio e dedicação no trabalho de construção do penetrógrafo.

Aos funcionários da EMBRAPA que direta ou indiretamente colaboraram, em especial Flávio Antonio de Souza, João Batista Guimarães Sobrinho, Levi Fortunato da

Paz, Márcio Gonçalves Lourenço, Vânia Maria dos Reis Lopes e Thomaz Henrique Santos Edmundo, pela exemplar dedicação ao trabalho, esforço, amizade e extraordinário espírito de equipe.

Ao Paulo J. R. Albuquerque e Alexandre Tadeu Claro pela realização de análises do solo no Laboratório de Mecânica de Solos da FEAGRI.

A Silcar Comércio Indústria & Terraplenagem Ltda pelo empréstimo do compactador tipo pé-de-carneiro, sem o qual seria impossível a preparação do experimento.

A Valmet do Brasil S.A. pelo empréstimo do trator para as atividades de pesquisa realizadas na EMBRAPA.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) em especial ao Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), pelo apoio irrestrito em materiais, estrutura e pessoal técnico, viabilizando de forma singular o trabalho de pesquisa.

A Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas pelo apoio material e financeiro.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado concedida.

SUMÁRIO

	Página
PÁGINA DE ROSTO	i
DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Tipos de penetrômetros e penetrógrafos	5
3.2. Utilizações do índice de cone	9
3.3. Limitações do uso do índice de cone	13
3.4. Interações das propriedades do solo x compactação	16
3.5. Modelos para a compactação	23

4. MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1. Material	35
4.1.1. Local do Experimento	35
4.1.2. Solo	35
4.1.3. Trator	36
4.1.4. Pé-de-carneiro	36
4.1.5. Grade de discos média	37
4.1.6. Conjunto para a determinação da densidade do solo	37
4.1.7. Equipamento para o ensaio de compactação normal de Proctor	37
4.1.8. Penetrógrafo	38
4.1.9. Chassi do penetrógrafo	40
4.1.10. Cilindro hidráulico	41
4.1.11. Mangueiras flexíveis de alta pressão com engates rápidos	41
4.1.12. Válvula limitadora de vazão (ajustável)	41
4.1.13. Haste e cone de aço inoxidável	42
4.1.14. Célula de carga	42
4.1.15. Sensor de profundidade	42
4.1.16. Condicionador de sinal da célula de carga	43
4.1.17. Gerenciador eletrônico do penetrógrafo	43
4.1.18. Data logger	44
4.1.19. Micro computador portátil	44
4.1.20. Baterias automotivas de 12 V	44
4.1.21. Montagem do sistema hidráulico	45
4.1.22. Montagem do sistema eletrônico	46
4.2. Métodos	47
4.2.1. Determinação do teor de água do solo ótimo de compactação no ensaio Normal de Proctor	47
4.2.2. Preparação das unidades experimentais	47
4.2.3. Determinação do teor de água do solo	49

4.2.4. Determinação da densidade do solo	50
4.2.5. Determinação da resistência do solo à penetração	50
4.2.6. Descrição dos tratamentos e nomenclatura utilizada	51
4.2.7. Porosidade total do solo	52
4.2.8. Análise estatística	52
4.2.9. Modelos matemáticos	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1. Ensaio de compactação Normal de Proctor	54
5.2. Teor de água do solo para a compactação	55
5.3. Densidade do solo	56
5.4. Teor de água do solo durante o experimento	56
5.5. Índices de cone, velocidades de penetração e profundidades medidas	57
5.6. Efeito da densidade e do teor de água do solo no índice de cone	58
5.7. Porosidade total do solo	61
5.8. Modelos matemáticos	62
6. CONCLUSÕES	65
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
8. ANEXOS	68
Anexo I	68
Anexo II	71
Anexo III	73
Anexo IV	75
Anexo V	77
Anexo VI	83
Anexo VII	87
Anexo VIII	88
Anexo IX	90
Anexo X	93

Anexo XI	94
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Curva de compactação do latossolo Vermelho Escuro	20
2. Vista lateral do penetrógrafo	38
3. Vista em perspectiva do penetrógrafo	39
4. Vista frontal da instrumentação	39
5. Vista superior da instrumentação	40
6. Diagrama do sistema hidráulico do conjunto trator-penetrógrafo	45
7. Diagrama do sistema eletrônico do penetrógrafo	46
8. Trabalho de compactação (com trator e grade no primeiro plano e pé-de-carneiro ao fundo)	48
9. Trabalho de compactação (com pé-de-carneiro no primeiro plano e trator e grade ao fundo)	49
10. Pontos da curva do ensaio Normal de Proctor (densidade x teor de água do solo)	54
11. Gráfico dos resultados do I.C. em função da densidade e do teor de água do solo, com localização das combinações dos tratamentos	61

LISTA DE TABELAS

	Página
1. Análise da textura, densidade da partícula do solo e ensaio normal de Proctor	36
2. Resultados do ensaio de compactação normal de Proctor	55
3. Teor de água do solo na data da compactação	55
4. Teste de Tuckey para médias de velocidade nos tratamentos	57
5. Ordenação dos tratamentos para análise estatística dos efeitos de densidade e teor de água do solo no resultado do índice de cone	60

RESUMO

Com a utilização de um penetrômetro hidráulico, com controle de velocidade de penetração e aquisição eletrônica dos dados, especialmente construído conforme recomendação da Sociedade Americana de Engenharia Agrícola ASAE - R313.1 de 1978, foi possível analisar o índice de cone de um Latossolo Vermelho Escuro Álico e propor modelos matemáticos em função da variação da densidade e do teor de água deste solo (em condições de campo).

Na preparação do experimento, o solo foi previamente compactado com diferentes energias de compactação e umidificado com diferentes lâminas de chuva, de forma a permitir a existência de várias amostras com distintas densidades e teores de água do solo. O experimento foi conduzido no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (CNPMS-EMBRAPA) em Sete Lagoas - MG. As unidades experimentais de solo foram caracterizadas quanto a granulometria, ao teor de água do solo, a densidade do solo e a densidade da partícula.

Deste trabalho concluí-se que é necessário muito critério na análise da dureza do solo e sua correlação com compactação (prejudicial ao desenvolvimento radicular das

plantas), o solo mesmo em níveis baixos de densidade (não estando compactado) pode apresentar-se extremamente duro em função de déficit hídrico.

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa agrícola tem dado grande ênfase aos problemas de conservação do solo causado pela mecanização intensiva. Vários tipos de manejo e maneiras de preparo do solo vem sendo estudados e propostos nos últimos anos. Observa-se que a tendência em solos tropicais é a utilização de um modelo de mecanização onde o solo com um mínimo de mobilização ofereça condições agronômicas satisfatórias à implantação de uma cultura economicamente viável.

O estudo da interação máquina-solo, em conjunto com o da problemática da compactação dos solos, tem tomado lugar de destaque nas pesquisas agrícolas de mecanização. A variabilidade espacial dos solos e as muitas opções de mecanização, são as principais fontes causadoras de dúvidas e problemas no dimensionamento da mecanização da agricultura, principalmente nos aspectos: econômicos; energéticos e ambientais.

No Brasil, a má escolha das operações agrícolas, bem como o momento de realizá-las, tem gerado um aumento da compactação do solo, dificultando o controle da erosão e reduzindo a rentabilidade da atividade agrícola. O diagnóstico incorreto e pouco preciso da compactação, tem levado o agricultor a realizar, de forma indiscriminada, a operação de subsolagem, que se apresenta como uma das operações mais onerosas do preparo do solo.

A problemática da compactação deve ser tratada e dividida em duas frentes:

a) Como reduzir o risco de compactação (escolhendo corretamente máquinas e momento para o preparo do solo); b) Como diagnosticar corretamente a compactação (saber analisar, corretamente, os parâmetros indicativos de compactação). Em ambos os casos o parâmetro de maior relevância é o teor de água do solo (T.A.D.S.), é este quem mais influência e determina o comportamento do solo quanto a compactação e o seu diagnóstico.

O índice de cone (I.C.), obtido pela razão entre o esforço para penetrar no solo um cone de tamanho e velocidade de deslocamento padrões, pela área da base do referido cone, tem sido amplamente utilizado para: localização de camadas compactadas do solo; avaliação da resistência mecânica que as raízes devem vencer; condições de trafecabilidade de veículos e parâmetro comparativo em estudos de dinamometria de implementos agrícolas. No entanto, a utilização do índice de cone deve ser feita com critério, pois este varia muito com as variações de densidade e T.A.D.S., podendo levar o pesquisador ou usuário a interpretações errôneas.

Os trabalhos que tratam e estudam a relação entre I.C., densidade e teor de água do solo, são escassos e limitam-se às condições de solos artificiais obtidos em laboratórios, no entanto, alguns modelos matemáticos, resultantes destes estudos, possuem excelentes coeficientes de determinação, e por esta razão alguns autores sugerem que os mesmos estudos sejam realizados diretamente no campo. A realização de trabalhos que lidam com a mecânica do solo em condições de campo, enfrentam dificuldades, devido a complexidade das variáveis envolvidas, estas pesquisas, geralmente, são limitadas e de difícil aplicação para as condições de solos do Brasil, visto que a grande maioria dos estudos realizados foram feitos em países de climas temperados.

Com este trabalho, coloca-se a disposição de todos, alguns conceitos importantes para a utilização do I.C., nas condições brasileiras de campo, visando facilitar a utilização de práticas conservacionistas, redução de custos operacionais e aumento da rentabilidade da atividade agrícola.

2. OBJETIVOS

Com o auxílio de teorias da mecânica de solo e da estatística experimental, pretende-se detectar o limite entre a dureza e a compactação do solo. Propor ainda, um modelo matemático que correlacione diferentes densidades e teores de água do solo com índices de cone de um Latossolo Vermelho Escuro Álico em condições de campo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tipos de penetrômetros e penetrógrafos.

GILL e VANDEN BERG (1967) e PERUMPRAL (1987), descrevem o penetrômetro desenvolvido pela Estação Experimental de Waterways (WES, 1948), o penetrômetro utiliza um cone circular de 30° com a área da base de $1,61 \text{ cm}^2$ ($0,5 \text{ pol.}^2$), montado em uma haste graduada de 91,4 cm de comprimento (36 pol.) e diâmetro de 0,95 cm (0,38 pol.). O equipamento desenvolvido é portátil e o esforço para penetrar o cone no solo é medido por uma mola calibrada, cuja deformação aciona um “relógio” com um ponteiro, indicando a força por unidade de área. A leitura deve ser feita a cada instante, observando a profundidade do cone na graduação da haste.

CARTER (1967) e HENDRICK (1969), desenvolveram e apresentaram dois penetrógrafos bastante semelhantes, o equipamento consistia de uma haste com cone na sua extremidade, a haste era acoplada a uma mola previamente calibrada. A força necessária para deslocar o cone no solo, produzia uma deformação proporcional na mola,

um sistema mecânico de posicionamento, através de uma caneta, registrava em um gráfico o deslocamento da mola e a respectiva profundidade do cone, gerando um gráfico com o índice de cone do solo em função da profundidade. Os referidos pesquisadores, na época, salientavam a importância de se obter um registro gráfico deste tipo de dados, reduzindo erros de leitura e exigindo menos hora-homem de trabalho no campo.

PRATHER et al (1970), projetaram e desenvolveram um penetrógrafo, com as seguintes características:

- Força máxima de 200 lbf (90,7 Kgf), em faixas de 0 a 50 lbf, 0 a 100 lbf e 0 a 200 lbf.
- Profundidade máxima de penetração de 24 pol. (60,96 cm).
- Uso de cone de 30° com área da base de 0,2 pol².
- Peso máximo do equipamento de 10 lb (4,54 Kg).
- Registrador X-Y com área útil de desenho de 4 x 6 polegadas.
- Precisão de $\pm 2\%$ do fundo de escala de cada faixa. Na construção do equipamento, foi utilizada uma célula de carga e um potenciômetro de precisão de múltiplas voltas, como transdutores de força e posição respectivamente. Os autores concluíram que todos os objetivos do projeto foram cumpridos, sendo o penetrógrafo muito simples de ser operado por uma única pessoa.

WILLIFORD et al (1972), construíram um penetrógrafo para utilização no campo, montado em um trator, o sistema possuía um estrutura que permitia obter os dados em uma largura de trabalho de até 40 pol. (101,6 cm), os dados de força eram medidos por uma célula de carga e a profundidade do cone obtida através de um potenciômetro de

precisão de multi-voltas, os sinais analógicos provenientes dos transdutores de força e posição eram grafados em um registrador X-Y. O cone era impulsionado para dentro do solo, com o auxílio de um cilindro hidráulico com curso de 24 pol. (60,96 cm). Após dois anos de uso do equipamento, os autores não encontraram qualquer tipo de problema mecânico ou operacional no penetrógrafo, eles concluíram que com o equipamento desenvolvido o tempo de aquisição de dados de I.C. é 25% do tempo utilizado por penetrógrafos manuais, isto se deve a facilidade e a simplicidade operacional obtida nos trabalhos de campo, utilizando o penetrógrafo hidráulico.

A ASAE (1978), através da recomendação ASAE R313.1, padronizou o uso do penetrômetro para fins agrícolas com as seguintes dimensões:

- a) Cone circular com ângulo de 30° , área da secção da base de $0,5 \text{ pol}^2$ ou $0,798 \text{ pol}$ de diâmetro ($3,2 \text{ cm}^2$ ou $20,27 \text{ mm}$ de diâmetro), haste de penetração com diâmetro de $0,625 \text{ pol}$ ($15,9 \text{ mm}$), recomendado para uso em solos “moles”.
- b) Cone circular com ângulo de 30° , área da secção da base de $0,2 \text{ pol}^2$ ou $0,505 \text{ pol}$ de diâmetro ($1,3 \text{ cm}^2$ ou $12,83 \text{ mm}$ de diâmetro), haste de penetração com diâmetro de $0,375 \text{ pol}$ ($9,5 \text{ mm}$), recomendado para uso em solos “duros”. Para construção dos dois tamanhos de cone deve ser utilizado aço inoxidável com rugosidade máxima de 63 micro polegadas. A capacidade de operação dos cones “a” e “b” são de aproximadamente 300 psi (21 Kgf/cm^2) e 750 psi (53 Kgf/cm^2) respectivamente, o que é bastante razoável para a maioria das condições dos solos agrícolas. Os cones devem penetrar no solo a uma velocidade constante de 72 pol/min (1829 mm/min), em solos muito duros esta velocidade pode ser inviável, neste caso velocidades um pouco menores não resultam em erros significativos. Os

cones devem ser substituídos quando houver um desgaste destes superior a 3% do diâmetro da base, pois isto implica em variações de até 5% nos resultados medidos.

SMITH e DUMAS (1978), desenvolveram um penetrógrafo elétrico, utilizado para medir a resistência do solo à penetração, o equipamento permitia medir o I.C. em uma largura de até 3 m a uma profundidade máxima de 0,80 m. O registro dos dados de força por profundidade foram feitos em um registrador X-Y. A força era medida por uma célula de carga e a profundidade dada por um potenciômetro de precisão de múltiplas voltas, o cone utilizado era de 30°. O equipamento foi construído obedecendo as recomendações de construção e operação da ASAE, a capacidade de medidas variava de 0 a 14000 KPa (142,8 Kgf/cm²), a estrutura do penetrógrafo foi projetada para ser acoplada e transportada no sistema de 3 pontos dos tratores agrícolas, um motor elétrico de 250 W, com um sistema de redução, foi utilizado para penetrar o cone no solo.

BALASTREIRE e AMARAL (1994), desenvolveram e construíram um penetrógrafo eletrônico portátil, com as suas funções controladas por um microprocessador Z80, o sistema controla as leituras dos sensores de força e profundidade, os dados são armazenados até um total de 99 curvas com 200 pontos cada, posteriormente estes dados são transferidos para um microcomputador, onde são processados e analisados. A análise e discussão dos resultados, obtidos, levaram os autores às seguintes conclusões a respeito do sistema:

- Possibilita grande economia de tempo no processamento das informações;

- Elimina a possibilidade de erros no momento da leitura das informações através do processo visual (normalmente utilizado nos penetrômetros convencionais);
- Proporciona ao usuário possibilidade de reestruturar os resultados finais em função dos seus objetivos, uma vez que os dados originais não são alterados;
- Atendeu plenamente aos requisitos inicialmente preestabelecidos de maneira satisfatória;
- Representa uma grande evolução tecnológica em relação aos métodos de determinação do índice de cone hoje utilizados no Brasil.

3.2. Utilizações do índice de cone.

REAVES, et al (1966), no estudo da performance da similitude de ferramentas planas no solo, caracterizaram as seguintes variáveis:

- a) Ferramenta: Profundidade, largura, ângulo frontal, rugosidade do metal e ângulo vertical de inclinação.
- b) Solo: Densidade do solo, coesão, ângulo de atrito interno, adesão e resistência de penetração de cone de 30°.
- c) Outras variáveis: Força horizontal de tração, aceleração da gravidade e velocidade.

Operando com a haste verticalmente, concluíram que a rugosidade do metal, o ângulo de atrito interno, o ângulo vertical de inclinação e a adesão do solo podem ser desprezados, podendo a coesão ser substituída pelo índice de cone.

O trabalho de Taylor et al em 1966, apud MCKYES (1985), é citado para ilustrar a correlação entre reduções drásticas da penetração de raízes da planta de algodão e o índice de cone. Na ocasião, os autores trabalharam em 4 tipos de solos, compactando as camadas do solo, os valores dos índices de cone, que caracterizaram estas camadas compactadas, acima de 2 MPa (aproximadamente 20 Kgf/cm²), mostraram-se proibitivos ao desenvolvimento do sistema radicular do algodão.

GILL e VANDEN BERG (1967), comentam o programa de utilização do penetrômetro, desenvolvido pelo corpo de engenheiros da estação experimental de Walterways do Exército dos E.U.A., o programa militar utilizava um cone de 30° com 0,5 pol² de secção (na parte mais larga do cone). O valor do índice de cone era lido diretamente em um dinamômetro acoplado a haste do penetrômetro. O sistema foi utilizado para prever a trafecabilidade do solo à passagem de 50 veículos. A metodologia consistia em coletar uma amostra não deformada com profundidade de 12 polegadas, um índice de cone era determinado nesta amostra, a mesma amostra era remodelada com 100 golpes de um martelo, simulando o efeito da passagem de 50 veículos, nesta nova condição era determinado um novo I.C. chamado de "remodelado". O produto dos índices de cone (antes e depois de remodelada a amostra) era denominado como I.C. padrão, o qual era comparado com o padrão de índice de cone que um determinado veículo produzia com 50 passadas no solo, qualquer solo que possuísse um padrão igual ou maior do que o proporcionado por 50 passadas de um veículo qualquer, permitiria trafecabilidade para o veículo em questão.

A ASAE (1978), recomendou o uso de penetrômetros, para a obtenção do índice de cone do solo. A pressão requerida para mover um cone circular com ângulo de 30° através do solo, é expressa em libra força por polegada ao quadrado (lbf/pol^2) ou quilograma força por centímetro quadrado (Kgf/cm^2), esta pressão é um índice de resistência do solo à penetração, comumente chamado de índice de cone. Atender os seguintes propósitos, são objetivos da padronização:

- Promover um método comum, para expressar as propriedades mecânicas do solo e facilitar as interpretações e comparações entre os trabalhos produzidos nos diferentes centros de pesquisas;
- Atender a necessidade de comparações de propriedades dos solos, em trabalhos que utilizam diversos tipos e condições de solos;
- Promover um sistema de caracterização de propriedades do solo, no qual pode ser possível estabelecer relações de performance e predição de modelos.

A ASAE adverte que as recomendações, servem somente como um meio de se medir, descrever e reportar a resistência do solo à penetração, não provendo valores específicos de coesão, ângulo de atrito do solo ou coeficiente de atrito solo - metal.

KOOLEN e KUIPERS (1983), listam as seguintes utilizações para o I.C.:

- Avaliação da capacidade de desenvolvimento das raízes das plantas, onde um I.C. de aproximadamente ou maior que 30 bar ($30,6 \text{ Kgf/cm}^2$), impossibilita o desenvolvimento de raízes das plantas, tornando-as mais sensíveis à períodos secos do ano;

- Avaliação da possibilidade de trânsito de animais em pastagens, solos que possuem I.C. superior a 7 bar ($7,14 \text{ Kgf/cm}^2$) permitem o trânsito de animais sem risco de atolamento destes:
- O I.C. também pode ser utilizado para testar a uniformidade da área escolhida para experimentos agrícolas, sendo muito utilizado na aferição da uniformidade do solo em experimentos conduzidos em caixas de solos e laboratórios.

KOOLEN e KUIPERS (1983), no tópico que trata de desempenho de pneus, relacionado com I.C., diz que a tentativa para predizer certos aspectos do pneu com I.C. deve-se a facilidade em se medir o I.C., no entanto existem alguns complicadores, como por exemplo a modificação das propriedades do solo com a passagem dos pneus dos veículos, por causa disto, muitas vezes o escopo de utilização dos modelos com I.C. são restritos à solos compactados. Uma forma de atenuar o problema e validar os modelos, mesmo quando há variação das propriedades dos solos, é a utilização do I.C. padrão originalmente utilizado em Waterways em 1948, apud KOOLEN e KUIPERS (1983). As aplicações mais grosseiras para quantificar a performance dos pneus, determinam o critério de “passar” ou “não passar”, com um veículo através de uma determinada condição do solo. Os modelos empíricos mais complexos e que normalmente são descritos através de fórmulas levam em considerações outros aspectos como tamanho dos pneus, cargas verticais aplicadas e pressão de insuflagem.

PERUMPRAL (1987), diz que os penetrômetros vem sendo utilizados em grande escala em diversas aplicações, esta popularidade pode ser atribuída às seguintes

razões: a) Utilização fácil, rápida e barata; b) Fácil análise dos dados obtidos; c) É uma excelente ferramenta de pesquisa, quando é impossível a obtenção de amostras indeformadas do solo. As principais utilizações são a obtenção da dureza do solo, determinação de trafecabilidade de terrenos, resistência à penetração de raízes e seu desenvolvimento e determinação de camadas compactadas. Segundo o autor, devido aos problemas estudados e as variações de condições do solo, a engenharia está desenvolvendo uma grande variedade de equipamento e procedimentos de trabalho.

3.3. Limitações do uso do índice de cone.

Segundo KOOLEN e KUIPERS (1983) e PERUMPRAL (1987), a força vertical necessária para mover um cone no solo, em regime não transiente, depende da área da base do cone, ângulo do cone, ângulo de atrito solo-cone, propriedades do solo e velocidade de penetração. A força vertical de penetração é proporcional à área da base do cone, por esta razão a resistência à penetração do cone é usualmente expressa como a razão da força vertical pela área da base do cone, comumente chamada de índice de cone. O I.C. é insensível à pequenas variações das dimensões do cone, exceto quando a área da base varia em uma faixa muito grande, um aumento da área da base do cone pode resultar em uma pequena redução do valor do I.C.. Schorthorst, apud KOOLEN e KUIPERS (1983), relata que um aumento da área da base do cone proporcional a 10, causa um aumento proporcional de 8 na força de penetração, como o I.C. é definido pela razão entre a força de penetração do cone no solo e a área da base do cone, isto significa uma redução do I.C.

de 20%, segundo o autor, o fenômeno ocorre porque em cones de bases muito largas as forças coesivas tornam-se menos importantes em relação às forças gravitacionais. Freitag em 1968. apud KOOLEN e KUIPERS (1983), relatou que o efeito da velocidade de penetração diminui com o aumento de argila no solo.

KOOLEN e KUIPERS (1983), quando tratam das determinações rápidas das propriedades físicas e mecânicas dos solos, dizem que com penetrômetros as medidas são feitas rapidamente, sendo esta a vantagem sobre outros métodos para a determinação das propriedades do solo. Em certos casos, o penetrômetro vem sendo usado com sucesso para estimar a coesão, ângulo de atrito interno do solo, porosidade, densidade do solo, umidade ou tensão de retenção de água no solo. O I.C. pode ser expresso como uma função da coesão e do ângulo de atrito interno do solo, no entanto o grau de determinação desta função é bastante baixo (se o seu domínio de aplicação for grande o suficiente para cobrir todos os tipos de solos e suas condições). O I.C. deve ser rescrito como função das propriedades físicas do solo como umidade, porosidade, tipo de solo e sua estrutura, deste modo a função possui alto grau de determinação, no entanto é muito difícil expressar a estrutura do solo nesta função. Felizmente o efeito da estrutura do solo é "confundido" com os efeitos da umidade e porosidade do solo, podendo desta forma ser omitido sem causar diferenças significativas no I.C., portanto é correto expressar o I.C. em função da umidade e porosidade do solo (densidade do solo). O I.C. pode ser expresso como função exclusiva da umidade ou da densidade do solo, no primeiro caso a densidade do solo deve ser constante, no segundo a umidade deve ser constante.

MCKYES (1985), faz algumas afirmações a respeito de variações de propriedades do solo com a compactação. Conforme o autor, a coesão do solo aumenta de forma logarítmica com a densidade do solo, enquanto que o ângulo de atrito interno aumenta linearmente. O autor afirma que a resistência do solo à penetração, medida por um penetrômetro com cone, não depende exclusivamente da densidade do solo, pois a umidade deste tem efeitos significativos nos resultados.

Segundo MANTOVANI (1987), a resistência do solo à penetração de um penetrômetro é um indicador secundário de compactação, não sendo medição física direta de qualquer condição do solo. É afetada por muitos outros fatores além da compactação do solo, sendo o mais importante o teor de umidade dele. A resistência do solo à penetração é altamente afetada pela textura do solo, sendo a utilidade de suas medidas somente comparadas se feitas no mesmo solo e no mesmo teor de umidade. A resistência do solo à penetração pode ser medida facilmente em várias profundidades, mas, se as medidas forem comparadas, o teor de umidade terá que ser o mesmo em todos os níveis.

MCKYES (1989), diz que, infelizmente, as informações levantadas através de um penetrômetro não relatam as propriedades do solo da lei de Coulomb, ou seja, os parâmetros de resistência do solo C e ϕ (coesão e ângulo de atrito interno do solo, respectivamente). O fator medido pelo penetrômetro é simplesmente a força requerida para mover a haste e o cone do penetrômetro em uma velocidade constante em uma profundidade particular do solo. A transformação desta força em pressão (dividindo a força de penetração pela área da base do cone) é denominada de índice de cone. Apesar do I.C.

não ser uma boa estimativa das propriedades coesivas e friccionais do solo, ele é muito utilizado para caracterizar a resistência do solo, densidade, resistência à penetração de raízes, trafecabilidade de veículos e outras aplicações. O autor cita, que a utilização do I.C. requer testes e calibrações em relação à aplicação desejada.

3.4. Interações das propriedades do solo x compactação

RAGHAVAN et al (1977), RAGHAVAN et al (1978), relacionaram, em testes de campo e de laboratório, o cisalhamento do solo e a umidade com a compactação. Os autores constataram que o nível de compactação aumenta consideravelmente com o aumento do cisalhamento, isto nas mesmas condições de umidade, densidade e energia de compactação aplicada ao solo. O máximo de compactação para as mesmas condições do solo, ocorre quando o deslizamento das rodas dos veículos agrícolas está entre 25 e 35 %. MCKYES (1985) recomenda que as operações agrícolas devem ser realizadas no máximo com 16% de deslizamento de pneus, para que seja evitado um aumento na compactação do solo.

VARGAS (1977), no capítulo de compactação de solos cita o enunciado que Ralph Proctor publicou em 1933: "A densidade com que um solo é compactado, sob determinada energia de compactação, depende da umidade do solo no momento da compactação", atualmente, para a determinação experimental da correlação entre a densidade do solo, a umidade e a energia utilizada para a compactação, usa-se o ensaio de

Proctor Normal ou o Modificado, o primeiro consiste em compactar em um cilindro metálico de 944 cm³ de volume três camadas de solo, cada camada com 25 golpes de um peso de 24,5N. caindo de uma altura de 30,5 cm, o Proctor Modificado difere no número de camadas de solo, peso do soquete e altura de queda livre, que passam a ser respectivamente 5, 44,5 N e 46 cm. No ensaio Normal de Proctor o solo é compactado sob uma energia por unidade de volume de 60,54 tf*m/m³ (593,7 Kj/m³), equivalente a passar um pé-de-carneiro leve (peso máximo de 7 tf) por 12 vezes, já o Proctor modificado cuja energia é de 276,40 tf*m/m³ (2710,54 Kj/m³), correspondente a passar 12 vezes um pé-de-carneiro pesado (peso superior a 15 tf).

Segundo KIEHL (1979), a porosidade de um solo é definida como sendo o volume de vazios ou o espaço do solo não ocupado pelo conjunto dos componentes orgânicos e inorgânicos. A porosidade total do solo é composta por porosidade capilar (microporosidade) e porosidade de aeração (não capilar e denominada de macroporosidade).

MANTOVANI (1984), utilizou um Latossolo Vermelho Escuro no CNPMS-EMBRAPA para desenvolver um experimento comparando os efeitos da compactação causada pelo tráfego de tratores na produção de milho, a compactação máxima atingida nas condições do experimento foi de 1,12 g/cm³. O autor demonstrou estatisticamente, que o nível máximo de compactação obtido não representou um impedimento mecânico ao desenvolvimento de raízes do milho em duas condições de manejo com e sem irrigação.

RAGHAVAN e OHU (1985), publicaram que o teste de Proctor Normal é um excelente guia para indicar a umidade na qual a ocorrência da compactação é máxima. Para transportar os resultados dos testes de compactação, realizados em laboratórios, para as condições de campo é necessário considerar os seguintes fatores:

- Concordância entre a umidade natural do solo, encontrada em condição de campo, com a umidade ótima para compactação determinada em laboratório;
- Adequação do equipamento para realizar a compactação, com o tipo de solo encontrado.

Normalmente é impossível trabalhar no campo com a umidade ideal, para se realizar a compactação, em geral trabalha-se em uma condição natural de umidade do solo, próxima da desejada. A energia de compactação (impacto), dos testes de laboratórios é dada por:

$$E_c = M \cdot g \cdot h \cdot L \cdot N / V$$

onde:

E_c - energia/volume [J/m^3].

M - massa do martelo [Kg].

g - aceleração da gravidade [$9,81 \text{ m/s}^2$].

h - altura de queda do martelo [m].

L - número de camadas de compactação.

N - número de golpes de martelo/camada de compactação.

V - volume do molde de compactação.

MCKYES (1985), define compactação como um aumento da densidade do solo, através de um rearranjo da disposição das partículas sólidas do solo, implicando em redução da porosidade. A compactação pode ter duas causas:

- a) Naturais, devido ao impacto das gotas de chuva, molhamento, tensão interna da água.
- b) Artificiais, devido as forças aplicadas ao solo por máquinas agrícolas. Geralmente estas forças são de curta duração, pois os veículos agrícolas sempre estão em movimento. A análise da compactação causada por pneus, rodas e ferramentas não é simples, pois a distribuição das tensões normais e de cisalhamento ocorre de forma não uniforme.

PORTERFIELD e CARPENTER (1986), propuseram a utilização de um índice do potencial de compactação, para comparar o potencial de compactação das rodas que são comumente utilizadas na produção agrícola. Um modelo de espuma de borracha foi utilizado para mostrar os efeitos relativos a carga, tamanho, forma e arranjo dos pneus podem causar na subsuperfície de compactação. Os resultados utilizam conceitos, anteriormente conhecidos, de que o grau de compactação depende da pressão de contato e da área de contato dos pneus, a profundidade de compactação também depende da largura e da carga do pneu, o trabalho indica que o carregamento total na roda é o principal fator de influência na profundidade de compactação do solo. O modelo utiliza a premissa de que o índice de compactação relativo para cada roda individual é proporcional ao produto da pressão na superfície de contato e a área do solo em contato com a roda.

MANTOVANI (1987), definiu que um solo está agronomicamente compactado quando a proporção do volume total de poros para o volume do solo é inadequado ao máximo desenvolvimento de uma cultura ou manejo eficiente do campo. A compactação do solo pode ser considerada em relação à porosidade, densidade do solo e à resistência à penetração. O melhor método, direto, para determinar a compactação do solo

é o da densidade do solo (relação entre o peso do solo seco a 105 - 110 °C e volume total deste), expressa em g/cm^3 . Segundo o autor, a porosidade é o termo de maior significado para se usar na discussão de compactação do solo, pois esta nos fornece uma descrição direta da proporção de volume do solo disponível para a água e ar necessários às raízes das plantas. Através da Fig. 1 é demonstrado que a umidade do solo tem grande influência no processo de compactação do solo. Verifica-se que cada curva, correspondente

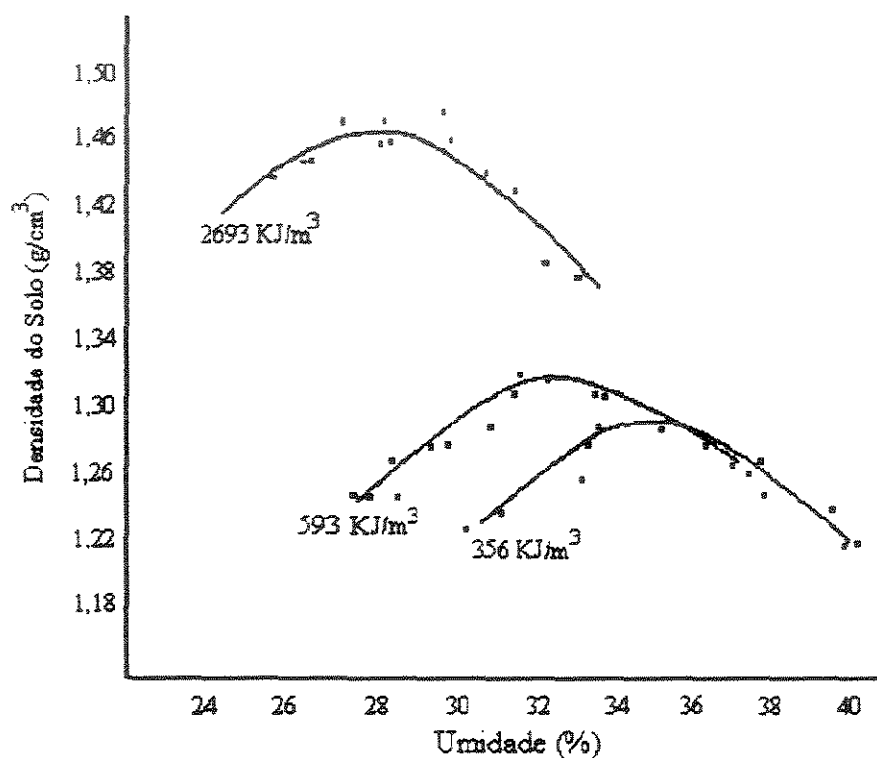


Figura 1 - Curva de compactação do latossolo Vermelho Escuro.

a uma energia de compactação, possui uma umidade ótima, que favorece a obtenção da máxima densidade do solo. O fator peso de equipamento é muito importante no processo de compactação, visto que quanto maior for a energia de compactação menor é a

quantidade de água no solo necessária para a obtenção do ponto máximo de compactação. Solos, cuja constituição seja partículas do mesmo tamanho, são menos susceptíveis ao processo de compactação, quando comparados àqueles onde há a mistura de argila, silte e areia. Isto se deve ao fato das partículas de tamanhos diferentes se arranjam e preencherem os poros, quando submetidas a uma pressão do solo.

Segundo BALASTREIRE (1987), o solo exibe resistência à compressão volumétrica e à deformação linear de corpos estruturais. Em ambos os casos, a resistência de um dado solo, a um dado teor de umidade, geralmente cresce com aumento na compactação ou densidade do solo. O fator principal que afeta as relações específicas entre a resistência do solo e sua densidade é o teor de umidade do solo. Geralmente, os solos a uma dada densidade têm menor resistência à penetração com um alto teor de umidade do que com baixo teor. Todavia, o aumento característico em resistência, com o aumento da compactação é encontrado com alto e baixo teor de umidade. Outro fator que influencia a relação entre a resistência do solo e a sua compactação é a distribuição do tamanho de partículas no solo. Solos de textura fina (argilosa), principalmente após uma secagem parcial, mostram a qualquer teor de umidade um grande crescimento na coesão com um aumento na compactação, enquanto solos com textura grosseira (arenosos) não apresentam esta característica. O coeficiente de atrito interno de solos de textura grosseira (arenosos) aumenta com qualquer teor de umidade com um crescimento na compactação. Solos de textura fina freqüentemente têm uma resposta semelhante, mas ocasionalmente não há modificação nas características de atrito com aumento na compactação.

Segundo MCKYES (1989), o aumento da resistência (dureza) e da compactação do solo, com a conseqüente diminuição da condutividade hidráulica, são condições ideais para os propósitos da construção civil. Estes efeitos são opostamente desejados em solos agrícolas, pois um aumento da resistência do solo à penetração, implica em aumentar a energia necessária para o preparo deste, dificultando o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. A redução da condutividade hidráulica do solo significa uma redução da capacidade de drenagem do solo, prejudicando o sistema radicular das plantas por falta de aeração. Apesar de todas as considerações, a determinação da densidade ótima do solo, para a máxima produção agrícola, é muito difícil, pois depende da combinação solo x planta x clima. Este ótimo varia muito em função do clima anual, sendo a compactação ideal aquela que permite o máximo de conservação de umidade nas raízes das plantas nos períodos secos. Entretanto, deve haver uma drenagem mínima, o suficiente, para permitir a presença de oxigênio nas raízes durante os períodos úmidos.

MANTOVANI et al (1991), determinou as relações entre o teor de umidade do solo e o grau de compactação. Os resultados mostraram que as máximas densidades tendem a decrescer com o aumento da plasticidade do solo, a máxima compactação foi obtida quando o teor de água estava próximo do limite superior de água disponível.

NOVAK et al (1992), estudaram o efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho Escuro Álico (no CNPMS-EMBRAPA em Sete Lagoas), os tratamentos consistiram em passar 1 ou 15 vezes com o trator sobre o solo em dois níveis de umidade, foram utilizados 4 tratores com

distintas pressões de contato com o solo. O critério de avaliação dos danos causados ao solo pelos tratamentos foi a comparação entre a macroporosidade deste solo em seu estado natural (segundo MANTOVANI (1984) 61% e 23% de porosidade total e macroporosidade respectivamente) com a macroporosidade resultante após os tratamentos, 10% foi considerado o valor mínimo aceitável para a macroporosidade, feito estas considerações e tomando $2,61 \text{ g/cm}^3$ como valor médio da densidade da partícula deste solo, estimou-se em $1,36 \text{ g/cm}^3$ como sendo a densidade do solo, limite, para se considerar o solo "maleficamente" compactado. Os autores chegaram às seguintes conclusões: 1) O tráfego de trator e as pressões de contato estudadas não compactaram o solo a níveis prejudiciais à porosidade de aeração, em nenhum dos níveis de umidade; 2) A umidade em torno de 33% (-0,6 bar) é mais favorável à compactação do que em torno de 30% (-1,8 bar); 3) O ensaio Normal de Compactação, realizado em laboratório, pode ser usado para prever a compactação no campo.

3.5 Modelos para a compactação

AYERS e PERUMPRAL (1982), propuseram o seguinte modelo para correlacionar índice de cone, densidade do solo e umidade:

$$CI = (C1 * DD^{C4}) / [C2 + (MC - C3)^2] \text{ ou}$$

$$DD = \{ (CI / C1) * [C2 + (MC - C3)^2] \}^{1/C4}$$

onde:

CI - índice de cone [KPa].

DD - densidade do solo [g/cm^3].

MC - Umidade do solo [%].

C1, C2, C3 e C4 - constante estimadas, que dependem do solo.

Foram utilizados cinco solos artificiais, com diferentes texturas: 100% de argila; 75% argila e 25 % areia; 50% argila e 50% areia; 25% argila e 75 % areia; 100% areia, os coeficientes de determinação (R^2) em função do tipo de solo foram respectivamente: 0,985, 0,983, 0,978, 0,982 e 0,940. Os testes foram realizados em laboratório, os solos artificiais foram compactados dentro de cilindros de alumínio, utilizados no teste de Proctor Normal. Três diferentes níveis de compactação foram obtidos usando 3, 6 e 12 golpes do martelo do teste de Proctor em cada camada de solo. A variação de umidade ocorreu entre 0 e 20%, com um número razoável de observações nesta faixa. Para obter o I.C. foi utilizada uma máquina de testes Instron modelo TM-S 311 e um cone de $0,5 \text{ pol}^2$ de área na base, de acordo com a recomendação ASAE R313.1. A velocidade do cone no solo foi de 1270 mm/min, inferior a recomendada pela ASAE, esta velocidade foi adotada para possibilitar a utilização da máquina de testes Instron, pois com a velocidade recomendada, em algumas condições do solo, a capacidade da máquina seria ultrapassada. Os autores constataram, que o comportamento do I.C. em função da umidade descreve uma parábola com a concavidade voltada para baixo, e que o máximo índice de cone não ocorre na umidade que produz a máxima densidade na compactação. O valor da umidade de máximo I.C. é inferior ao de máxima compactação e é a mesma que produz a máxima resistência ao cisalhamento, determinada em teste triaxial de compressão, Knight em 1948, Hough em 1957 e Smith em 1964, apud AYERS e PERUMPRAL (1982), já haviam relatado este fenômeno. Foi observado que o I.C. aumenta com a densidade do solo e diminui

consideravelmente em altos teores de umidade. No solo constituído 100% por areia, a relação entre o I.C. e a densidade do solo mostrou-se independente em relação à umidade. A umidade na qual o I.C. é máximo depende do tipo de solo, esta aumenta com o aumento da porcentagem de argila, as constantes do modelo matemático são altamente dependentes do tipo de solo. O modelo delineado é baseado em resultados de testes conduzidos em amostras de solos preparados. Se o modelo for utilizado para prever a densidade do solo em condições de campo (naturais), as constantes de cada tipo de solo devem ser novamente estimadas. Com os resultado deste trabalho, fica evidente o potencial de utilização de penetrógrafos, em pesquisas futuras, para predizer a densidade de subsuperfície do solo "in situ".

RAGHAVAN e OHU (1985), realizaram um estudo para encontrar a pressão estática, que aplicada ao solo, produz a mesma compactação do teste de Proctor Normal com 5, 15 e 25 golpes, os níveis de pressão estática, aplicada ao solo por dois minutos, foram respectivamente 175 KPa, 404 KPa e 618 KPa. O trabalho foi realizado utilizando três texturas distintas de solo, com variações do conteúdo de matéria orgânica (carbono) e umidade, os dados levantados mostraram uma relação linear entre o número de golpes do método de compactação de Proctor com a pressão estática equivalente. Os resultados das compactações foram comparados através do I.C., obtido por um penetrógrafo com cone de 30°, diâmetro da base de 15 mm e velocidade de deslocamento no solo de 1829 mm/min. Para os mesmos valores de I.C., obtidos nas amostras compactadas pelo método de Proctor e nas compactadas pela carga estática, não houve diferença estatística, significativa, da pressão aplicada ao solo. Quando as variações

ocorriam no tipo de solo, quantidade de matéria orgânica e umidade, diferenças significativas foram encontradas ao nível de 5%. Os autores encontraram a seguinte equação para prever a pressão estática em função do número de golpes do método de Proctor:

$$P_{\text{estát.}} = 66,70 + 22,10 * N$$

onde:

$P_{\text{estát.}}$ - pressão estática [KPa].

N - número de golpes do método de Proctor.

A equação acima possui um coeficiente de determinação (R^2) de 0,998 a um nível de significância de 0,0001. Por causa do alto coeficiente de determinação da regressão, os autores sugerem a utilização deste estudo, em condições de campo, para prever efeitos da compactação em função dos equipamentos utilizados e as cargas estáticas aplicadas por estes, no solo, durante todo o ciclo da produção agrícola.

BAILEY et al (1986), a compactação de solos agrícolas pode variar bastante durante o desenvolvimento da cultura devido as várias operações agrícolas que aplicam esforços ao solo. Um modelo adequado para prever compactação de solos agrícolas deve ser capaz de prever a densidade do solo em uma grande faixa do nível de compactação. O modelo logarítmico, convencional, não prediz adequadamente a densidade do solo quando a compactação ou a tensão aplicada ao solo é baixa. Neste trabalho 3 parâmetros multiplicativos são propostos para modificar o modelo logarítmico convencional, o novo modelo satisfaz certas condições de contorno para deformação volumétrica, natural, do

solo, quando submetido a baixos ou altos níveis de tensões, estas condições não eram atendidas anteriormente.

O modelo convencional proposto por Bailey e Vanden Berg (1967) e Larson et al (1980), apud BAILEY et al (1986) é:

$$\frac{1}{\rho} = m * \log \sigma + b$$

Onde:

ρ - densidade volumétrica

m - coeficiente de compressibilidade

σ - tensão aplicada

b - $1/\rho$ a valor da tensão de 1,0 KPa

O modelo modificado é:

$$\ln(\rho) = \ln(\rho_0) - (A + B\sigma_H)(1 - e^{-C\sigma_H})$$

onde:

ρ_0 - Densidade volumétrica inicial.

σ_H - Tensão hidrostática.

A, B, C - Coeficientes da compactação do solo.

Os autores concluíram que os coeficientes A, B e C sofrem influência da umidade do solo.

O modelo proposto satisfaz as condições de contorno a baixos e altos níveis de tensão e representa adequadamente a compactação de amostras do solo em testes triaxiais com tensão hidrostática.

Segundo GRISSO (1987), o modelo de compactação hidrostática para solos não saturados foi expandido para incluir um contínuo aumento de tensão, o modelo satisfaz as condições de contorno em baixos e altos níveis de tensão. Bailey et al. apud GRISSO (1987), desenvolveram um modelo que descreve corretamente o comportamento do solo quando submetido a uma tensão hidrostática e encontrou as condições de contorno para baixos e altos níveis de tensão, o modelo proposto foi:

$$\varepsilon_v = (A + B\sigma_H)(1 - e^{(-C\sigma_H)})$$

onde:

$\varepsilon_v = \ln V/V_0$, V_0 é o volume inicial sem tensão.

σ_H - Tensão hidrostática.

A, B, C - Parâmetros do solo determinados durante a compactação, através da aplicação do carregamento hidrostático.

O objetivo deste trabalho foi estudar e desenvolver um modelo que inclua o efeito da variação de tensão na compactação do solo, e encontrar as condições de contorno a um nível zero de tensão, o modelo encontrado é:

$$\bar{\varepsilon}_{oct} = \bar{\varepsilon}_v / 3 = \beta(A_H + B_H\sigma_{oct})(1 - e^{-C_H\sigma_{oct}}) / 3$$

onde:

$\bar{\varepsilon}_v$ = Deformação volumétrica natural

A_H , B_H e C_H - Parâmetros do solo determinados na compactação com a aplicação do carregamento hidrostático, $\tau_{oct} = 0$.

β - Função da variação do estado de tensão = $\bar{\varepsilon}_{octR} / \bar{\varepsilon}_{octH}$

dado por:

$$\beta = M_f(\eta_p - 1) + (M_o - M_f)(\eta_p - 1)\left(e^{(-F^a\sigma_{oct})}\right) + 1$$

onde:

σ_{oct} - tensão octaedral normal

η_p - relação principal de tensão σ_1/σ_3

M_f , M_o , F - parâmetros do solo

O modelo descreve, muito bem, a compactação triaxial de amostras cilíndricas, para η_p (relação principal de tensão σ_1/σ_3) menores que 2,5.

OHU et al (1987), dizem que os solos agrícolas freqüentemente tornam-se compactados devido ao trânsito intensivo de veículos agrícolas durante o calendário da produção. A compactação causa uma significativa deterioração da estrutura do solo, na camada agricultável, afetando a disponibilidade de água nas raízes das plantas. Este fenômeno pode ser estimado, levantando-se a curva de retenção de água no solo, no entanto esta curva não é uma propriedade do solo rotineiramente medida. Muitos modelos tem sido propostos para estimar a umidade, através de algumas propriedades físicas do solo, no entanto a maioria destes modelos são aplicáveis à solos não compactados. Neste trabalho, foi proposto um modelo empírico que pode estimar a curva de retenção de umidade para qualquer nível de compactação do solo. As propriedades físicas do solo requeridas para as estimativas do modelo são: Densidade volumétrica; quantidade de matéria orgânica, limite de liquidez e nível de compactação, o modelo proposto é:

$$\Theta = a\Psi^{-n}$$

Onde:

Θ - conteúdo volumétrico de umidade [%]

Ψ - sucção [KPa]

a, n - coeficiente e expoente respectivamente a ser determinados em função da textura do solo para cada nível considerado de matéria orgânica.

Os autores concluíram que a disponibilidade de água nas raízes das plantas, pode ser estimada, em solos compactados, através do modelo empírico proposto. Em solo argilo-arenoso, a nível de laboratório, encontraram que o nível de umidade retida por um solo entre 33 e 1500 KPa de sucção fora descrito adequadamente pelo modelo.

OHU et al (1988), encontraram uma equação para prever o índice de cone em três solos, com texturas e conteúdo de matéria orgânica diferentes, submetidos a três níveis de energia de compactação e com variação de umidade. Em 1982 Upadhyaya et al, apud OHU et al (1988), usando técnicas de análise adimensional propuseram o seguinte modelo para prever o índice de cone:

$$\alpha^*(CI/K) = a * (\rho/\rho_s)^n * e^{-b\theta}$$

onde:

CI - Índice de cone [KPa]

K - Módulo de elasticidade [KPa]

ρ - Densidade do solo

ρ_s - Densidade das partículas de solo

θ - Umidade do solo

α - Fator adimensional, numericamente igual a K.

a, b, n - Constantes do solo

OHU et al (1988), descreveram o índice de cone pela seguinte fórmula funcional:

$$CI = f(Ts, Pc, \rho, Qp, W, \text{argila, silte, areia, d, MO})$$

onde:

CI - Resistência do solo à penetração (índice de cone).

Ts - Resistência do solo ao cisalhamento.

Pc - Pressão aplicada no solo para a compactação.

ρ - Densidade do solo.

Qp - Peso unitário do solo úmido x altura da coluna de solo

W - Umidade.

Argila - Conteúdo em porcentagem.

Areia - Conteúdo em porcentagem.

Silte - Conteúdo em porcentagem.

d - Profundidade de medição.

MO - Conteúdo de matéria orgânica em porcentagem.

O modelo proposto é dado por:

$$(CI/Pc) = A * (Ts/Qp)^a$$

Devido a variação do índice de cone, pela variação da umidade do solo, o modelo foi modificado para:

$$(CI/Pc) = A * (Ts/Qp)^{a+b}$$

onde:

θ - É uma relação entre o volume de água contido no solo pelo volume de solo.

A, n - São funções do tipo de solo e da porcentagem de umidade.

O modelo mostrou-se bastante preciso em relação aos índices de cone medidos no campo, alcançando um coeficiente de determinação (r^2) de 0,98.

SCHAFER et al (1991), diz que o grau de compactação, desejado, do solo, depende do propósito a ser atingido, por exemplo, os requerimentos de tração e mobilidade são completamente diferentes dos necessários a uma boa infiltração de água e desenvolvimento das raízes. Os autores desenvolveram um modelo de compactação do solo, relacionando o sistema solo-máquina e que pode ser utilizado para dimensionar sistemas para efetiva administração das condições físicas do solo. Quando consideramos compactação, 4 pontos devem ser incluídos:

- 1 - A fonte de forças que causam compactação no sistema.
- 2 - A propagação e distribuição de tensões na massa do solo causadas pelas forças do sistema.
- 3 - Resposta do solo à tensão (comportamento de compactação).
- 4 - A relação (e conseqüências) da compactação na cultura implantada no sistema (a planta, o movimento de líquidos e gases e as atividades químicas e biológicas).

O modelo final foi originado de algumas interpretações físicas de como o solo se comporta às mudanças de tensões ou deformações aplicadas. O resultado de trabalhos com modelos hidrostáticos, foi pela primeira vez reportado por Bailey em 1984 apud SCHAFER et al (1991), em termos de deformação linear volumétrica. O equacionamento foi discutido,

aperfeiçoado e finalmente apresentado por Bailey et al em 1986 apud SCHAFER et al (1991), como:

$$\ln\left(\frac{V}{V_i}\right) = (A + B\sigma_h)(1 - e^{-C\sigma_h})$$

Onde:

V_i - volume inicial

V - volume

σ_h - tensão hidrostática ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$)

A, B, C - coeficientes da compactação do solo.

Em termos de densidade volumétrica, a equação é expressada como:

$$\ln(BD) = \ln(BD_i) - (1 - e^{-C\sigma_h})$$

onde:

BD - densidade volumétrica

BD_i - densidade volumétrica à zero de pressão.

O modelo de Bailey foi aperfeiçoado, incluindo-se um termo para prever a compactação causada pela tensão de cisalhamento, ficando:

$$\ln\left(\frac{V}{V_i}\right) = (A + B\sigma_{oct})(1 - e^{-C\sigma_{oct}}) + D\left(\frac{\gamma_{oct}}{\sigma_{oct}}\right)$$

onde:

V_i - volume inicial

V - volume

σ_h - tensão hidrostática ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$)

A, B, C - coeficientes de compatibilidade

D - coeficiente para a componente natural de deformação volumétrica devido à tensão de corte

σ_{oct} - tensão normal octaedral

Os autores concluíram que os coeficientes A, B, C, D do modelo são influenciados pelo teor de umidade do solo, o modelo satisfaz as condições de contorno quando os níveis de tensão são altos ou baixos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

4.1.1. Local do experimento

O experimento foi realizado no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo da EMBRAPA de 7 Lagoas - MG, localizado na latitude 19° 28' S e longitude 44° 15' W. A área escolhida é utilizada anualmente para testes de campo e comparativos de semeadoras, disponíveis no mercado. O relevo caracteriza-se como plano.

4.1.2. Solo

O solo foi classificado, segundo NOVAK et al (1992), como Latossolo Vermelho Escuro, Álico de textura argilosa. As análises físicas do solo foram realizadas no setor de laboratórios de física do solo do CNPMS-EMBRAPA e no laboratório de mecânica de solos, do Departamento de Construções Rurais da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (DECONRU-FEAGRI-UNICAMP).

A Tabela 1 mostra os resultados das análises de textura, densidade da partícula e ensaio de Proctor Normal.

Tabela 1 - Análise da textura, densidade da partícula do solo e ensaio normal de Proctor.

Grossa	AREIA		SILTE	ARGILA
2,0 < ϕ < 5,0 mm	Média	Fina		
0 %	0,42 < ϕ < 2,0 mm	0,074 < ϕ < 0,42 mm	0,002 < ϕ < 0,075 mm	ϕ < 0,002 mm
	7 %	14 %	32 %	47 %
Densidade da partícula do solo: 2,61 Kg/dm ³				
Ensaio de Proctor Normal	Teor de água do solo ótimo para a compactação			de 28,5 a 30,5 %
	Densidade máxima de compactação			1,40 Kg/dm ³

4.1.3. Trator

VALMET 1180, com tração auxiliar 4x2 e potência de 83,10 Kw no motor em 2.300 rpm.. Sistema hidráulico, composto por controle remoto acionado por duas válvulas de dupla ação; engate rápido; bomba de engrenagens, acionada externamente pelo motor, com vazão e pressão máxima de 0,863 dm³/s (51,8 l/min) e 180 Kgf/cm².

4.1.4. Pé-de-carneiro

Pé-de-carneiro Dinapac modelo CA-15P com as seguintes características:

Obs: As menções de marcas comerciais não significam recomendações do autor.

motor com potência de 59 Kw a 2400 rpm; peso estático total de 7750 Kgf; frequência de vibração de 29 Hz; largura de compactação de 1670 mm; cilindro compactador tipo pé-de-carneiro e peso dinâmico equivalente a aproximadamente 15 tf.

4.1.5. Grade de discos média

Fabricação Marchesan, modelo com 14 discos de 711,2 mm (28 pol.) de diâmetro espaçados a 235 mm, com duas sessões de discos.

4.1.6. Conjunto para a determinação da densidade do solo.

Conjunto denominado de trado de Uhland, segundo UHLAND (1949), composto de anel com volume conhecido, trado, peso para impacto do anel no solo e placa para cortar o excesso de solo nas bordas do anel, o anel utilizado possui altura de 5 cm e volume de 98,2 cm³.

4.1.7. Equipamento para o ensaio de compactação normal de Proctor.

Composto de um cilindro metálico de 944 cm³ de volume e soquete de 2,5 Kg de massa, com hastes para impacto no solo de 305 mm.

4.1.8. Penetrógrafo

Para quantificar e registrar a resistência do solo à penetração em função da profundidade, foi desenvolvido no Departamento de Máquinas Agrícolas da FEAGRI-UNICAMP em parceria com o CNPMS-EMBRAPA um penetrógrafo, hidráulico com aquisição eletrônica dos dados (Figs. 2, 3, 4 e 5). O equipamento é composto por: estrutura metálica acoplável ao sistema hidráulico de levante dos três pontos de tratores agrícolas categoria dois; cilindro hidráulico; mangueiras flexíveis de alta pressão com engates rápidos; válvula limitadora de vazão; haste e cone de aço inoxidável; célula de carga, sensor de profundidade; condicionador de sinais; gerenciador eletrônico; data logger com teclado; micro computador portátil e duas baterias automotivas de 12V.

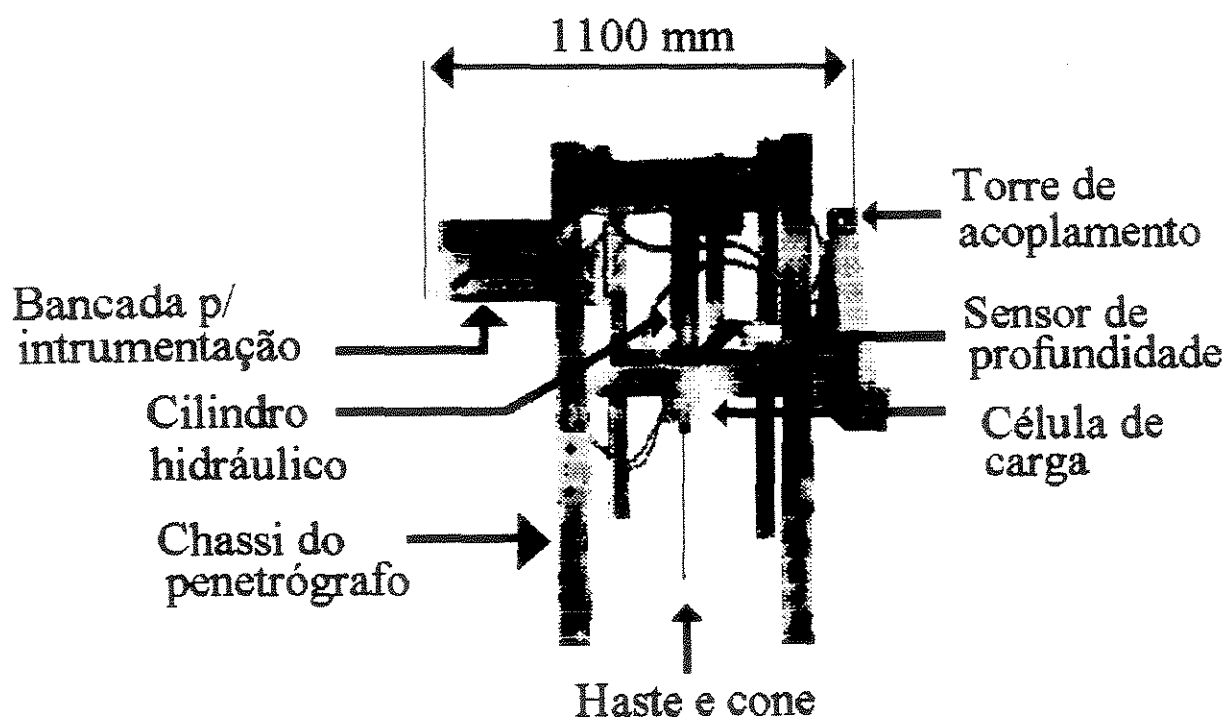


Figura 2 - Vista lateral do penetrógrafo.

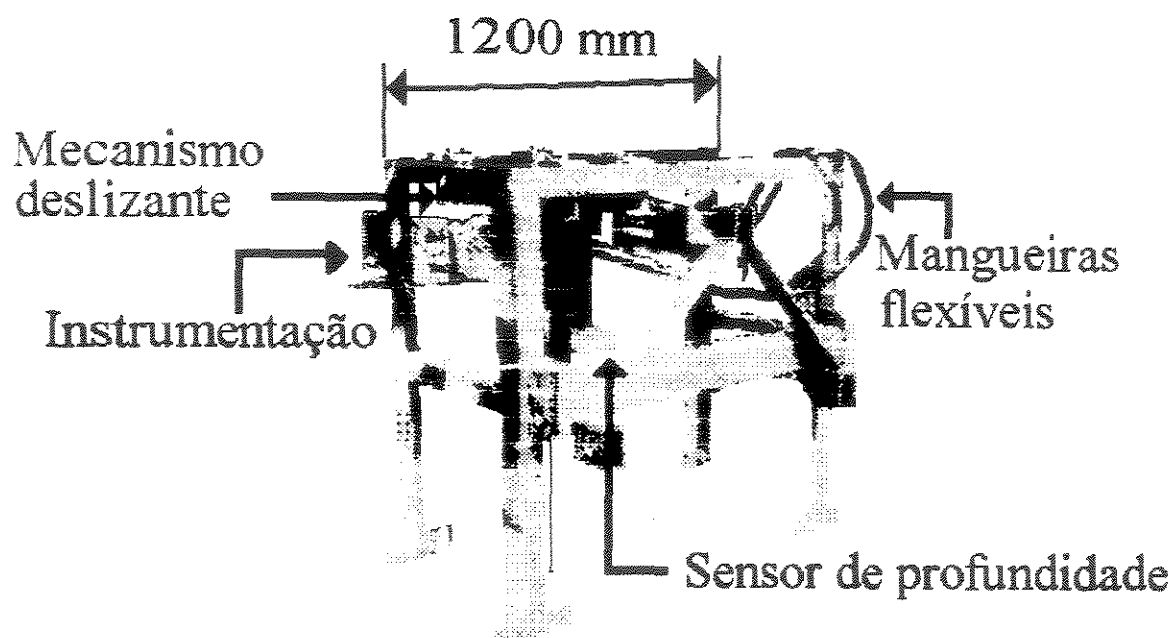


Figura 3 - Vista em perspectiva do penetrógrafo.

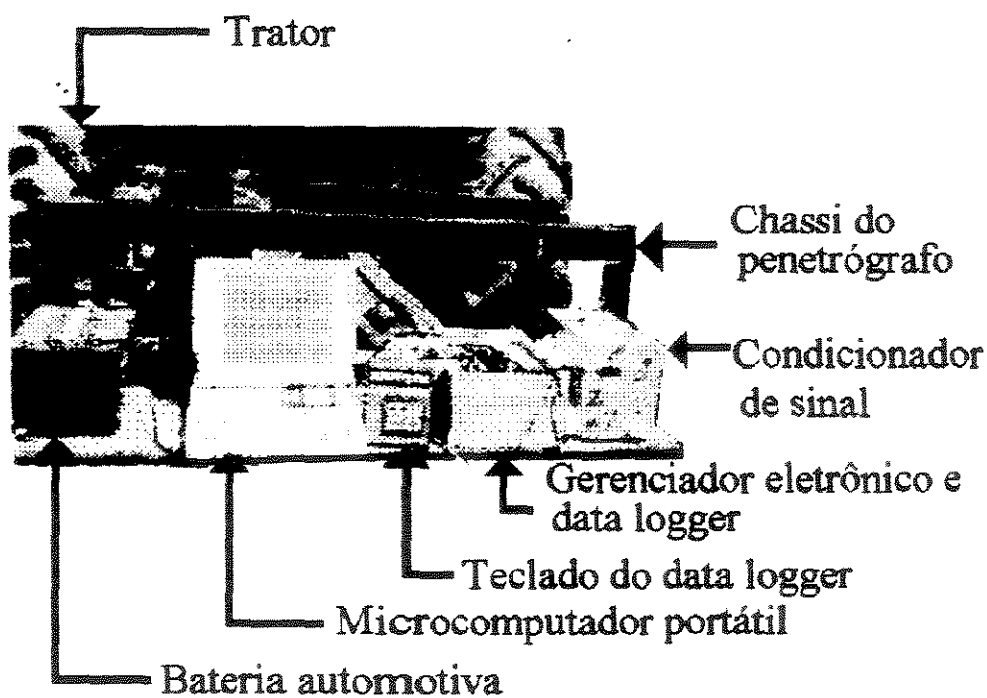


Figura 4 - Vista frontal da instrumentação.

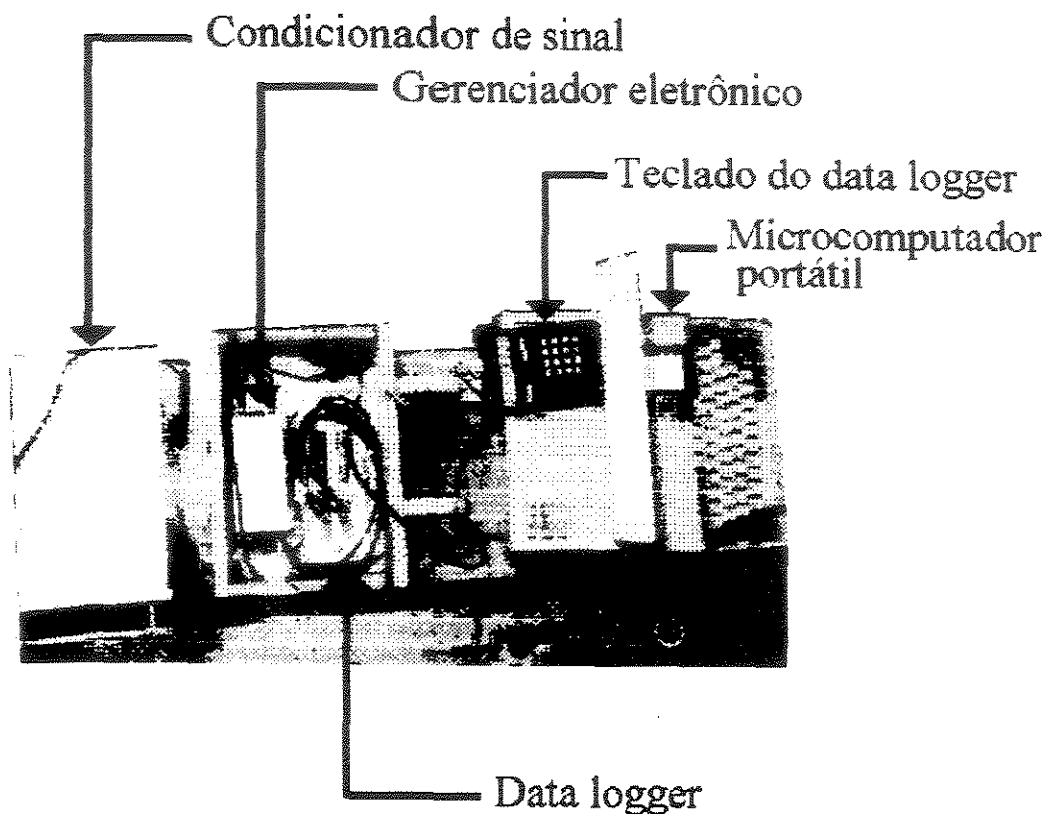


Figura 5 - Vista superior da instrumentação.

4.1.9. Chassi do penetrógrafo

Acoplável ao sistema hidráulico de levante dos três pontos de tratores agrícolas categoria dois (Figs. 2 e 3), possui mecanismo deslizante para mover lateralmente o conjunto composto pelo cilindro hidráulico, sensor de profundidade, célula de carga, haste e cone do penetrógrafo. Altura total de 1200 mm, comprimento (com torre de acoplamento no sistema de levante hidráulico e bancada para a instrumentação) de 1100 mm, largura total de 1200 mm (largura útil para deslocamento lateral do conjunto de 850 mm).

4.1.10. Cilindro hidráulico.

Marca Schrader Bellows. modelo para ser montado em placa, com diâmetro interno da carnisa de 63,5 mm (2,5 pol.), curso do êmbolo de 350 mm e medida das roscas de $\phi 1/2"$ BSP para conexões no sistema hidráulico.

4.1.11. Mangueiras flexíveis de alta pressão com engates rápidos.

Mangueira hidráulica de alta pressão, modelo MAP-8, diâmetros de 12,7 mm (interno) e 24,6 (externo), pressão máxima de trabalho de 245 Kg/cm^2 e engates rápidos, fêmea, com pressão máxima de trabalho de 250 Kg/cm^2 .

4.1.12 Válvula limitadora de vazão (ajustável).

Marca Racine, modelo OF1-SHPO-03-H, com as seguintes características: pressão máxima de $214,14 \text{ Kg/cm}^2$, pressão não compensada, montagem em linha no circuito, retorno do fluxo livre, tomadas de $\phi 3/8"$ NPT, queda máxima de pressão com retorno livre de $1,83 \text{ Kg/cm}^2$, com a regulação totalmente aberta $2,85 \text{ Kg/cm}^2$.

4.1.13. Haste e cone de aço inoxidável.

Construídos conforme as recomendações da ASAE de 1978 (ASAE R311.1), diâmetro da haste de 9,5 mm, diâmetro da base do cone de 12,83 mm (0,2 pol² de área), comprimento total do conjunto 425 mm.

4.1.14. Célula de carga.

Projetada e construída no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Máquinas Agrícolas da FEAGRI-UNICAMP, é do tipo "S", com "strain gages" formando uma ponte completa de Wheatstone, possui sensibilidade de 1,5mV/V e um erro total combinado de 0,90%.

4.1.15. Sensor de profundidade.

Marca SICK de fabricação Francesa, modelo US 177, capacidade de medidas de 300 a 7300 mm, ajustáveis em faixas. Princípio de funcionamento baseado na emissão de ultrassom e captação das ondas refletidas no anteparo à distância, precisão da medida, de $\pm 0,5\%$. Possui circuitos microprocessados, com compensação de temperatura, temperatura de operação de 0 a 50 °C, alimentação de 24 Vcc e saída analógica do sinal de 1 a 10 V. Dimensões totais do sensor 120x80x55 mm.

4.1.16. Condicionador de sinal da célula de carga.

Da marca Sodmex, modelo CAE-201, com:

- Alimentação geral de 12Vcc.
- Tempo de aquecimento de 30 minutos.
- Temperatura de utilização de 0 à 50 °C.
- Filtragem de 10 Hz, 30 Hz, 100 Hz, 1000 Hz e nenhuma.
- Alimentação da ponte "A" de 2,5 Vcc e da "B" 5,0 Vcc.

4.1.17. Gerenciador eletrônico do penetrógrafo.

Montado em um caixa alumínio de 130 x 80 x 60 mm, o sistema foi projetado e construído no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Máquinas Agrícolas da FEAGRI-UNICAMP e constitui-se de:

- a) Duas entradas de 12 Vcc e uma saída com 24 Vcc, para alimentação do sensor de profundidade.
- b) Circuito divisor de tensão, com entrada de 0 a 10 V e saída 0 a 2 V. Este circuito é responsável pela redução do sinal do sensor de profundidade antes de ser gravado no data logger
- c) Alarme sonoro para alertar o operador do penetrógrafo quando o esforço na célula de carga exceder 150 Kgf.
- d) Gatilho sincronizador responsável pelo início e fim da gravação dos sinais do sensor de profundidade e célula de carga no data logger. Composto por uma chave interruptora de

acionamento manual, que liga e desliga uma bateria de 1,5 V a um canal de sincronismo de aquisição de dados do data logger.

4.1.18. Data logger.

Fabricado na Inglaterra pela Campbell Equipamentos Científicos, modelo CR10, com as seguintes especificações: teclado com visor para programação da aquisição, memória RAM de 64 Kb, capacidade de executar programas de até 1986 bytes, taxa máxima de aquisição com interrupção de 64 Hz, comunicação serial padrão RS232 para conexão com microcomputadores, 12 canais simples de aquisição ou 6 diferenciais, alimentação de 9,6 a 16 Vcc, temperaturas operacional de -25 a 50 °C, 229x89x74 mm de dimensões e 0,91 Kgf de peso.

4.1.19. Micro computador portátil.

Marca Toshiba, portátil modelo T1200, com saída serial RS-232 e drive para disquetes de 3 1/2" de 720 Kb.

4.1.20. Baterias automotivas de 12V.

Duas baterias automotivas de 12 Vcc e capacidade de 45 A por hora.

4.1.21. Montagem do sistema hidráulico.

O sistema hidráulico do conjunto trator-penetrógrafo é composto conforme mostra a Fig. 6, nota-se que os itens 1, 2, 3 e 4 são componentes originais de fábrica do trator, os itens 5 e 6 são do projeto do penetrógrafo. A descrição dos itens de 1 a 6 da Fig. 6 é:

- 1) Reservatório de óleo hidráulico.
- 2) Bomba hidráulica.

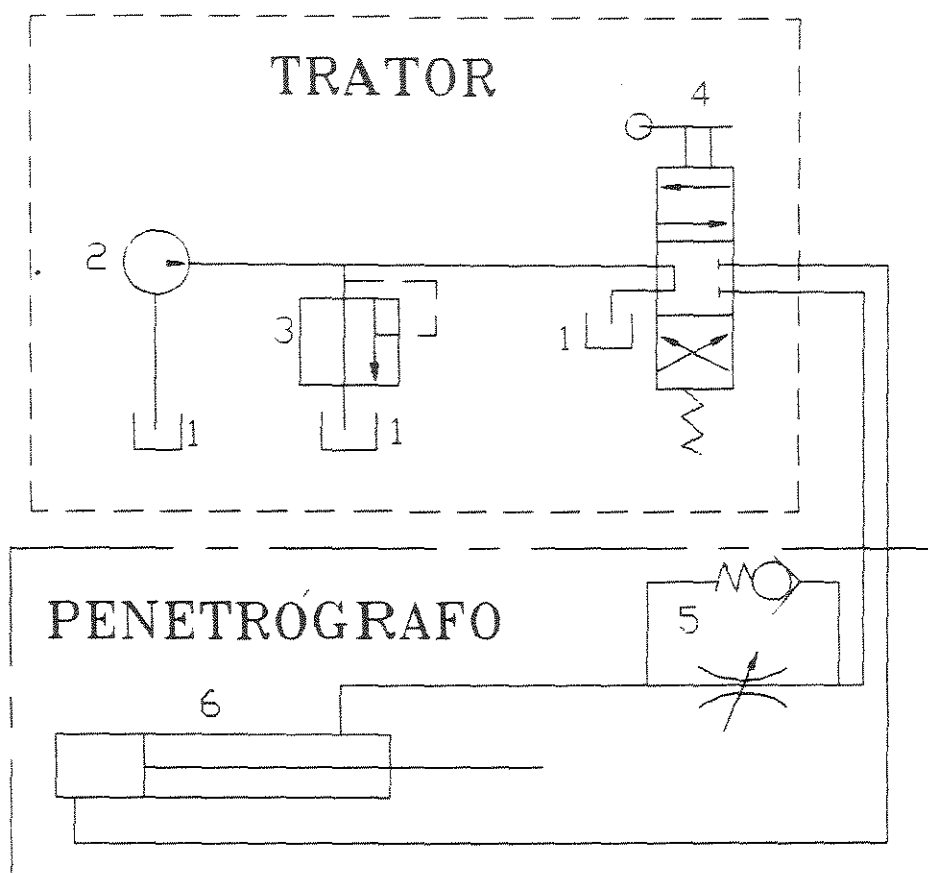


Figura 6 - Diagrama do sistema hidráulico do conjunto trator-penetrógrafo.

- 3) Válvula de segurança do sistema hidráulico do trator
- 4) Válvula direcional, de centro fechado, com 2 vias e 3 posições de acionamento manual e retorno por mola.
- 5) Válvula limitadora de vazão, ajustável.
- 6) Cilindro hidráulico.

4.1.22. Montagem do sistema eletrônico.

A Fig. 7 ilustra a disposição dos componentes elétricos e eletrônicos. Observe a necessidade de 3 fontes de tensão de 12 Vcc, (duas são baterias, a terceira é o sistema elétrico do trator). Os sinais dos transdutores de força e posição (célula de carga e

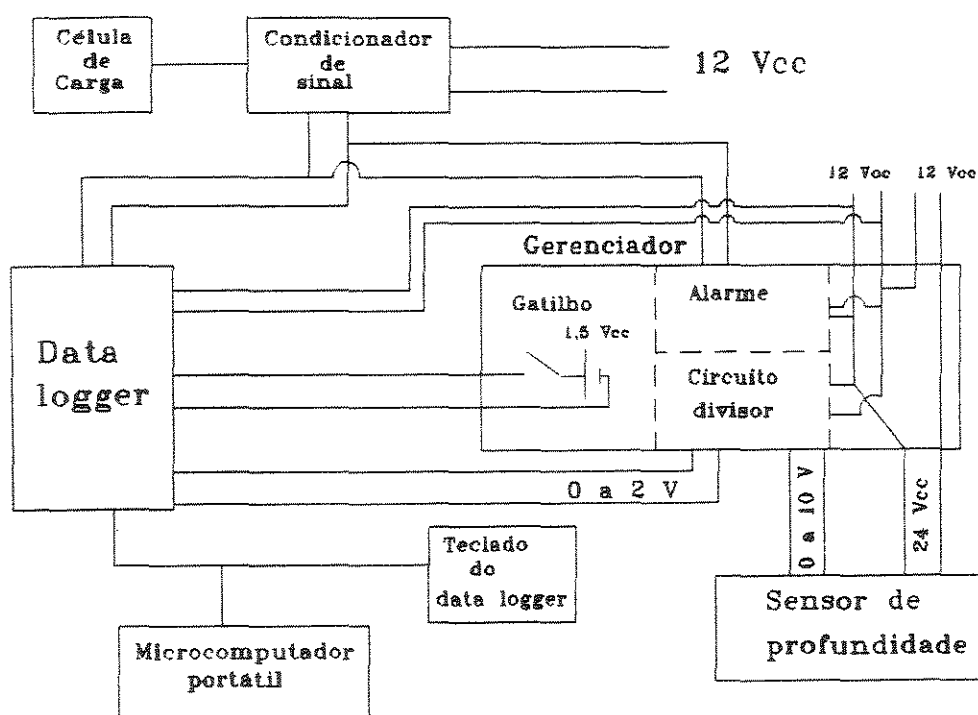


Figura 7 - Diagrama do sistema eletrônico do penetrógrafo.

o sensor de profundidade) são tratados antes de serem gravados no data logger. O microcomputador foi acoplado ao sistema no instante da transferência dos dados do data logger para disquetes, nesta operação, a memória RAM do data logger é apagada, permitindo que novas aquisições sejam realizadas.

4.2. Métodos

4.2.1. Determinação do teor de água do solo ótimo de compactação no ensaio Normal de Proctor.

Utilizando amostras do solo do local do experimento, foi realizado o ensaio de compactação de Proctor Normal. O solo foi compactado, em três camadas, em um cilindro metálico de 944 cm³ de volume, cada camada recebeu 25 golpes de um peso de 2,5 Kg de massa, caindo de uma altura de 305 mm. Este procedimento corresponde submeter o solo a uma energia de compactação de 60,54 tf*m/m³ (593,7 Kj/m³).

4.2.2. Preparação das unidades experimentais

Nos ensaios de Proctor foi determinado o teor de água do solo ótimo para a obtenção da máxima compactação do solo. Após várias chuvas foi esperado que o teor de água do solo fosse reduzido até a um valor próximo ao considerado ideal, a compactação foi realizada em 08/09/93 (uma parcela de alta e uma de média compactação) e 09/10/93 (três parcelas de alta e três de média compactação). O solo foi submetido a três gradagens

para uniformizar o teor de água do solo no perfil. Com o auxílio de um pé-de-carneiro foram preparadas oito parcelas de 750 m^2 ($10 \times 75 \text{ m}$), as quatro parcelas de compactação alta foram submetidos a sete passadas do pé-de-carneiro, as outras quatro, consideradas de compactação média, sofreram apenas duas passadas (Figs. 8 e 9). Quatro parcelas não foram compactadas e foram consideradas de compactação baixa.

A profundidade atingida pela gradagem foi de aproximadamente 18 cm, até esta profundidade todas as compactações anteriormente existentes foram desfeitas, ficando o solo com uma densidade baixa. O trabalho do pé-de-carneiro foi compactar o solo solto (após a gradagem) com duas ou sete passadas, conforme o tratamento. Abaixo da profundidade de 18 cm houve um acúmulo da compactação pré existente na área com a compactação provocada pela propagação de tensões aplicadas ao solo pelo pé-de-carneiro.



Figura 8 - Trabalho de compactação (com trator e grade no primeiro plano e pé-de-carneiro ao fundo).

Os teores de água do solo das parcelas foram diariamente ou semanalmente monitorados, para a escolha do dia de ir ao campo realizar coletas de dados. Sem auxílio de irrigação e contando somente com o regime de chuvas da região, procurou-se escolher os dias de coletas de dados de tal forma a combinar os três níveis de compactação do solo, com três níveis de T.A.D.S..



Figura 9 - Trabalho de compactação (com pé-de-carneiro no primeiro plano e trator e grade ao fundo).

4.2.3. Determinação do teor de água do solo

Foi determinada pelo método gravimétrico, adotando-se a retirada de amostras nas profundidades de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 15 cm e 18 a 23 cm, com três repetições cada, nos dias de coletas 15/10/93 e 20/10/93. Nas datas de 10/11/93, 14/12/93

e 21/02/94 as profundidades amostradas foram 3 a 8 cm, 10 a 15 cm, 18 a 23 cm, 25 a 30 cm, com seis repetições.

4.2.4. Determinação da densidade do solo.

A densidade do solo foi determinada em dias anteriores a coleta de dados. O anel de 5 cm de altura foi cravado no solo com o auxílio do trado e do peso para impacto, as amostras coletadas foram levadas à estufa onde secaram à 110 °C durante 24 horas, após este período, a densidade foi determinada pela razão entre o peso seco do solo e o volume do anel.

As profundidades amostradas foram 3 a 8 cm, 10 a 15 cm, 18 a 23 cm, 25 a 30 cm, com seis repetições, em todas as datas de trabalho. Nos dias 15/10/93 e 20/10/93, também foram amostradas as profundidades de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 15 cm e 18 a 23 cm, com três repetições.

4.2.5. Determinação da resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração, foi determinada através do penetrógrafo, descrito no item 4.1.8, cada parcela foi amostrada em 12 pontos até a profundidade de 30 cm, no entanto em alguns pontos, devido a irregularidade do solo, não foi possível atingir a profundidade máxima de 30 cm. O equipamento foi operado segundo as recomendações da ASAE, a válvula limitadora de vazão foi ajustada no instante de trabalho para que o curso de deslocamento total (35 cm) do cilindro hidráulico ocorresse em 11,483 s ou 1829

mm/min., os dados foram adquiridos a uma taxa de 32 Hz, o que resulta em um dado de I.C. por milímetro de profundidade amostrado.

O equipamento foi transportado no sistema hidráulico do trator até o local de amostragem, onde foi depositado no solo. O cilindro hidráulico foi acionado para que o cone penetrasse no solo, no instante de contato do cone com o solo a aquisição de dados foi acionada manualmente pelo gatilho do gerenciador eletrônico. Os dados adquiridos entre 0 e 3 cm de profundidade não foram utilizados na análise estatística, pois nos primeiros 3 cm de penetração, o cone não estava completamente cravado no solo e a estrutura do penetrógrafo ainda se acomodava. A partir dos 3 cm de profundidade a penetração do cone no solo possui um regime permanente.

A amostragem do I.C. foi feita próxima dos locais de amostragem de densidade e teor de água do solo, as amostras de T.A.D.S. foram coletadas no mesmo instante que o penetrógrafo era operado.

4.2.6. Descrição dos tratamentos e nomenclatura utilizada.

Os tratamentos consistiram em combinar três níveis de compactação com três de teor de água do solo, os níveis de T.A.D.S. foram obtidos após chuvas ou durante períodos secos. A convenção utilizada para descrever os tratamentos possui a forma de XYYZZ, onde:

- X é o nível de compactação “B” baixo, “M” médio e “A” alto.
- YY é a data da coleta dos dados. “10” para 10/11/93, “14” para 14/12/93, “15” para 15/10/93, “20” para 20/10/93 e “21” para 21/02/94.

- ZZ são os valores indicativos do início da profundidade de amostragem da densidade e do teor de água do solo.

4.2.7. Porosidade total do solo

A porosidade total do solo foi obtida, conforme KIEHL (1979), através da seguinte expressão:

$$P = 100 \cdot (D_p - D_s) / D_p$$

onde:

- P - Porosidade total [%]
- D_p - Densidade da partícula do solo [Kg/dm^3]
- D_s - Densidade do solo [Kg/dm^3].

4.2.8. Análise estatística

O experimento foi analisado como um fatorial 3 x 3 com um delineamento de blocos inteiramente casualizado, os fatores são densidade e T.A.D.S. com três níveis, o número de repetições da variável de resposta (I.C.) é desbalanceado, no entanto permitiu um grau de liberdade do resíduo de 483.

4.2.9. Modelos matemáticos

A regressão múltipla, que melhor se ajustou aos dados, foi linear sem transformação dos fatores, a análise foi realizada com o auxílio do SANEST (Versão 2.1) software destinado à análise estatística. As regressões simples foram realizadas através dos programas internos de análise estatística da calculadora científica HP 48 SX.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

5.1. Ensaio de compactação Normal de Proctor.

Os ensaios, com três repetições (Tabela 2), mostram que a máxima densidade de compactação é em torno de $1,40 \text{ Kg/dm}^3$, obtida entre 28 e 31 % de teor de água do solo, conforme ilustra a Fig. 10.

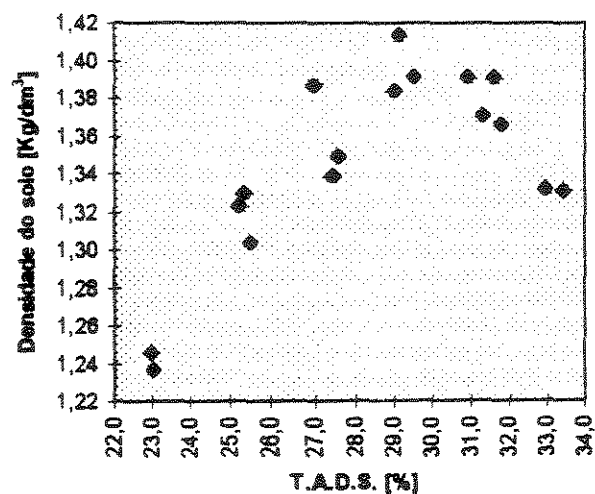


Figura 10 - Pontos da curva do ensaio normal de Proctor (densidade x teor de água do solo).

Tabela 2 - Resultados do ensaio de compactação normal de Proctor.

Repetição 1		Repetição 2		Repetição 3	
T.A.D.S. [%]	Densidade [Kg/dm ³]	T.A.D.S. [%]	Densidade [Kg/dm ³]	T.A.D.S. [%]	Densidade [Kg/dm ³]
25,36	1,330	23,03	1,237	22,97	1,246
26,99	1,387	25,54	1,304	25,20	1,323
29,15	1,414	27,42	1,339	27,56	1,349
30,94	1,391	29,52	1,391	29,01	1,384
31,80	1,366	31,60	1,391	31,34	1,371
		32,94	1,332	33,44	1,331

5.2. Teor de água do solo para a compactação

Nos dias 8 e 9 de Outubro, o solo atingiu a faixa de T.A.D.S. considerada ótima para o máximo de compactação, o trabalho de compactação foi dividido em dois dias, os teores de água do solo estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Teor de água do solo na data da compactação

Profundidade [cm]	T.A.D.S. [%] em 08/10/93				T.A.D.S. [%] em 09/10/93			
	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Rep.4	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Rep.4
0 a 10	30,3	33,4	32,9	30,3	23,4	25,4	26,0	25,0
10 a 20	30,9	33,8	33,3	30,9	29,6	29,8	31,7	28,4
20 a 30	31,8	34,3	33,4	31,7	32,1	30,9	32,1	31,5

5.3 Densidade do solo.

A densidade do solo (obtida na véspera das referidas dadas de aquisições dos dados do penetrógrafo) são mostradas no anexo I, no anexo II estão os gráficos das densidades. Observa-se que o máximo coeficiente de variação (C.V.) da média de densidade em cada profundidade não excedeu a 9,31% (verificado no tratamento B1025). A máxima média de densidade do solo foi de $1,29 \text{ Kg/dm}^3$, obtida nos tratamentos A1503, A1510 e A2003 a mínima foi de $1,05 \text{ Kg/dm}^3$ em B1503 e B1003.

5.4. Teor de água do solo durante o experimento

Os teores de água do solo em que se realizou o experimento estão listados no anexo III e os respectivos gráficos estão no anexo IV. O máximo coeficiente de variação da média dos teores de água do solo ocorreu na profundidade de 18 a 23 cm no dia 20/10/93 em baixa compactação, o valor observado foi de 9,16%. A maior média de T.A.D.S. foi de 33,9 % no tratamento B1025 e a menor de 21,3 % em B2003.

Para aumentar o grau de liberdade do resíduo, na análise estatística, foi necessário interpolar o valor do T.A.D.S. na profundidade compreendida entre 3 e 8 cm, nas datas de 15/10/93 e 20/10/93. Nas referidas datas, os dados disponíveis de T.A.D.S. que coincidem com os de densidades são os correspondentes às profundidades de 10 a 15 cm e 18 a 23 cm.

5.5. Índices de cone, velocidades de penetração e profundidades medidas.

No anexo V estão listados com as respectivas repetições e tratamentos, os valores dos índices de cone, velocidade de penetração do cone e profundidade máxima atingida, no anexo VI estão os gráficos com os I.C.s. Nos tratamentos de profundidade entre 25 e 30 cm, foram descartadas as repetições em que a profundidade máxima atingida pelo cone foi inferior a 30 cm.

No anexo VII estão as médias dos resultados e coeficientes de variações. A velocidade de penetração média foi de 29.23 mm/s com coeficiente de variação de 2,19%. Os testes de média das velocidades, listados na Tabela 4, mostram que não houve diferença significativa das médias ao nível de 1% nos diferentes tratamentos.

Tabela 4 - Teste de Tukey para médias de velocidade nos tratamentos.

NOME	NUM.REPET.	MEDIAS	5%	1%
		[mm/s]		
A14	12	29.7	a	A
B20	12	29.6	ab	A
M15	12	29.5	ab	A
M14	12	29.5	ab	A
B15	10	29.5	ab	A
B21	12	29.4	ab	A
A20	12	29.3	ab	A
A15	12	29.0	ab	A
M10	12	28.9	ab	A
M20	12	28.9	ab	A
A10	12	28.8	b	A
B10	12	28.8	b	A

5.6. Efeito da densidade e do teor de água do solo no índice de cone.

A Tabela 5 mostra como os tratamentos foram dispostos na análise estatística para avaliação do efeito da densidade e do teor de água do solo no valor do índice de cone. Os valores listados no anexo VIII referem-se as médias de densidade, teor de água do solo e índice de cone. Os tratamentos A1525, M1525, B1525, A2025, M2025 e B2025 foram retirados da análise, pois não havia dados disponíveis de T.A.D.S. nestes tratamentos.

Os efeitos da densidade, T.A.D.S. e interação densidade x teor de água do solo, segundo os dados do anexo IX (relatório de análise estatística gerado pelo SANEST), são significativos estatisticamente e influenciam as médias do I.C.. Observa-se que as médias dos I.C.s obtidas nos diferentes níveis do fator densidade do solo foram diferentes significativamente ao nível de 5%, sendo que as médias aumentam com a elevação da densidade do solo. Se as médias dos I.C.s forem consideradas, somente, nos diferentes níveis do fator T.A.D.S., nota-se que quanto maior é o T.A.D.S. menor é o I.C., os níveis do fator T.A.D.S. são diferentes ao nível de significância estatística de 5 %.

Nos testes de Tuckey para comparativos de médias de I.C. na interação entre os fatores T.A.D.S. e densidade do solo, observou-se que:

- Dentro do nível de T.A.D.S. mínimo, as médias dos I.C.s são diferentes estatisticamente ao nível de 5% de significância, e quanto maior é a densidade do solo maior é a média do I.C.;
- No T.A.D.S. intermediário a variação do fator densidade do solo mostra que a densidade alta é igual a baixa, que por sua vez é igual a média, no entanto existe diferença estatística

- ao nível de 5 % de significância entre a densidade alta e a média. Numericamente a densidade baixa é maior que a densidade média;
- No nível de T.A.D.S. máximo, a variação de densidade do solo não causa diferença estatística nas médias do I.C.;
 - Quando a densidade do solo é alta a variação dos níveis de T.A.D.S. é muito importante, pois os resultados são diferentes estatisticamente ao nível de 5 %, quanto maior o T.A.D.S. menor o I.C.;
 - O I.C. resultante do T.A.D.S. máximo e intermediário, dentro do nível de densidade média, são iguais, e diferentes em relação ao T.A.D.S. mínimo, isto ao nível de 5 % de significância estatística. Numericamente o T.A.D.S. máximo é maior que o intermediário;
 - No nível de densidade baixa do solo, o mínimo T.A.D.S. é igual ao intermediário, sendo o intermediário igual ao máximo, porém entre o mínimo e o máximo existe diferença estatística ao nível de 5 %, quanto menor o T.A.D.S. maior é o I.C..

A Fig. 11 mostra o resultados dos I.C.s em função da densidade e do T.A.D.S., as combinações de densidade x T.A.D.S. da Tabela 5 (C1 ..C9) estão grafadas na malha plotada de dados, a observação da malha com o posicionamento das combinações, permitem uma melhor visualização e compreensão da análise estatística do efeito da densidade e do T.A.D.S. no índice de cone.

Tabela 5 - Ordenação dos tratamentos para análise estatística dos efeitos de densidade e T.A.D.S. no resultado do índice de cone.

DENSIDADE	T.A.D.S.	T < 26% (1 - Mínimo) (C1)	26% ≤ T ≤ 30% (2 - Intermediário) (C2)													T > 30% (3 - Máximo) (C3)					
(3 - Alta) > 1,21 Kg/dm³	Tratamento	B2125 A2003	M2003 M2010 M1503 M2018 A2010 A2018 A1503 M1010 A1003 M1018 M1410 A1510	A1010 A1518 M1025 A1410 A1403 A1418																	
	I.C. [Kgf/cm²]	73,67 74,48	30,06 27,92 13,35 24,01 47,84 32,56 61,50 15,47 25,69 18,77 15,99 40,58	23,11 28,24 17,18 22,76 21,70 17,96																	
	T.A.D.S. [%]	25,3 25,7	26,0 27,1 27,7 27,8 27,8 28,2 28,7 28,9 29,2 29,6 29,8 29,9	30,3 30,4 30,6 31,4 31,6 32,8																	
	Dens. [Kg/dm³]	1,22 1,29	1,27 1,27 1,22 1,24 1,26 1,22 1,29 1,27 1,24 1,23 1,24 1,29	1,25 1,27 1,22 1,24 1,26 1,22																	
	Média I.C.	74,16	29,48													21,89					

DENSIDADE	T.A.D.S.	T < 26% (1 - Mínimo) (C4)				26% ≤ T ≤ 30% (2 - Intermediário) (C5)			T > 30% (3 - Máximo) (C6)					
(2 - Média) 1,15 a 1,21 Kg/dm³	Tratamento	B2010 B2018 B2110 B2118	M1003 M1403 M1510			M1418 M1518 B1010 A1018 A1025 A1425								
	I.C. [Kgf/cm²]	28,04 59,42 68,73 75,02	9,74 10,30 24,41			18,79 23,40 12,53 18,39 17,95 17,22								
	T.A.D.S. [%]	21,6 22,5 23,9 24,5	28,8 29,0 29,1			30,4 30,4 31,2 31,4 31,8 33,4								
	Dens. [Kg/dm³]	1,15 1,17 1,16 1,18	1,19 1,19 1,20			1,19 1,17 1,16 1,20 1,18 1,20								
	Média I.C.	57,80				14,82			18,05					

DENSIDADE	T.A.D.S.	T < 26% (1 - Mínimo) (C7)			26% ≤ T ≤ 30% (2 - Intermediário) (C8)		T > 30% (3 - Máximo) (C9)			
(1- Baixa) < 1,15 Kg/dm³	Tratamento	B2003 B2103 B1503	B1510 B1518		M1425 B1018 B1003 B1025					
	I.C. [Kgf/cm²]	12,25 72,23 12,59	24,17 22,88		18,75 19,80 9,17 17,13					
	T.A.D.S. [%]	21,3 23,5 25,9	26,4 28,8		31,6 32,4 32,7 33,9					
	Dens. [Kg/dm³]	1,08 1,11 1,05	1,10 1,11		1,14 1,08 1,05 1,10					
	Média I.C.	33,52			23,52		16,21			

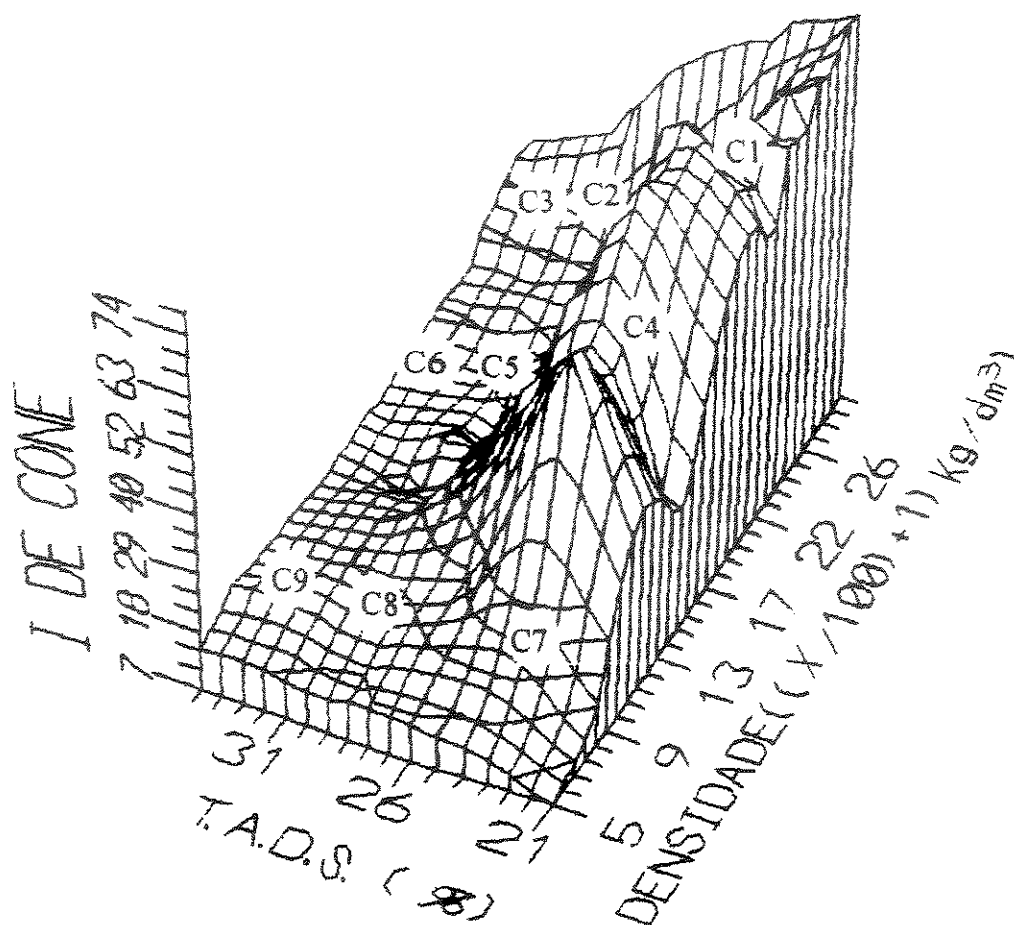


Figura 11 - Gráfico dos resultados do I.C. em função da densidade e do teor de água do solo, com localização das combinações dos tratamentos.

5.7. Porosidade total do solo.

Na faixa de densidade alta do solo de 1,22 a 1,29 Kg/dm³ a porosidade total é de 53,26 % e 50,57 % respectivamente. Na densidade média de 1,15 a 1,20 Kg/dm³ as

respectivas porosidades totais são 55,94 % e 54,02 %. Na densidade baixa com variação de 1,05 a 1,14 Kg/dm³ a porosidade variou respectivamente de 59,77 % a 56,32 %.

Segundo o ensaio normal de Proctor a densidade máxima deste solo é de 1.40 Kg/dm³ ou 46,36 % de porosidade total.

Todos os tratamentos de compactação, obtiveram valores de densidade do solo inferiores à densidade considerada maléfica (1,36 Kg/dm³), obtida por NOVAK et al (1992) através de relações de macro e microporosidade. Apesar disto os valores médios de I.C. são, segundo a literatura, proibitivos para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (maiores que 20 Kgf/cm²), apenas os tratamentos C3, C5, C6, C8 e C9 possuem média do índice de cone inferior ou próxima a 20 Kgf/cm², nestes tratamentos o T.A.D.S. é superior a 30 %, em teores de água do solo entre 26 e 30 % isto só ocorre quando a densidade é inferior a 1,21 Kg/dm³. Estes resultados mostram o risco de se confundir dureza do solo (valor superior a 20 Kgf/cm² de I.C.) com compactação, quando o teor de água do solo for baixo.

5.8. Modelos matemáticos.

O melhor modelo de regressão múltipla, encontrado para descrever o comportamento do I.C. em função do T.A.D.S. e da densidade do solo foi o linear (anexo X). O coeficiente de determinação do modelo (R^2) ficou em 0,3787 e a correlação (R) em 0,6154, o modelo é dado por:

$$I.C. = 64.92 \cdot D - 3.58 \cdot T + 29,18$$

onde:

I.C. - Índice de cone [Kgf/cm²].

D - Densidade do solo [Kg/dm³].

T - T.A.D.S. [%].

Devido o baixo coeficiente de determinação e correlação encontrado no melhor modelo de regressão múltipla, outros modelos de regressões, simples, foram obtidos em cada faixa de estudo de densidade e de T.A.D.S. (regressões listadas no anexo XI). Os modelos de regressões simples são:

- Linear I.C. = $A \cdot X + B$

- Logaritmo I.C. = $A \cdot \ln(X) + B$

- Exponencial I.C. = $B \cdot e^{A \cdot X}$

- Potência I.C. = $B \cdot X^A$

onde:

A - Declividade da curva linearizada.

B - Intersecção da curva linearizada com o eixo contendo os valores de I.C..

I.C. - Índice de cone [Kgf/cm²].

X - Densidade do solo [Kg/dm³] ou T.A.D.S. [%], isto depende da faixa de dados em que o modelo se aplica.

Fixando-se os níveis de densidade e variando-se o T.A.D.S. o I.C. [Kgf/cm²] é dado por:

- I.C. = $-162,87 \cdot \ln(T) + 579,36$ (nível de densidade alta, $R = -0,614$)

- I.C. = $-4,24 \cdot T + 149,65$ (nível de densidade média, $R = -0,724$)

- I.C. = $-1,63 \cdot T + 69,54$ (nível de densidade baixa, $R = -0,381$).

onde “T” é o teor de água do solo [%].

Fixando-se os níveis de T.A.D.S. e variando-se a densidade do solo o I.C. é dado por:

$$- \text{I.C.} = 10,92 * D^{3,15} \quad (\text{nível de T.A.D.S. máximo, } R = 0,670)$$

$$- \text{I.C.} = 110,89 * D - 109,67 \quad (\text{nível de T.A.D.S. intermediário, } R = 0,448)$$

$$- \text{I.C.} = 11,23 * D^{9,37} \quad (\text{nível de T.A.D.S. mínimo, } R = 0,757)$$

onde “D” é a densidade do solo [Kg/dm³].

Mesmo restringindo a faixa de aplicação dos modelos de regressões simples, o valor do máximo coeficiente de correlação ($R = 0,757$) é muito baixo, resultando em um coeficiente de determinação de 0,573 insuficiente para viabilizar a utilização dos modelos.

Os sinais dos coeficientes de correlação, das regressões simples, mostram que em níveis fixos de densidade do solo o aumento do T.A.D.S. diminui o valor do I.C. (R com sinais negativos), nos níveis fixo de T.A.D.S. o aumento da densidade do solo aumenta o I.C. (R com sinais positivos). Estas tendências só não são mantidas nas médias dos I.C.s obtidos dentro dos níveis: média do fator densidade (T.A.D.S. mínimo > máximo > intermediário) e intermediário do fator T.A.D.S. (densidade alta > baixa > média), isto pode ser interpretado como um indicativo da ocorrência de erro experimental nas amostragens ou uma interação diferente do fator T.A.D.S. e densidade do solo nos respectivos níveis em questão.

6. CONCLUSÕES

Nas condições de T.A.D.S., densidade e textura do solo estudado, pode-se concluir:

- Que o controle de velocidade de penetração do cone no solo, do penetrógrafo desenvolvido, é eficiente não apresentando diferença estatística ao nível de 1% entre as médias de velocidade nos tratamentos.

- Dentro dos níveis do fator densidade do solo as médias de I.C.s são diferentes estatisticamente ao nível de 5%, sendo que as médias aumentam com a elevação da densidade do solo. Considerando, somente, os níveis do fator teor de água do solo, nota-se comportamento estatístico semelhante ao da densidade, porém quanto menor for o T.A.D.S. maiores são os valores de I.C.s.

- Em teores de água do solo superiores a 30 % a densidade deixa de ser importante, estatisticamente, nos resultados do I.C..

- A interação de efeitos de T.A.D.S. x densidade de solo é altamente significativa, esta interação inviabiliza uma regressão múltipla ou simples dos dados com um bom coeficiente de determinação.

- É necessário muito critério na análise da dureza do solo e sua correlação com compactação (prejudicial ao desenvolvimento radicular das plantas), o solo mesmo em

níveis baixos de densidade (não estando compactado) pode apresentar-se extremamente duro em função de déficit hídrico. Portanto, o solo só deve ser subsolado, quando for constatado que a dureza do solo se deve a uma compactação prejudicial ao desenvolvimento radicular das culturas a serem implantadas na área.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolver um sistema de controle de velocidade do penetrógrafo, que garanta igualdade estatística ao nível de 5% nas médias de velocidade, e repetir a metodologia empregada neste trabalho para determinar, em diversos tipos de solos (com diferentes textura), o limite entre compactação do solo (prejudicial agronomicamente) e dureza por déficit hídrico.

Estudar com melhor controle de amostragem os níveis de teor de água do solo intermediário e densidade média, para verificar se nestas faixas de T.A.D.S. e densidade a interação dos fatores causam um comportamento diferenciado do I.C..

8 ANEXOS

Anexo I - Densidade do solo após o preparo de compactação.

Prof. [cm]	Compactação alta em 15/10/93. Densidade [Kg/dm ³]				Compactação alta em 20/10/93. Densidade [Kg/dm ³]			
	3-8	10-15	18-23	25-30	3-8	10-15	18-23	25-30
Rep.1	1,26	1,26	1,27	1,29	1,28	1,22	1,20	1,19
Rep.2	1,30	1,26	1,28	1,25	1,28	1,21	1,22	1,22
Rep.3	1,31	1,34	1,28	1,31	1,27	1,28	1,25	1,23
Rep.4	1,32	1,29	1,24	1,26	1,24	1,31	1,17	1,18
Rep.5	1,25	1,32	1,30	1,26	1,34	1,27	1,20	1,22
Rep.6	1,31	1,26	1,25	1,22	1,31	1,25	1,25	1,21
Média	1,29	1,29	1,27	1,27	1,29	1,26	1,22	1,21
C.V.	2,27%	2,71%	1,73%	2,49%	2,68%	3,01%	2,59%	1,61%

Prof. [cm]	Compactação alta em 10/11/93. Densidade [Kg/dm ³]				Compactação alta em 14/12/93. Densidade [Kg/dm ³]			
	3-8	10-15	18-23	25-30	3-8	10-15	18-23	25-30
Rep.1	1,25	1,17	1,13	1,16	1,29	1,26	1,18	1,15
Rep.2	1,22	1,23	1,21	1,20	1,25	1,20	1,12	1,17
Rep.3	1,21	1,27	1,21	1,27	1,31	1,25	1,29	1,16
Rep.4	1,27	1,28	1,22	1,16	1,25	1,26	1,27	1,24
Rep.5	1,25	1,23	1,20	1,15	1,28	1,22	1,21	1,25
Rep.6	1,23	1,30	1,21	1,13	1,20	1,24	1,27	1,22
Média	1,24	1,25	1,20	1,18	1,26	1,24	1,22	1,20
C.V.	1,80%	3,75%	2,78%	4,27%	3,07%	1,94%	5,36%	3,63%

	Compactação média em 15/10/93.				Compactação média em 20/10/93.			
	Densidade [Kg/dm ³]				Densidade [Kg/dm ³]			
Prof. [cm]	3-8	10-15	18-23	25-30	3-8	10-15	18-23	25-30
Rep.1	1,20	1,24	1,16	1,20	1,27	1,24	1,25	1,16
Rep.2	1,30	1,24	1,14	1,15	1,27	1,22	1,24	1,27
Rep.3	1,25	1,19	1,16	1,17	1,29	1,30	1,24	1,22
Rep.4	1,24	1,21	1,30	1,25	1,29	1,34	1,30	1,23
Rep.5	1,19	1,12	1,12	1,15	1,24	1,25	1,21	1,19
Rep.6	1,12	1,18	1,13	1,14	1,27	1,27	1,21	1,22
Média	1,22	1,20	1,17	1,18	1,27	1,27	1,24	1,22
C.V.	5,06%	3,76%	5,69%	3,55%	1,44%	3,45%	2,67%	3,07%

	Compactação média em 10/11/93.				Compactação média em 14/12/93.			
	Densidade [Kg/dm ³]				Densidade [Kg/dm ³]			
Prof. [cm]	3-8	10-15	18-23	25-30	3-8	10-15	18-23	25-30
Rep.1	1,08	1,26	1,34	1,26	1,09	1,18	1,23	1,15
Rep.2	1,17	1,31	1,24	1,30	1,14	1,27	1,10	1,13
Rep.3	1,23	1,30	1,16	1,17	1,27	1,13	1,20	1,13
Rep.4	1,21	1,26	1,13	1,13	1,24	1,30	1,15	1,10
Rep.5	1,19	1,25	1,20	1,24	1,15	1,27	1,21	1,18
Rep.6	1,26	1,26	1,32	1,23	1,24	1,28	1,26	1,16
Média	1,19	1,27	1,23	1,22	1,19	1,24	1,19	1,14
C.V.	5,23%	1,97%	6,90%	5,06%	6,01%	5,44%	4,85%	2,44%

	Compactação baixa em 15/10/93.				Compactação baixa em 20/10/93.			
	Densidade [Kg/dm ³]				Densidade [Kg/dm ³]			
Prof. [cm]	3-8	10-15	18-23	25-30	3-8	10-15	18-23	25-30
Rep.1	1,10	1,13	1,15	1,07	1,06	1,12	1,11	1,21
Rep.2	1,14	1,16	1,09	1,06	1,08	1,13	1,16	1,15
Rep.3		1,09	1,07	1,06	1,14	1,12	1,14	1,15
Rep.4	0,94	1,09	1,12	1,13	1,02	1,08	1,17	1,21
Rep.5	1,08	1,15	1,14	1,06	1,04	1,19	1,18	1,16
Rep.6	0,98	1,00	1,07	1,11	1,14	1,24	1,24	1,19
Média	1,05	1,10	1,11	1,08	1,08	1,15	1,17	1,18
C.V.	8,05%	5,31%	3,16%	2,83%	4,68%	5,05%	3,74%	2,43%

	Compactação baixa em 10/11/93.				Compactação baixa em 21/02/94.			
	Densidade [Kg/dm ³]				Densidade [Kg/dm ³]			
Prof. [cm]	3-8	10-15	18-23	25-30	3-8	10-15	18-23	25-30
Rep.1	0,97	1,12	1,09	1,16	1,19	1,17	1,20	1,20
Rep.2	1,02	1,14	1,09	1,06	1,19	1,23	1,28	1,20
Rep.3	1,07	1,14	1,09	1,17	1,07	1,12	1,16	1,23
Rep.4	1,03	1,15	1,21	1,18	1,03	1,14	1,14	1,24
Rep.5	1,12	1,23	0,97		1,05	1,15	1,17	1,28
Rep.6	1,09	1,15	1,01	0,94	1,13	1,17	1,14	1,19
Média	1,05	1,16	1,08	1,10	1,11	1,16	1,18	1,22
C.V.	5,15%	3,32%	7,67%	9,31%	6,34%	3,25%	4,49%	2,77%

Anexo II - Gráficos das médias das densidades do solo.

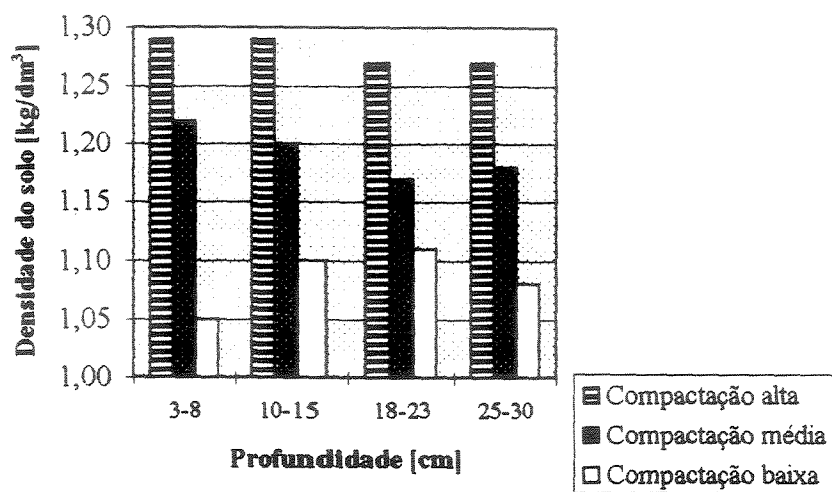


Gráfico das médias das densidades do solo nos tratamentos de compactação em 15/10/93.

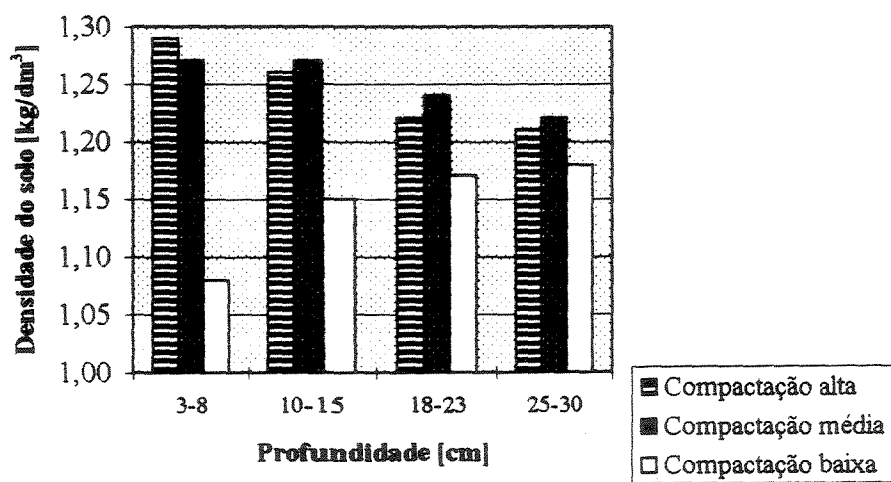


Gráfico das médias das densidades do solo nos tratamentos de compactação em 20/10/93.

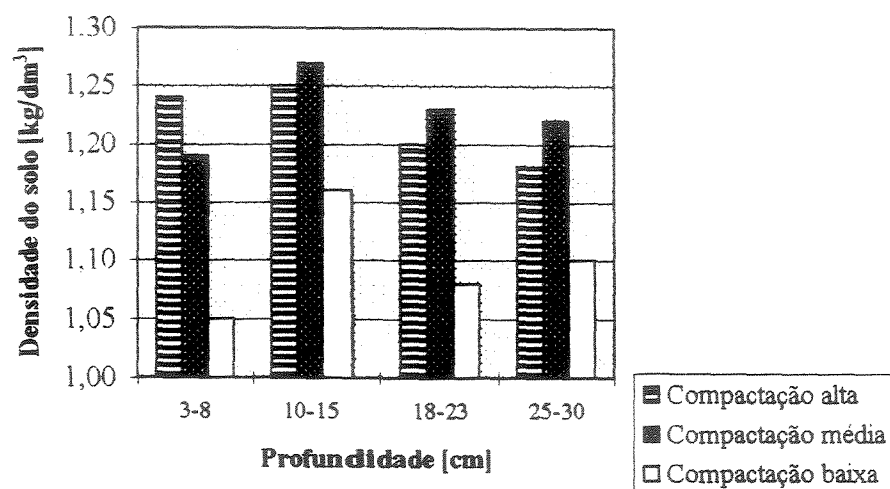


Gráfico das médias das densidades do solo nos tratamentos de compactação em 10/11/93.

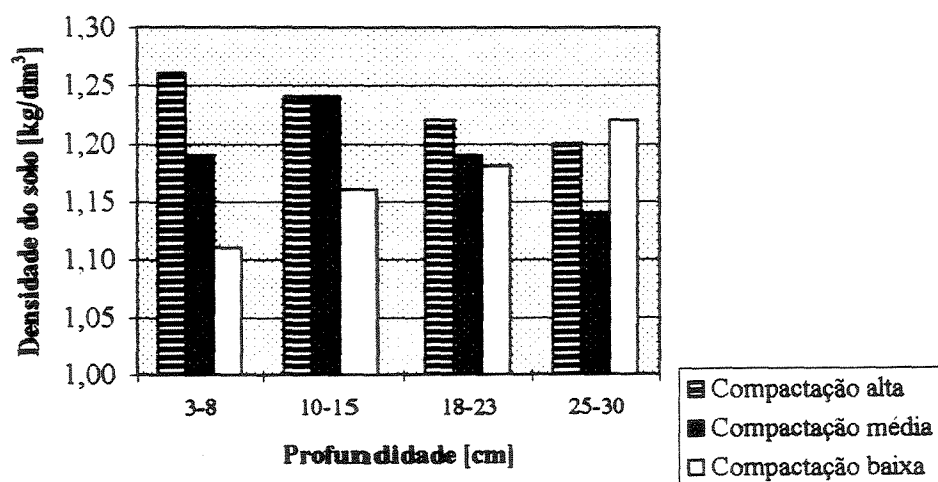


Gráfico das médias das densidades do solo nos tratamentos de compactação em 14/12/93 e

21/02/94.

Anexo III - Teor de água do solo no experimento.

	Compactação alta em 15/10/93.					Compactação alta em 20/10/93.				
	T.A.D.S. [%]					T.A.D.S. [%]				
Prof. [cm]	0-5	3-8 (interp.)	5-10	10-15	18-23	0-5	3-8 (interp.)	5-10	10-15	18-23
Rep.1	27,3	28,6	29,4	29,2	30,5	24,9	24,6	24,4	26,6	28,4
Rep.2	27,4	27,6	27,8	29,3	30,0	24,9	25,4	25,7	27,7	29,4
Rep.3	29,5	29,8	30,0	31,3	30,6	26,7	27,2	27,5	29,2	26,9
Média	28,1	28,7	29,1	29,9	30,4	25,5	25,7	25,9	27,8	28,2
C.V.	4,43%	3,84%	3,91%	3,96%	1,06%	4,08%	5,17	6,02%	4,69%	4,46%

	Compactação alta em 10/11/93.				Compactação alta em 14/12/93.			
	T.A.D.S. [%]				T.A.D.S. [%]			
Prof. [cm]	3-8	10-15	18-23	25-30	3-8	10-15	18-23	25-30
Rep.1	28,2	29,3	31,7	32,0	31,3	31,1	32,0	33,0
Rep.2	29,0	30,1	31,6	32,3	30,3	29,6	33,0	32,0
Rep.3	31,5	29,9	31,8	28,9	30,6	31,4	33,0	33,6
Rep.4	27,2	31,9	30,5	29,7	31,6	31,4	33,9	34,2
Rep.5			34,1	33,7	32,8	32,4	32,0	33,5
Rep.6	30,2		28,5	34,0	32,8	32,2	32,6	34,2
Média	29,2	30,3	31,4	31,8	31,6	31,4	32,8	33,4
C.V.	5,75%	3,69%	5,33%	5,97%	3,07%	2,90%	2,01%	2,27%

	Compactação média em 15/10/93.					Compactação média em 20/10/93.				
	T.A.D.S. [%]					T.A.D.S. [%]				
Prof. [cm]	0-5	3-8 (interp.)	5-10	10-15	18-23	0-5	3-8 (interp.)	5-10	10-15	18-23
Rep.1	26,6	26,4	26,2	27,9	29,2	25,3	25,7	26,0	26,5	27,6
Rep.2	27,9	28,4	28,8	29,7	31,2	25,0	25,4	25,6	26,9	28,2
Rep.3	29,2	28,2	27,5	29,7	30,8	26,8	26,9	26,9	27,9	27,6
Média	27,9	27,7	27,5	29,1	30,4	25,7	26,0	26,2	27,1	27,8
C.V.	4,66%	3,98%	4,73%	3,57%	3,48%	3,75%	3,05%	2,54%	2,66%	1,25%

	Compactação média em 10/11/93.				Compactação média em 14/12/93.			
	T.A.D.S. [%]				T.A.D.S. [%]			
Prof. [cm]	3-8	10-15	18-23	25-30	3-8	10-15	18-23	25-30
Rep.1	28,3	27,9	28,4	29,6	29,6	30,3	30,9	32,0
Rep.2	30,1	29,1	28,6	30,0	28,1	29,0	29,9	31,0
Rep.3	28,3	29,0	30,2	31,8	29,3	29,4	29,6	32,3
Rep.4	28,6	28,9	29,7	30,2	27,3	28,7	29,8	31,1
Rep.5	30,5	29,5	31,1	32,1	30,8	30,9	30,8	32,2
Rep.6	26,7	28,9	29,5	30,1	28,9	30,2	31,3	31,0
Média	28,8	28,9	29,6	30,6	29,0	29,8	30,4	31,6
C.V.	4,38%	1,68%	3,11%	3,11%	3,83%	2,61%	2,11%	1,82%

	Compactação baixa em 15/10/93.					Compactação baixa em 20/10/93.				
	T.A.D.S. [%]					T.A.D.S. [%]				
Prof. [cm]	0-5	3-8 (interp.)	5-10	10-15	18-23	0-5	3-8 (interp.)	5-10	10-15	18-23
Rep.1	28,1	27,4	27,0	28,2	30,2	20,3	20,7	20,9	21,0	21,6
Rep.2	25,1	24,6	24,2	24,7	28,3	21,5	20,9	20,5	21,0	21,1
Rep.3	25,8	25,6	25,5	26,2	27,8	22,9	22,2	21,8	22,9	24,9
Média	26,3	25,9	25,6	26,4	28,8	21,6	21,3	21,1	21,6	22,5
C.V.	5,96%	5,48%	5,48%	6,66%	4,40%	6,03%	3,83%	3,16%	5,07%	9,16%

	Compactação baixa em 10/11/93.				Compactação baixa em 21/02/94.			
	T.A.D.S. [%]				T.A.D.S. [%]			
Prof. [cm]	3-8	10-15	18-23	25-30	3-8	10-15	18-23	25-30
Rep.1	31,5	29,3		32,4	23,2	23,5	24,5	26,2
Rep.2	32,6	31,6	29,1	32,5	23,6	23,9	23,9	24,5
Rep.3	34,4	32,5	32,9	35,3	23,8	23,8	24,3	25,1
Rep.4	33,5	32,6	34,8	35,7	23,5	23,8	24,6	25,3
Rep.5	32,3	28,9	33,8	33,5	23,5	24,0	24,7	25,3
Rep.6	31,7	32,5	31,3	34,0	23,7	24,2	24,9	25,5
Média	32,7	31,2	32,4	33,9	23,5	23,9	24,5	25,3
C.V.	3,10%	4,96%	6,91%	3,73%	0,76%	0,91%	1,32%	1,99%

Anexo IV - Gráficos das médias dos teores de água do solo.

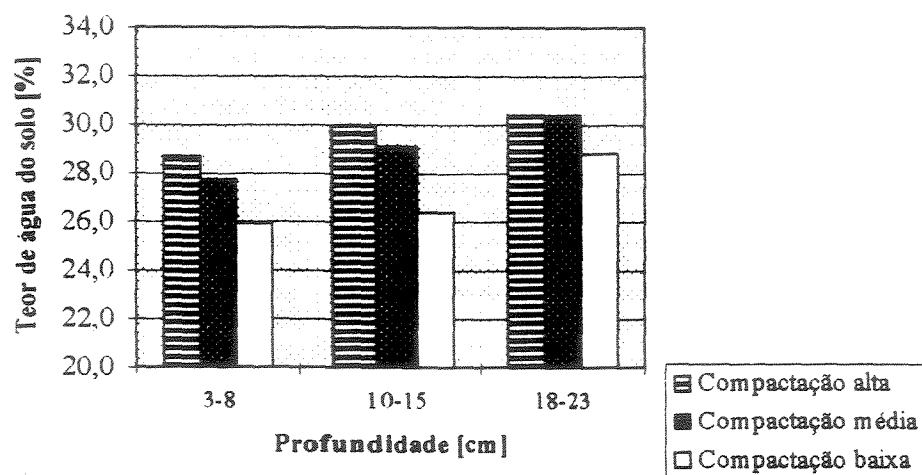


Gráfico das médias dos teores de água do solo nos tratamentos de compactação em 15/10/93.

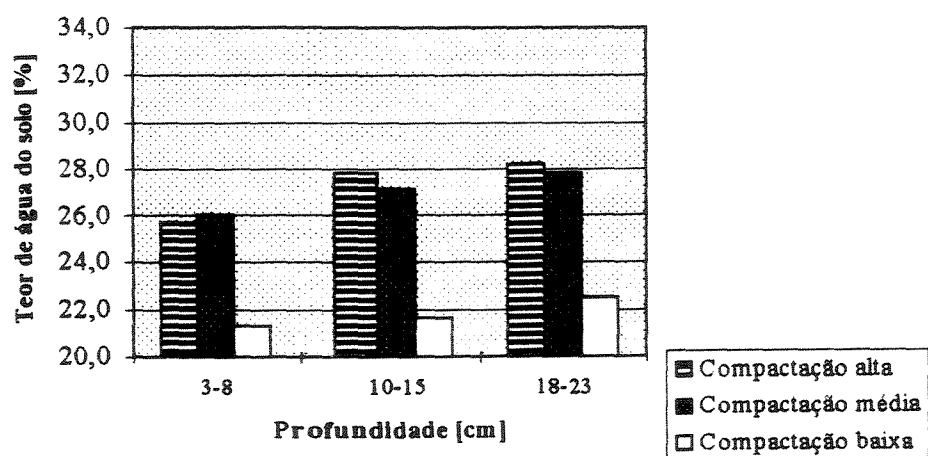


Gráfico das médias dos teores de água do solo nos tratamentos de compactação em 20/10/93.

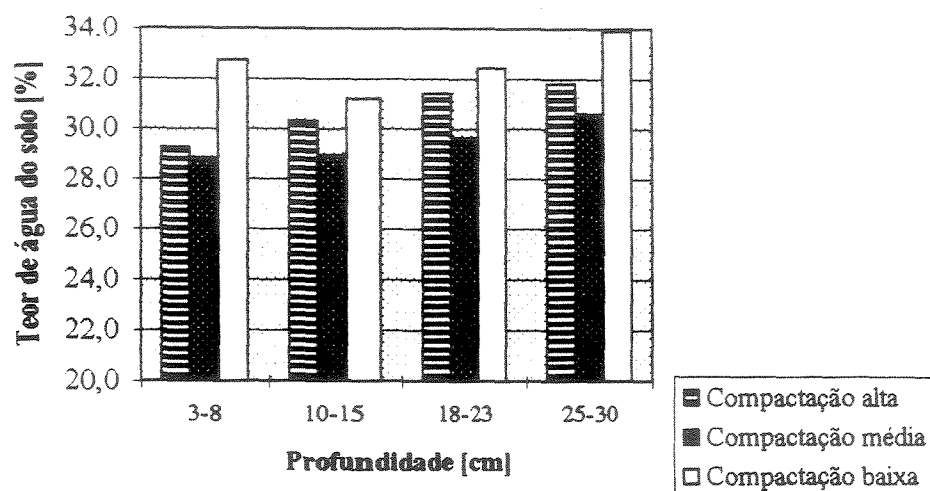


Gráfico das médias dos teores de água do solo nos tratamentos de compactação em 10/11/93.

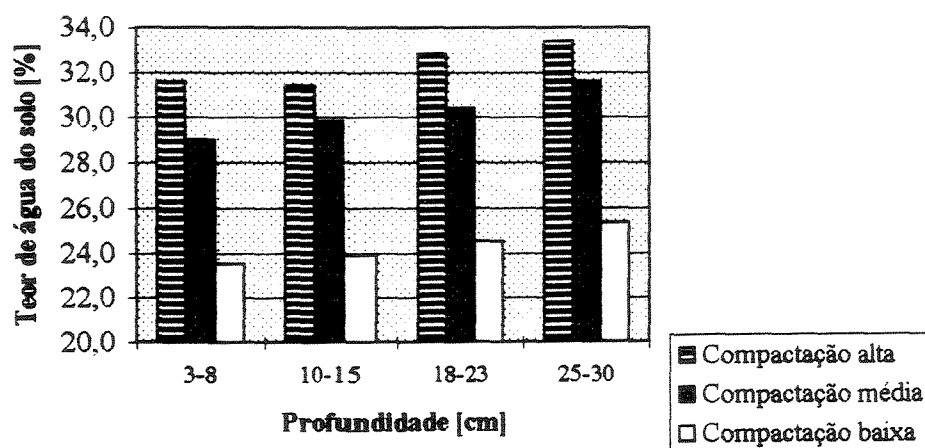


Gráfico das médias dos teores de água do solo nos tratamentos de compactação em 14/12/93 e 21/02/94.

Anexo V - Índices de cone, velocidades de penetração e profundidades.

Tratamento	A1503	A1510	A1518	A1525		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	51,71	41,43	28,40	25,30	28,86	30,03
Rep. 2	62,48	34,74	25,27	20,23	28,96	30,95
Rep. 3	81,45	55,70	31,50	25,68	28,45	31,92
Rep. 4	45,16	35,16	30,53	19,99	29,09	30,18
Rep. 5	52,63	32,06	18,75		29,06	29,60
Rep. 6	55,99	36,87	22,25	27,02	28,83	31,63
Rep. 7	30,48	46,20	25,48	25,42	28,89	31,23
Rep. 8	129,34	63,95	33,62	43,61	28,48	30,17
Rep. 9	71,16	31,14	27,74		29,10	29,19
Rep. 10	77,60	36,75	38,62	47,17	29,37	30,01
Rep. 11	54,86	42,45	36,22		29,10	29,28
Rep. 12	25,13	30,44	20,48		29,61	29,61
Média [Kgf/cm ²]	61,50	40,58	28,24	29,30	28,98	30,32
C.V.	44,27%	25,38%	21,86%	35,14%	1,13%	3,00%

Tratamento	M1503	M1510	M1518	M1525		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	17,56	17,40	22,06		28,42	28,60
Rep. 2	20,27	15,42	19,87		28,46	27,83
Rep. 3	16,62	22,87	19,48		28,42	28,42
Rep. 4	12,01	25,50	19,21		29,88	29,98
Rep. 5	6,71	24,12	32,35		29,86	28,83
Rep. 6	10,92	29,16	23,29		30,05	27,61
Rep. 7	8,98	31,18	29,49	18,28	29,72	31,58
Rep. 8	6,62	13,42	20,32	18,97	29,83	30,20
Rep. 9	12,49	23,57	19,12	17,65	30,44	31,40
Rep. 10	26,09	26,71	20,22		29,56	27,62
Rep. 11	11,83	29,19	30,55	23,47	29,69	30,99
Rep. 12	10,12	34,40	24,84	23,57	30,02	30,20
Média [Kgf/cm ²]	13,35	24,41	23,40	20,39	29,53	29,44
C.V.	43,33%	26,24%	20,60%	14,21%	2,36%	4,98%

Tratamento	B1503	B1510	B1518	B1525		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	11,63	24,21	29,76	19,30	29,62	31,28
Rep. 2	6,90	17,83	21,01	20,42	29,28	32,57
Rep. 3	13,93	28,38	24,70	23,38	29,04	31,68
Rep. 4	5,22	31,71	27,59	19,90	29,49	30,78
Rep. 5	6,78	25,72	23,78	18,58	29,68	30,79
Rep. 6	13,12	22,78	26,04	18,95	30,53	30,63
Rep. 7	29,00	27,40	20,02		29,46	27,62
Rep. 8	16,40	31,60	22,99	16,56	29,39	30,40
Rep. 9	9,40	19,21	14,95	18,87	28,28	30,58
Rep. 10	13,48	12,85	17,95	17,87	29,83	32,35
Rep. 11						
Rep. 12						
Média [Kgf/cm ²]	12,59	24,17	22,88	19,31	29,46	30,87
C.V.	54,16%	25,34%	19,68%	9,78%	1,95%	4,43%

Tratamento	A2003	A2010	A2018	A2025		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	159,34	103,18	54,90	28,59	29,43	30,81
Rep. 2	60,57	51,96	39,36		29,06	29,60
Rep. 3	144,58	92,21	42,69	29,08	29,49	31,79
Rep. 4	104,68	54,44	31,90	28,42	29,54	30,19
Rep. 5	19,50	33,13	29,98	28,92	29,16	30,71
Rep. 6	72,49	32,06	23,95		29,39	28,38
Rep. 7	69,72	36,77	24,27		29,45	27,43
Rep. 8	48,35	40,72	32,51		28,75	28,84
Rep. 9	77,15	39,50	28,96		29,25	29,25
Rep. 10	54,07	28,97	33,38		29,13	28,04
Rep. 11	46,63	31,86	23,76		29,22	29,13
Rep. 12	36,72	29,31	25,04		29,66	28,82
Média [Kgf/cm ²]	74,48	47,84	32,56	28,75	29,29	29,42
C.V.	56,64%	51,79%	28,47%	1,05%	0,85%	4,30%

Tratamento	M2003	M2010	M2018	M2025		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	12,73	19,50	19,91	16,81	28,94	30,02
Rep. 2	18,97	25,40	23,71		28,44	29,60
Rep. 3	41,85	34,62	26,82	26,11	29,40	31,05
Rep. 4	47,62	38,13	28,86		28,25	27,54
Rep. 5	60,00	32,98	23,88		27,83	26,27
Rep. 6	26,46	39,40	23,99		28,63	24,96
Rep. 7	29,44	27,41	21,51		29,46	26,05
Rep. 8	26,59	24,74	24,47		29,42	27,39
Rep. 9	43,07	28,41	26,39		28,29	28,82
Rep. 10	24,74	20,75	18,74		29,04	29,59
Rep. 11	14,41	19,32	23,97		29,44	29,81
Rep. 12	14,79	24,34	25,94	23,57	29,48	30,40
Média [Kgf/cm ²]	30,06	27,92	24,01	22,16	28,89	28,46
C.V.	49,84%	24,92%	12,04%	21,69%	2,01%	6,89%

Tratamento	B2003	B2010	B2018	B2025		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	5,84	38,64	61,79	52,20	29,27	31,37
Rep. 2	7,49	50,95	49,50	76,71	29,95	33,79
Rep. 3	14,59	39,93	77,29	93,95	29,49	33,55
Rep. 4	5,59	10,28	69,58	65,32	29,60	33,76
Rep. 5	25,04	21,85	55,44	84,66	29,57	32,16
Rep. 6	16,24	18,17	62,38	83,05	29,41	32,35
Rep. 7	6,28	16,60	42,60	47,74	30,99	31,76
Rep. 8	16,31	44,39	71,52	85,15	30,40	32,58
Rep. 9	11,95	40,18	23,96	54,66	29,13	32,04
Rep. 10	8,74	9,35	52,23	73,04	29,11	33,56
Rep. 11	7,43	12,05	70,06	71,34	29,34	33,56
Rep. 12	21,47	34,04	76,73	71,41	29,31	31,78
Média [Kgf/cm ²]	12,25	28,04	59,42	71,60	29,63	32,69
C.V.	53,13%	52,86%	26,38%	20,13%	1,89%	2,75%

Tratamento	A1003	A1010	A1018	A1025		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	28,91	27,70	19,13	16,41	29,48	32,34
Rep. 2	34,12	29,42	19,33	17,25	28,54	31,21
Rep. 3	16,94	23,95	19,42	19,83	28,55	31,23
Rep. 4	17,62	18,11	15,30	16,40	28,98	31,65
Rep. 5	34,09	25,33	18,46	14,38	28,94	32,02
Rep. 6	22,72	20,94	14,17	20,86	28,46	32,20
Rep. 7	27,39	21,18	18,96	18,41	28,52	31,02
Rep. 8	17,40	22,28	19,67	19,15	28,07	30,79
Rep. 9	46,35	28,20	22,88	21,69	29,95	31,81
Rep. 10	25,37	21,83	19,78	17,50	28,63	30,96
Rep. 11	22,63	20,62	16,63	15,61	28,83	30,63
Rep. 12	14,77	17,79	17,03		28,63	29,07
Média [Kgf/cm ²]	25,69	23,11	18,39	17,95	28,80	31,24
C.V.	35,78%	16,64%	12,58%	12,62%	1,74%	2,84%

Tratamento	M1003	M1010	M1018	M1025		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	9,83	16,26	21,53	21,11	29,70	30,44
Rep. 2	10,85	16,23	16,68	19,56	29,52	32,57
Rep. 3	14,72	14,41	21,65	20,24	28,96	32,40
Rep. 4	12,15	11,82	20,97	17,94	28,59	30,64
Rep. 5	8,64	11,17	16,52		29,08	29,45
Rep. 6	7,66	14,52	17,36	12,95	29,15	31,43
Rep. 7	6,02	14,37	22,42	14,86	28,75	31,00
Rep. 8	5,36	12,94	16,12	15,18	28,80	31,59
Rep. 9	8,82	17,82	19,86	16,43	29,27	31,38
Rep. 10	11,56	20,89	15,98	16,47	28,49	30,00
Rep. 11	12,13	18,59	16,35	17,24	28,54	30,59
Rep. 12	9,20	16,62	19,76	17,01	28,23	32,03
Média [Kgf/cm ²]	9,74	15,47	18,77	17,18	28,92	31,13
C.V.	27,77%	18,35%	13,28%	14,19%	1,52%	3,06%

Tratamento	B1003	B1010	B1018	B1025		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	8,28	9,48	18,65	14,14	28,98	31,61
Rep. 2	9,66	10,60	25,17	17,72	28,98	32,15
Rep. 3	9,50	10,95	17,86	21,64	28,70	32,02
Rep. 4	7,47	11,33	20,02	18,51	28,77	31,38
Rep. 5	6,35	11,64	24,39	18,53	29,12	32,57
Rep. 6	7,84	10,74	18,76	14,24	28,79	31,76
Rep. 7	7,97	16,12	18,63	17,35	28,80	31,41
Rep. 8	7,98	8,76	17,14	16,67	28,53	32,18
Rep. 9	12,13	16,13	17,22	16,33	28,92	30,19
Rep. 10	11,33	17,45	19,87	17,87	28,97	30,06
Rep. 11	13,33	15,60	21,84	17,91	28,45	31,56
Rep. 12	8,16	11,58	18,03	14,63	28,56	32,04
Média [Kgf/cm ²]	9,17	12,53	19,80	17,13	28,80	31,58
C.V.	22,87%	23,51%	13,49%	12,46%	0,72%	2,42%

Tratamento	A1403	A1410	A1418	A1425		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	30,69	28,84	24,37	16,40	30,56	31,99
Rep. 2	13,10	19,73	18,21	17,33	29,49	32,07
Rep. 3	13,67	20,61	13,81	11,28	29,81	33,16
Rep. 4	13,25	18,39	15,96	15,15	30,17	31,77
Rep. 5	22,85	24,08	18,38	19,41	29,81	32,14
Rep. 6	22,00	23,60	18,58	20,70	28,34	31,17
Rep. 7	14,11	19,71	18,08	17,62	28,04	31,81
Rep. 8	16,36	17,57	15,83	15,00	28,79	31,94
Rep. 9	28,16	24,54	17,06	16,38	31,29	31,77
Rep. 10	29,71	20,21	18,61	19,21	30,80	32,15
Rep. 11	23,50	28,34	17,58	20,70	29,30	32,51
Rep. 12	33,05	27,50	19,02	17,40	29,97	31,94
Média [Kgf/cm ²]	21,70	22,76	17,96	17,22	29,70	32,04
C.V.	34,48%	17,37%	14,05%	15,58%	3,28%	1,48%

Tratamento	M1403	M1410	M1418	M1425		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	12,92	16,74	19,10	18,36	30,74	32,75
Rep. 2	12,69	16,35	20,19	20,73	30,99	33,13
Rep. 3	7,79	16,53	20,64	19,14	28,63	30,95
Rep. 4	5,88	12,92	18,34	19,98	30,17	32,15
Rep. 5	20,58	19,16	25,94	24,90	28,58	31,17
Rep. 6	5,05	19,53	19,07	14,39	29,33	31,53
Rep. 7	6,71	9,81	13,27	17,26	27,89	30,85
Rep. 8	5,80	12,41	16,22	15,91	31,23	33,47
Rep. 9	11,69	14,68	15,52	16,00	31,08	31,76
Rep. 10	10,55	17,82	17,59	15,98	28,12	30,94
Rep. 11	14,47	15,76	21,98	23,28	28,38	31,40
Rep. 12	9,48	20,14	17,63	19,09	28,85	32,18
Média [Kgf/cm ²]	10,30	15,99	18,79	18,75	29,50	31,86
C.V.	43,90%	19,44%	17,40%	16,77%	4,28%	2,79%

Tratamento	B2103	B2110	B2118	B2125		
Profundidade [cm].	3-8	10-15	18-23	25-30	Veloc. [mm/s]	Prof. [cm]
Rep. 1	87,81	82,70	86,78	84,27	29,90	30,74
Rep. 2	93,87	78,23	88,71	73,70	29,79	30,63
Rep. 3	45,66	48,61	50,83		29,97	29,59
Rep. 4	66,09	64,31	105,57	80,48	29,69	30,16
Rep. 5	92,04	74,65	63,29	61,41	29,21	30,03
Rep. 6	93,38	66,43	70,37		29,04	29,41
Rep. 7	67,62	68,36	59,28	66,00	29,62	31,01
Rep. 8	55,98	54,29	78,66	76,03	28,94	31,74
Rep. 9	65,90	67,08	64,38	66,23	29,20	32,40
Rep. 10	80,95	93,19	73,34		28,20	28,99
Rep. 11	34,63	49,22	93,28	81,22	29,44	31,28
Rep. 12	82,90	77,70	65,79		29,31	28,94
Média [Kgf/cm ²]	72,23	68,73	75,02	73,67	29,36	30,41
C.V.	27,13%	19,72%	21,26%	11,30%	1,69%	3,58%

Anexo VI - Gráficos das médias dos I.C.s.

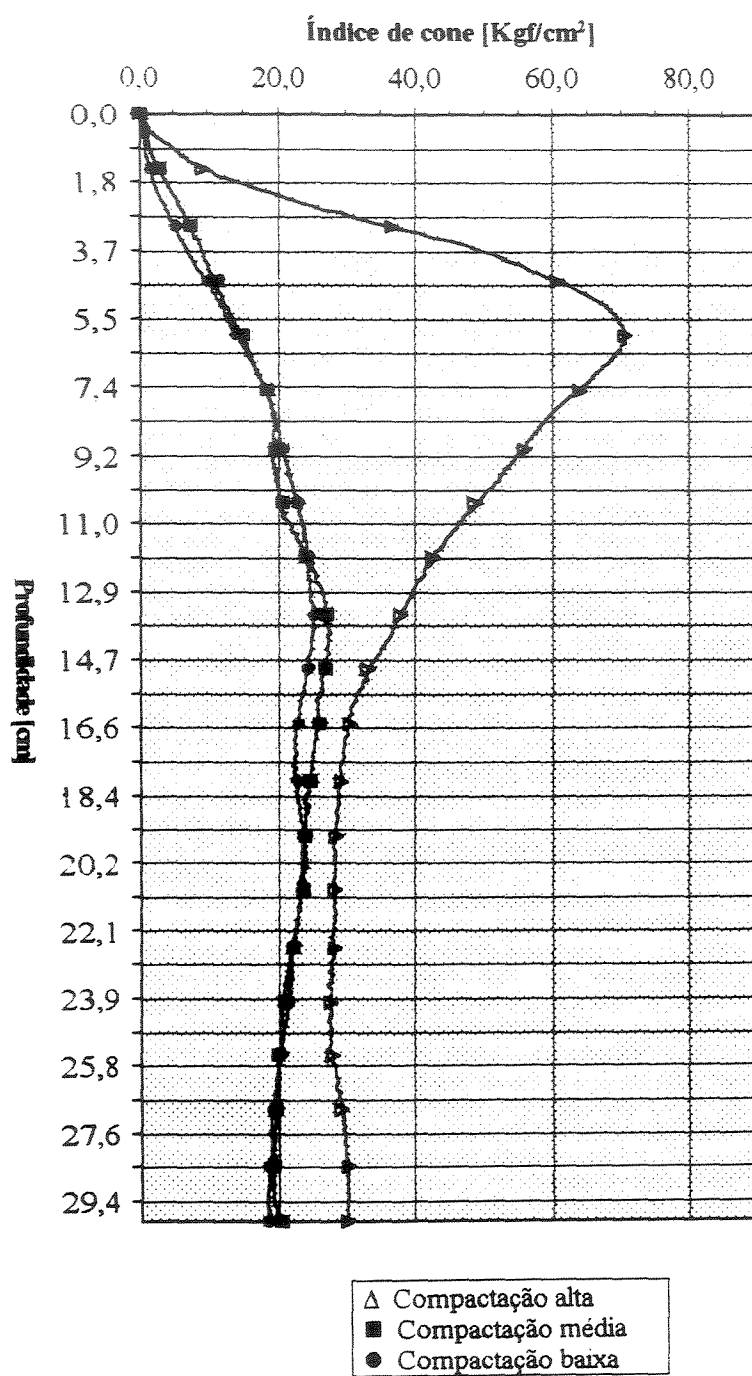


Gráfico das médias dos I.C.s na data de 15/10/93.

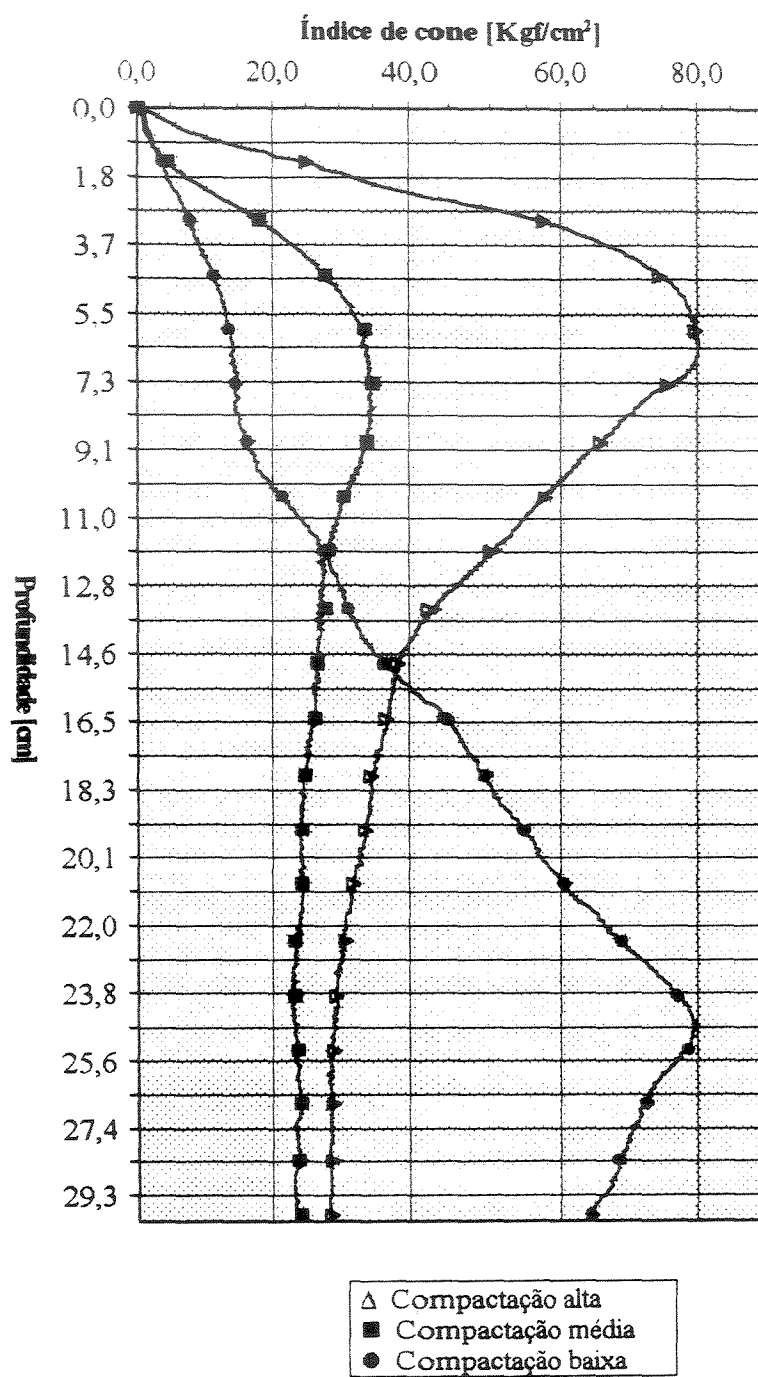


Gráfico das médias dos I.C.s na data de 20/10/93.

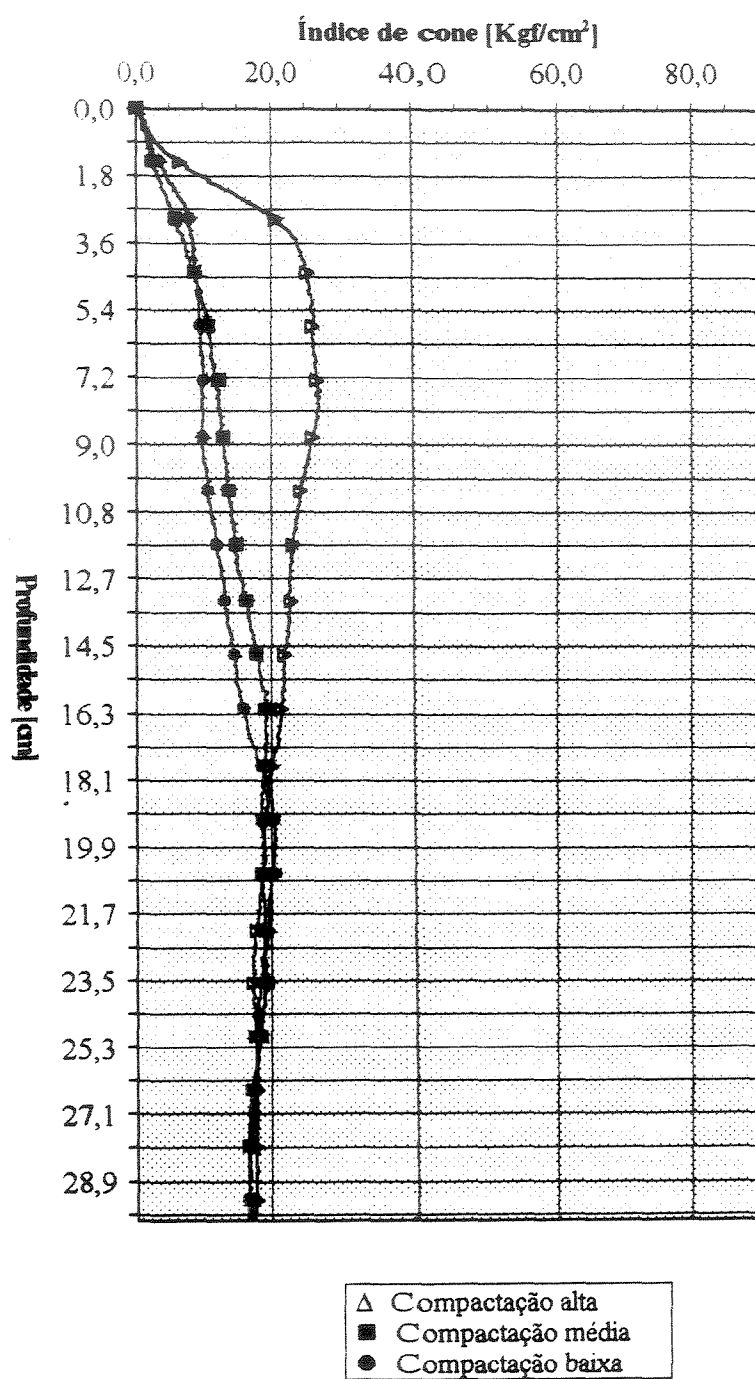


Gráfico das médias dos I.C.s na data de 10/11/93.

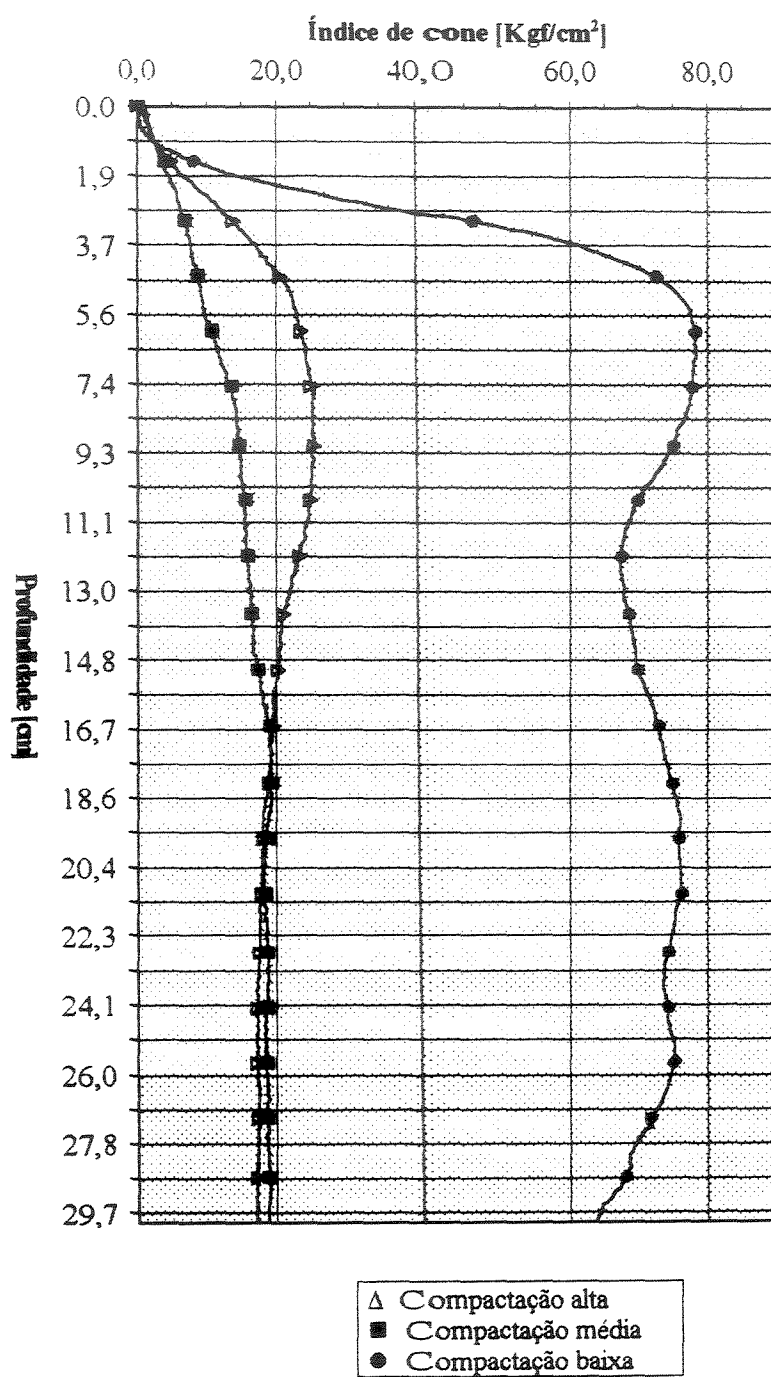


Gráfico das médias dos I.C.s na data de 14/12/93 e 21/02/94.

Anexo VII - Médias dos dados contidos no anexo V.

RESULTADOS DOS ÍNDICES DE CONE		
Índice de cone: 25,43%	Coeficientes de variação:	
	Velocidade de penetração: 2,190%	Profundidade máxima: 3,54%
Médias de:		
Velocidade de penetração: 29,23 mm/s	Profundidade máxima: 30,79 cm	

Anexo VIII - Médias dos índices de cone, densidade e teor de água do solo.

Tratamento	A1503	A1510	A1518	A1525
I.C. [Kgf/cm ²]	61,50	40,58	28,24	29,30
T.A.D.S. [%]	28,7	29,9	30,4	
Dens. [Kg/dm ³]	1,29	1,29	1,27	1,27
Tratamento	M1503	M1510	M1518	M1525
I.C. [Kgf/cm ²]	13,35	24,41	23,40	20,39
T.A.D.S. [%]	27,7	29,1	30,4	
Dens. [Kg/dm ³]	1,22	1,20	1,17	1,18
Tratamento	B1503	B1510	B1518	B1525
I.C. [Kgf/cm ²]	12,59	24,17	22,88	19,31
T.A.D.S. [%]	25,9	26,4	28,8	
Dens. [Kg/dm ³]	1,05	1,10	1,11	1,08
Tratamento	A2003	A2010	A2018	A2025
I.C. [Kgf/cm ²]	74,48	47,84	32,56	28,75
T.A.D.S. [%]	25,7	27,8	28,2	
Dens. [Kg/dm ³]	1,29	1,26	1,22	1,21
Tratamento	M2003	M2010	M2018	M2025
I.C. [Kgf/cm ²]	30,06	27,92	24,01	22,16
T.A.D.S. [%]	26,0	27,1	27,8	
Dens. [Kg/dm ³]	1,27	1,27	1,24	1,22
Tratamento	B2003	B2010	B2018	B2025
I.C. [Kgf/cm ²]	12,25	28,04	59,42	71,60
T.A.D.S. [%]	21,3	21,6	22,5	
Dens. [Kg/dm ³]	1,08	1,15	1,17	1,18
Tratamento	A1003	A1010	A1018	A1025
I.C. [Kgf/cm ²]	25,69	23,11	18,39	17,95
T.A.D.S. [%]	29,2	30,3	31,4	31,8
Dens. [Kg/dm ³]	1,24	1,25	1,20	1,18
Tratamento	M1003	M1010	M1018	M1025
I.C. [Kgf/cm ²]	9,74	15,47	18,77	17,18
T.A.D.S. [%]	28,8	28,9	29,6	30,6
Dens. [Kg/dm ³]	1,19	1,27	1,23	1,22
Tratamento	B1003	B1010	B1018	B1025
I.C. [Kgf/cm ²]	9,17	12,53	19,80	17,13
T.A.D.S. [%]	32,7	31,2	32,4	33,9
Dens. [Kg/dm ³]	1,05	1,16	1,08	1,10
Tratamento	A1403	A1410	A1418	A1425
I.C. [Kgf/cm ²]	21,70	22,76	17,96	17,22
T.A.D.S. [%]	31,6	31,4	32,8	33,4
Dens. [Kg/dm ³]	1,26	1,24	1,22	1,20

Tratamento	M1403	M1410	M1418	M1425
I.C. [Kgf/cm ²]	10,30	15,99	18,79	18,75
T.A.D.S. [%]	29,0	29,8	30,4	31,6
Dens. [Kg/dm ³]	1,19	1,24	1,19	1,14
Tratamento	B2103	B2110	B2118	B2125
I.C. [Kgf/cm ²]	72,23	68,73	75,02	73,67
T.A.D.S. [%]	23,5	23,9	24,5	25,3
Dens. [Kg/dm ³]	1,11	1,16	1,18	1,22

Anexo IX - Relatório de análise estatística gerado pelo SANEST.

```

*****
*   SANEST - SISTEMA DE ANÁLISE ESTATÍSTICA   *
*   Autores: Elio Paulo Zonta - Amauri Almeida Machado *
*   FEAGRI - Faculdade de Eng. Agrícola - UNICAMP *
*   ANÁLISE DA VARIÁVEL ÍNDICE DE CONE - ARQUIVO: SANTESE *
*****

```

CÓDIGO DO PROJETO: MESTRADO

RESPONSÁVEL: MANFREDO LUIZ LINS E SILVA

DELINEAMENTO EXPERIMENTAL: FATORIAL 3 x 3, I. CASUALIZADO

OBSERVAÇÕES NÃO TRANSFORMADAS

NOME DOS FATORES

FATOR NOME-----
A DENSIDADE
B T.A.D.S.

NOME DOS NÍVEIS DE DENSIDADE:
1 - ALTA; 2 - MÉDIA; 3 - BAIXA.NOME DO NÍVEIS DO T.A.D.S.:
1 - MÍNIMO; 2 - INTERMEDIÁRIO; 3 - MÁXIMO

QUADRO DA ANÁLISE DA VARIÂNCIA

FATORES	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
DENSIDADE AJUST.	2	14818.8551231	7409.4275616	26.3771	0.00001
T.A.D.S.	2	78779.4195736	39389.7097868	140.2251	0.00001
DEN*T.A.D.S. AJUST.	4	15526.3787291	3881.5946823	13.8183	0.00001
RESÍDUO	483	135676.3208538	280.9033558		
TOTAL	491	244800.9742797			

MÉDIA GERAL AJUSTADA = 31.212420

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO = 53.697 %

S.Q. DENSIDADE NÃO AJUSTADA = 4168.4264649

ANÁLISE DA VARIÂNCIA FIXANDO NÍVEIS

CAUSAS DA VARIAÇÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
DEN/T.A.D.S. 1	2	22961.8494789	11480.9247394	40.8714	0.00001
DEN/T.A.D.S. 2	2	6352.5883159	3176.2941579	11.3074	0.00001
DEN/T.A.D.S. 3	2	1030.7960575	515.3980288	1.8348	0.11973
T.A.D.S./DEN 1	2	43475.4227019	21737.7113509	77.3850	0.00001
T.A.D.S./DEN 2	2	55518.2812751	27759.1406376	98.8210	0.00001
T.A.D.S./DEN 3	2	5962.5229840	2981.2614920	10.6131	0.00001
RESÍDUO	483	135676.3208	280.9033558		

TESTE DE TUKEY PARA MÉDIAS DE DENSIDADE

NÚM.ORDEM	NÚM.TRAT.	NOME	NÚM.REPET.	MÉDIAS AJ.	MÉDIAS ORIG. AJ.	5%	1%
1	1	ALTA	235	38.968230	38.968230	a	A
2	2	MEDIA	155	30.796588	30.796588	b	B
3	3	BAIXA	102	23.872444	23.872444	c	C

MÉDIAS SEGUIDAS POR LETRAS DISTINTAS DIFEREM ENTRE SI AO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA INDICADO

TESTE DE TUKEY PARA MÉDIAS DE T.A.D.S.

NÚM.ORDEM	NÚM.TRAT.	NOME	NÚM.REPET.	MÉDIAS AJ.	MÉDIAS ORIG. AJ.	5%	1%
1	1	MÍNIMO	102	52.915296	52.915296	a	A
2	2	INTERME	200	26.243701	26.243701	b	B
3	3	MÁXIMO	190	19.020525	19.020525	c	C

MÉDIAS SEGUIDAS POR LETRAS DISTINTAS DIFEREM ENTRE SI AO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA INDICADO

TESTE DE TUKEY PARA MÉDIAS DE DENSIDADE
DENTRO DE MÍNIMO DO FATOR T.A.D.S.

NÚM.ORDEM	NÚM.TRAT.	NOME	NÚM.REPET.	MÉDIAS AJ.	MÉDIAS ORIG. AJ.	5%	1%
1	1	ALTA	20	74.156998	74.156998	a	A
2	2	MÉDIA	48	57.803333	57.803333	b	B
3	3	BAIXA	34	33.519417	33.519417	c	C

TESTE DE TUKEY PARA MÉDIAS DE DENSIDADE
DENTRO DE INTERMEDIÁRIO DO FATOR T.A.D.S.

NÚM.ORDEM	NÚM.TRAT.	NOME	NÚM.REPET.	MÉDIAS AJ.	MÉDIAS ORIG. AJ.	5%	1%
1	1	ALTA	144	29.477570	29.477570	a	A
2	3	BAIXA	20	23.524002	23.524002	ab	AB
3	2	MÉDIA	36	14.819168	14.819168	b	B

TESTE DE TUKEY PARA MÉDIAS DE DENSIDADE
DENTRO DE MÁXIMO DO FATOR T.A.D.S.

NÚM.ORDEM	NÚM.TRAT.	NOME	NÚM.REPET.	MÉDIAS AJ.	MÉDIAS ORIG. AJ.	5%	1%
1	1	ALTA	71	21.890982	21.890982	a	A
2	2	MÉDIA	71	18.049295	18.049295	a	A
3	3	BAIXA	48	16.211248	16.211248	a	A

TESTE DE TUKEY PARA MÉDIAS DE T.A.D.S.
DENTRO DE ALTA DO FATOR DENSIDADE

NÚM.ORDEM	NÚM.TRAT.	NOME	NÚM.REPET.	MÉDIAS AJ.	MÉDIAS ORIG. AJ.	5%	1%
1	1	MÍNIMO	20	74.156998	74.156998	a	A
2	2	INTERME	144	29.477570	29.477570	b	B
3	3	MÁXIMO	71	21.890982	21.890982	c	C

TESTE DE TUKEY PARA MÉDIAS DE T.A.D.S.
DENTRO DE MÉDIA DO FATOR DENSIDADE

NÚM.ORDEM	NÚM.TRAT.	NOME	NÚM.REPET.	MÉDIAS AJ.	MÉDIAS ORIG. AJ.	5%	1%
1	1	MÍNIMO	48	57.803333	57.803333	a	A
2	3	MÁXIMO	71	18.049295	18.049295	b	B
3	2	INTERME	36	14.819168	14.819168	b	B

TESTE DE TUKEY PARA MÉDIAS DE T.A.D.S.
DENTRO DE BAIXA DO FATOR DENSIDADE

NÚM.ORDEM	NÚM.TRAT.	NOME	NÚM.REPET.	MÉDIAS AJ.	MÉDIAS ORIG. AJ.	5%	1%
1	1	MÍNIMO	34	33.519417	33.519417	a	A
2	2	INTERME	20	23.524002	23.524002	ab	AB
3	3	MÁXIMO	48	16.211248	16.211248	b	B

Anexo X - Relatório de regressão múltipla gerado pelo SANEST.

```
*****
*      SANEST - SISTEMA DE ANÁLISE ESTATÍSTICA      *
*  Autores: Elio Paulo Zonta - Amauri Almeida Machado  *
*      FEAGRI - Faculdade de Eng. Agrícola - UNICAMP    *
*      REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA - ARQUIVO: REGRI      *
*****
```

CÓDIGO DO PROJETO: MESTRADO

RESPONSÁVEL: MANFREDO LUIZ LINS E SILVA

VARIÁVEIS NÃO TRANSFORMADAS

VARIÁVEL DEPENDENTE: ICONE

ANÁLISE SEQUENCIAL

QUADRO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA

CAUSAS DA VARIAÇÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
X 1	1	774.8162095	774.8162095	3.0214	0.08645
X 2 AJ.P/X 1	1	5321.3028447	5321.3028447	20.7504	0.00016
RESÍDUO	39	10001.3101260	256.4438494		
TOTAL	41	16097.	4291802		

VARIÁVEL	ESTIMADO	E.PADRAO	INTERV. CONF. 5%		INTERV. CONF. 1%	
			INF.	SUP.	INF.	SUP.
B 0 =	29.184524	2.4709929	24.1882	34.1809	22.5005	35.8686
X 1 = DENSID B 1 =	64.920043	37.3487088	-10.5990	140.4391	-36.1082	165.9483
X 2 = T.A.D.S. B 2 =	-3.580323	0.7859762	-5.1696	-1.9911	-5.7064	-1.4543

ANÁLISE PARCIAL DO MODELO $Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2$

QUADRO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA

CAUSAS DA VARIAÇÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
REGRESSÃO	2	6096.1190542	3048.0595271	11.8859	0.00022
RESÍDUO	39	10001.3101260	256.4438494		
TOTAL	41	16097.4291802			
COEF. DETERMINAÇÃO (R^2)			0.3787014		
COEF. CORRELAÇÃO (R)			0.6153872		

Anexo XI - Regressões simples dentro das faixas de T.A.D.S. e de densidade do solo.

REGRESSÕES SIMPLES COM VARIAÇÕES DE T.A.D.S. DENTRO DAS FAIXAS DE DENSIDADE						
MODELO	LINEAR			LOG.		
DENSIDADE	A	B	R	A	B	R
D. ALTA	-5,57	192,76	-0,6026	-162,87	579,36	-0,6140
D. MÉDIA	-4,24	149,65	-0,7241	-113,30	407,27	-0,7189
D. BAIXA	-1,63	69,54	-0,3813	-43,42	168,18	-0,3711
MODELO	EXP.			POT.		
DENSIDADE	A	B	R	A	B	R
D. ALTA	-0,14	1724,71	-0,5651	-4,17	33546028,51	-0,5741
D. MÉDIA	-0,12	798,32	-0,7088	-3,36	1704191,68	-0,7102
D. BAIXA	-0,04	60,20	0,3035	-1,04	612,71	-0,2864
REGRESSÕES SIMPLES COM VARIAÇÕES DE DENSIDADE DENTRO DAS FAIXAS DE T.A.D.S.						
MODELO	LINEAR			LOG.		
T.A.D.S.	A	B	R	A	B	R
T. MÁX.	45,54	-34,88	0,6623	52,56	10,24	0,6584
T. INT.	110,89	-109,67	0,4480	128,24	0,26	0,4338
T. MÍN.	274,49	-264,55	0,7294	323,99	6,34	0,7402
MODELO	EXP.			POT.		
T.A.D.S.	A	B	R	A	B	R
T. MÁX.	2,71	0,75	0,6699	3,15	10,92	0,6702
T. INT.	3,66	0,26	0,3986	4,21	9,92	0,3837
T. MÍN.	7,91	0,00	0,7426	9,37	11,23	0,7566

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, ASAE R313.1. St. Joseph, Michigan, EUA : Agricultural Engineers Yearbook os Standards, 2 p., 1978.
- AYERS, P. D., PERUMPRAL, J. V. Moisture and density effect on cone index. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, v. 25, n. 5, p. 1169-1172, 1982.
- BAILEY, A. C., JOHNSON, C. E., SCHAFER, R. L. A Model for Agricultural Soil Compaction. Journal of Agricultural Engineering Research, London, v. 33, p. 257-262, 1986.
- BALASTREIRE, L. A., AMARAL, J. R. Desenvolvimento e construção de um penetrógrafo eletrônico. Campinas, São Paulo : SBEA, 1994. 12 p., paper n. 94-4-281.
- BALASTREIRE, LUIZ ANTÔNIO. Máquinas Agrícolas. São Paulo : Manole, 1987. 310 p.
- CARTER, L. M. Portable recording penetrometer measures soil strength profiles. Agricultural Engineering, St. Joseph, MI, v. 46, n. 6, p. 348-349, 1967.
- GILL, W. R., BERG, G. E. V. Soil dynamics in tillage and traction. Whashington : U. S. Department of Agriculture, 1967. 511 p.
- GRISSE, R. D., JOHNSON, C. E., BAILEY, A. C. Soil Compaction by Continuous Deviatoric Stress. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, v. 30, n. 5, p. 1293-1301, 1987.

HENDRICK, J. G. Recording soil penetrometer. Journal of Agricultural Engineering Research, London, v.14, n. 2, p. 183-186, 1969.

HEWLETT PACKARD. HP 48 científica avançada - manual do proprietário. São Paulo : Edisa Informática S.A., 1991. v. 1. p. 464.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia. São Paulo : Ceres, 1979. 264 p.

KOOLEN, A. J., KUIPERS, H. Agricultural soil mechanics. Germany : Springer-Verlag, 1983. 243 p.

MANTOVANI, E. C. A soil surface traffic - corn yield model for a cerrado soil in brazil with less than 10 years of cultivation. West Lafayette : Purdue University, 1984. 148 p. Tese (Ph.D. em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade de Purdue, 1984.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. Inf. Agropec., Belo Horizonte, v. 13, p. 52- 55, Março 1987.

MANTOVANI, E. C., SANS L. M. A., RESENDE, M. Relação entre o teor de umidade e compactação do solo para diferentes classes de latossolos. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20, 1991, Londrina. Anais ... Londrina, PR : IAPAR e SBEA, 1991. 1681 p. p. 1384.

MCKYES, E. Soil cutting and tillage. Netherlands : Elsevier Science Publishers B. V., 1985. 216 p. Developments in Agricultural Engineering, vol. 7.

MCKYES, E. Agricultural engineering soil mechanics. Netherlands : Elsevier Science Publishers B. V., 1989. 292 p. Developments in Agricultural Engineering, vol. 10.

NOVAK, L. R., MANTOVANI, E. C., MARTYN, P. J., et al. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro Álico, em dois níveis de umidade. Pesq. Agropec. Bras., Brasília, v. 27, n. 12, p. 1587-1595, Dezembro 1992.

- OHU, J. O., RAGHAVAN, G. S. V., MCKYES, E. Cone index prediction of compacted soils analysis. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, v. 31, n. 2, p. 306-310, 1988.
- OHU, J. O., RAGHAVAN, G. S. V., PRASHER, S., MEHUY, G. Prediction of Water Retention Characteristics from Soil Compaction Data and Organic Matter Content. Journal of Agricultural Engineering Research, London, v.38, p. 27-35, 1987.
- PERUMPRAL, J. V. Cone penetrometer applications - A review. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, v. 30, n. 4, p. 939-944, 1987.
- PORTERFIELD, J. W., CARPENTER, T. G. Soil Compaction: An Index of Potential Compaction For Agricultural Tires. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, v. 29, n. 4, p. 917-922, 1986.
- PRATHER, O. C., HENDRICK, J. G., SCHAFER, R. L. An electronic hand-operated recording penetrometer. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, v. 13, n. 1, p. 385-386, 390, 1970.
- RAGHAVAN, G. S. V., OHU, J. O. Prediction of static equivalent pressure of Proctor compaction blows. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, v. 28, n. 5, p. 1398-1400, 1985.
- RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E., CHASSÉ, M. Effect of wheel slip on compaction. Journal of Agricultural Engineering Research, London, v.22, p. 79-83, 1977.
- RAGHAVAN, G. S. V., MCKYES, E., BEAULIEU, B. Clay soil compaction due wheel slip. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, v. 21, n. 4, p. 646-649, 653, 1978.
- REAVES, C. A., COOPER, A. W., KUMMER, F. A. Similitude in performance studies of soil-chisel systems. Amherst : ASAE, 1966. 4 p. Paper n. 66-125.
- SCHAFER, R. L., BAILEY, A. C., JOHNSON, C. E., RAPER, R. L. A Rationale for Modeling Soil Compaction Behavior an Engineering Mechanics Approach. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, v. 34, n. 4, p. 1609-1617, 1991.

SMITH, L. A., DUMAS, W. T. A recording soil penetrometer. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, v. 21, n. 1, p. 12-14, 19, 1978.

UHLAND, R. E. Physical properties of soil as modified by crops and management. SOIL SCI. SOC. AMER. PROC., Madison, W. I., v. 14, p. 361-366, 1949.

VARGAS, MILTON. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo : McGRAW-HILL, 1977. 509 p.

WILLIFORD, J. R., WOOTEN, O. B., FULGHAM, F. E. Tractor mounted field penetrometer. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, v. 15, n. 2, p. 226-227, 1972.

ZONTA, É. P., MACHADO, A. A. SANEST : Sistema de análise estatística para microcomputadores. [ca.1990]. 85 p. (Registrado na Secretaria Especial de Informática - SEI número 066060, categoria A).