

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM
PENETRÔMETRO ELÉTRICO-ELETRÔNICO PARA USO EM
TANQUES DE SOLO.**

FABRÍCIO LEITE

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

BOTUCATU – S.P.
JANEIRO - 2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM
PENETRÔMETRO ELÉTRICO-ELETRÔNICO PARA USO EM
TANQUES DE SOLO.**

FABRÍCIO LEITE

Orientador: Prof. Dr. João Eduardo Guarnetti dos Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Kleber Pereira Lanças

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

BOTUCATU – S.P.
JANEIRO - 2004

Aos meus pais e irmãos,
À Roberta, minha esposa,
ao Rodolfo, meu filho.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela fé sempre presente;

À Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA-UNESP), campus de Botucatu e a Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Energia na Agricultura, pela vaga concedida, apoio e atenção durante o curso de Mestrado;

Ao Professor Doutor João Eduardo Guarnetti dos Santos, pela brilhante orientação, compreensão e dedicação;

Ao Professor Doutor Kléber Pereira Lanças, do Departamento de Engenharia Rural da FCA-UNESP, pela co-orientação segura, atenção, sinceridade, amizade em todas as fases do curso, pelo espaço do Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agrícolas – NEMPA, laboratórios e pelos funcionários e estagiários cedidos;

Ao Pós-Doutorando Reginaldo Barbosa Silva, pela preciosa ajuda, atenção, amizade, críticas e sugestões;

Ao PICDT/CAPES, pela concessão da bolsa de estudos, a qual permitiu a manutenção e finalização deste trabalho;

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

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

Aos acadêmicos Alexandre Caldeira Rocateli e Mário Henrique Ferreira do Amaral Dal Pogetto, pela convivência, incentivo e pelos trabalhos executados na execução do experimento;

À todos os funcionários de Departamento de Engenharia Rural, pela amizade e serviços prestados;

À todos os colegas de curso;

Ao torneiro mecânico Masqueto Júnior, pelos serviços prestados na construção do equipamento;

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

À minha irmã Cristiane Leite Antunes e meu cunhado Ednei Antônio Antunes, que além das constantes ajudas, deram suporte durante a permanência em Botucatu;

Ao meu irmão João Batista Leite Júnior, pelo auxílio e amizade;

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

SUMÁRIO

	Página
Página de Rosto.	i
Lista de figuras.	VIII
Lista de quadros.	XII
1. RESUMO.	01
2. SUMMARY.	03
3. INTRODUÇÃO.	05
4. REVISÃO DE LITERATURA.	07
4.1 O uso do solo e as alterações das propriedades físicas e dinâmicas.	07
4.2 Tráfego de máquinas e a compactação do solo.	09
4.3 Efeito da compactação no crescimento das plantas.	12
4.4 Resistência do solo à penetração e índice de cone.	14
4.5 Utilização de Caixas de Solo na avaliação da compactação	20
4.6 Projeto de máquinas.	23
5. MATERIAL E MÉTODOS.	26
5.1 Material.	26
5.1.1 Solo.	26
5.1.2 Tanque de Solo.	26
5.1.3 Pneu.	27
5.1.4 Quadro de madeira.	27

5.1.5 Sistemas de aquisição de dados.	28
5.1.6 Prensa Hidráulica.	28
5.1.7 Penetrógrafo manual.	30
5.1.8 Material utilizado para construção do penetrômetro elétrico-eletrônico.	31
5.1.9 Cronômetro e trena de aço.	32
5.2 Métodos.	33
5.2.1 Preenchimento do tanque de solo.	33
5.2.2 Aplicação das forças normais ao solo.	35
5.2.3 Avaliação das linhas de resistência do solo à penetração.	35
5.2.4 Comparação entre os valores obtidos de resistência do solo à penetração do penetrômetro elétrico-eletrônico e do penetrógrafo manual.	36
5.2.5 Sistema de aquisição de dados (“micrologger”).	37
5.2.6 Calibração da célula de carga (força).	39
5.2.7 Sistematização e análise estatística dos dados ensaiados.	39
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.	40
6.1 Projeto e desenvolvimento do equipamento.	40
6.1.1 Cálculos desenvolvidos para dimensionamento da transmissão por corrente. .	40
6.1.2 Dimensionamento do pinhão da cremalheira de acionamento da haste de penetração.	43
6.1.3 Dimensionamento do pinhão da cremalheira do transdutor de profundidade. .	45
6.1.4 Memorial de cálculo da relação de transmissão do penetrômetro elétrico- eletrônico, força máxima do equipamento e resistência do solo à penetração máxima.	47

6.1.5 Croquis de projeto.	48
6.1.6 Penetrômetro Elétrico-Eletrônico.	58
6.1.7 Calibração dos sensores eletrônicos e do equipamento projetado.	62
6.2 Avaliação do Sistema projetado e análise dos parâmetros ensaiados.	63
6.2.1 Linhas de resistência do solo à penetração.	63
6.2.2 Comparação entre os valores de resistência do solo à penetração do penetrômetro elétrico-eletrônico e do penetrógrafo manual.	70
7. CONCLUSÕES.	74
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	75
APÊNDICE.	84

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
01 Características técnicas para Penetrômetro de Cone ASAE S313.2 (1997). . . .	16
02 Pneu Diagonal 23.1 – 30.	27
03 Sistema de aquisição de dados (micrologger) utilizado no experimento.	28
04 Desenho esquemático da Prensa Hidráulica desenvolvida por Santos (1999). .	29
05 Moto-redutor utilizado para acionamento do penetrômetro elétrico-eletrônico.	31
06 Esboço da área de contato do pneu/solo e os pontos amostrados no tanque de solo.	37
07 Instrumentação para coleta de dados.	38
08 Fluxograma simplificado do programa utilizado no sistema de aquisição de dados.	38
09 Relação de transmissão de penetrômetro elétrico-eletrônico.	47
10 Vista frontal do Penetrômetro Elétrico-Eletrônico (cotas em milímetros).	49
11 Vista lateral do Penetrômetro Elétrico-Eletrônico (cotas em milímetros).	50
12 Vista de fundo do Penetrômetro Elétrico-Eletrônico (cotas em milímetros) . . .	51
13 Detalhe A do transdutor de profundidade “Potenciômetro”(cotas em milímetros).	52
14 Vista superior do Penetrômetro Elétrico-Eletrônico (cotas em milímetros). . . .	53
15 Vista em perspectiva 45 ⁰ do trilho de fixação sobre o Tanque de Solo (cotas em milímetros).	54
16 Vista frontal do trilho de fixação sobre o tanque de solo (cotas em milímetros).	55
17 Detalhe B com vista em perspectiva cavaleira 45 ⁰ do trilho de fixação sobre o tanque de solo e polia (cotas em milímetros)	55
18 Vista em perspectiva 30 ⁰ da estrutura do Penetrômetro (cotas em milímetros).	56
19 Detalhe C com vista da polia e viga perfil C (cotas em milímetros).	57
20 Perspectiva cavaleira 45 ⁰ da chapa de aço dobrada nas pontas utilizada como base para fixação do sistema penetrômetro elétrico-eletrônico.	57

21	Vista frontal do Penetrômetro Elétrico-Eletrônico.	58
22	Moto-redutor utilizado para o acionamento de todo sistema.	59
23	Conjunto corrente, coroa e pinhão de redução para motocicleta utilizado no Penetrômetro Elétrico-Eletrônico.	59
24	Caixa redutora (3:1) utilizada no Penetrômetro Elétrico-Eletrônico.	60
25	Vista frontal da cremalheira-pinhão para acionamento da haste de penetração..	60
26	Transdutor de Força (célula de carga) e haste de penetração.	61
27	Transdutor de profundidade utilizado no Penetrômetro Elétrico-Eletrônico. ...	62
28	Curva de calibração da célula de carga de 5,0 kN.	63
29	Solo deformado pelo pneu agrícola diagonal através da Prensa Hidráulica. ...	64
30	Quadro de madeira utilizado na determinação das linhas de resistência do solo à penetração.	64
31	Determinação das linhas de resistência do solo à penetração.	65
32	Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 0,5 kN (Diagonal menor)	65
33	Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 0,5 kN (Diagonal maior)	66
34	Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 1,0 kN (Diagonal menor)	66
35	Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 1,0 kN (Diagonal maior)	67
36	Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 1,5 kN (Diagonal menor)	67
37	Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 1,5 kN (Diagonal maior)	68
38	Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 2,0 kN (Diagonal menor)	68
39	Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 2,0 kN (Diagonal maior).	69

40	Resistência do solo à penetração para o penetrômetro elétrico-eletrônico e para o penetrógrafo manual fora da área de contato do pneu/solo no tanque . . .	70
41	Resistência do solo à penetração para o penetrômetro elétrico-eletrônico e para o penetrógrafo manual dentro da área de contato do pneu/solo (fora da garra do pneu).	71
42	Resistência do solo à penetração para o penetrômetro elétrico-eletrônico e para o penetrógrafo manual dentro da área de contato do pneu/solo (dentro da garra do pneu).	72
43	Relação linear simples entre o penetrômetro elétrico-eletrônico e penetrógrafo manual.	73

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1 Análise do teor de água do solo após a determinação das linhas de resistência do solo à penetração (RLP) e após comparação entre o penetrômetro elétrico-eletrônico e penetrógrafo manual (CP)	35

1. RESUMO

A maioria dos penetrômetros e penetrógrafos utilizados no mundo e, principalmente no Brasil, são manuais, ou seja, o operador do equipamento fornece a força necessária para cravar o cone no solo. Esta operação, além de estar limitada ao esforço máximo que o operador pode fornecer, não garante a velocidade constante de penetração, faltando, portanto, sensibilidade para variar instantaneamente a força de recalque em função das variações naturais de resistência do solo ao longo do perfil avaliado.

Para que os dados obtidos com este tipo de equipamento sejam confiáveis, torna-se necessário a utilização de técnicos treinados e experientes. Quando são comparados resultados obtidos em diferentes localidades, há sempre a dúvida se os operadores trabalharam da mesma maneira nas diversas situações. Assim, de acordo com o exposto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um penetrômetro elétrico-eletrônico para a determinação da resistência do solo à penetração.

O sistema, composto por uma cremalheira (acionada por um conjunto moto-redutor elétrico), uma célula de carga, uma haste de aço contendo uma ponteira cônica de ângulo sólido de 30° (conforme norma ASAE S 313.2), é acionado por um motor elétrico, para obtenção da pressão necessária para cravar o cone na direção normal ao solo, à uma velocidade constante de acordo com ASAE S313.2. A velocidade constante de 1896 mm/min, independentemente da resistência do solo, foi obtida através da instalação de redutores e da cremalheira projetada.

A obtenção, registro e armazenamento dos dados de resistência do solo à penetração são realizados por um sistema eletrônico, formado pelos seguintes componentes: sensor de força (célula de carga), potenciômetro utilizado como sensor de profundidade, sistema de aquisição de dados (“microllogger”), sistema de armazenamento de dados, microcomputador e programa para análise dos dados ou planilha eletrônica.

A validação do equipamento, se deu através de ensaios realizados em tanque de solo do Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agrícolas (NEMPA) situado na Faculdade de Ciências Agronômicas UNESP-Botucatu, cujo solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico. Dados com o penetrômetro elétrico-eletrônico e com o penetrógrafo manual SC – 60 foram obtidos e comparados, cujo solo estava com teor de água em torno de $0,103 \text{ kg.kg}^{-1}$ e na determinação das linhas de resistência do solo à penetração o teor de água no solo foi aproximadamente de $0,123 \text{ kg.kg}^{-1}$.

Os dados obtidos pelo penetrômetro elétrico-eletrônico permitiram concluir que houve sensibilidade do aparelho para diferenciar os teores de água do solo, sob a mesma densidade, sendo a resistência do solo à penetração de 1784,5 kPa e 2944,96 kPa para os teores de água de $0,123 \text{ kg.kg}^{-1}$ e $0,103 \text{ kg.kg}^{-1}$, respectivamente.

A correlação de Pearson entre o penetrômetro elétrico-eletrônico e penetrógrafo manual SC 60 foi positiva e significativa ao nível de 1% de probabilidade, sendo o coeficiente de correlação de 93,8%.

O penetrômetro elétrico-eletrônico operou de maneira satisfatória e rápida (entre 16 e 19 segundos por amostra), não apresentando problemas mecânicos, elétricos ou eletrônicos tanto na aquisição como no manuseio dos dados.

PROJECT, DEVELOPMENT AND EVALUATION OF AN ELECTRIC-ELECTRONIC PENETROMETER FOR USE IN SOIL TANKS. Botucatu, 2004. 88p.

Dissertação (Mestrado Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: FABRÍCIO LEITE

Adviser: JOÃO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS

2. SUMMARY

The great majority of penetrometers and penetrographers used in the world and, mainly in Brazil, they are manual, in other words, the operator of the equipment supplies the necessary force to nail the cone in the soil. This operation, besides being limited to the maximum effort that a person can supply, doesn't guarantee the constant speed of penetration, being difficult that the operator is enough sensitive to vary the force instantly of it presses down in function of the natural variations of resistance of the soil along the wanted profile.

So that the lifted up data with this equipment type are more reliable, he/she becomes necessary the trained technicians' use and experts. When results are compared obtained at different places, it is been in doubt if the operators worked in the same way in the several situations.

The present work had as objective develops an electric-electronic penetrometer for the determination of the resistance of the soil to the penetration.

The system, composed by a pothook and chain (worked by a group electric motorcycle-reducer), a load cell, a stem of steel containing a conical ferrule of solid angle of 30° (according to norm ASAE S 313.2), it is worked by an electric motor, for obtaining of the necessary pressure to nail the cone in the normal direction (perpendicular) to the soil, according to demand of the norm. The constant speed of 1896 mm/min, independently of the resistance of the soil, it is obtained through the installation of reducers and of the pothook and chain.

The obtaining, registration and storage of the resistance data to the penetration of the soil are accomplished by an electronic system, formed by the following

components: sensor of force (load cell), potenciometers used as sensor of depth, system of acquisition of data (microllogger "), system of storage of data, microcomputer and its programs for analysis of the data or electronic spreadsheet.

The registration of the data in the " microllogger " is made in way automatic, instantaneous and simultaneous.

To validate the equipment, a rehearsal it was installed in Agricultural Machinery and Tire Testing Center (NEMPA), using a soil of Experimental Farm of Lageado, classified like Latossolo Vermelho distrófico, in soil tank. Data with the electric-electronic penetrometer and with the manual penetrometer SC - 60 were obtained and compared in dry soil and humid soil was used for the determination of the resistance lines of the soil to the penetration.

The data obtained by the electric-electronic penetrometer they allowed to end that there was enough sensibility of the apparel to differentiate the moisture content of the soil, under the same density, being the resistance of the soil to the penetration for the tenors of water of 0,123 kg.kg⁻¹ and 0,103 kg.kg⁻¹ of 1784,5 kPa and 2944,96 kPa, respectively, for the same soil.

There was a correlation among the results obtained by the electric-electronic penetrometer and the manual penetrometer, and the first presented larger values in all the situations. The correlation of Pearson between the electric-electronic penetrometer and manual penetrometer SC 60 was positive and significant at the level of 1% of probability, being the coefficient of correlation of 93,8%.

The electric-electronic penetrometer operated in a satisfactory and fast way (among 16 and 19 s for sample), not presenting problems mechanical, electric or electronic in the acquisition and in the handling of the data.

Keywords: Penetrometer, resistance of the soil to the penetration, compaction

3. INTRODUÇÃO

Em 1960, com o início da produção nacional de tratores, o Brasil produziu 37 tratores de rodas enquanto a frota era de 62684 tratores. No ano de 1999 o país produziu 20911 tratores sendo a frota estimada de 460000 tratores de rodas (NAGAOKA, 2001). Enquanto que a população do Brasil em 1970 era em torno de 90 milhões de habitantes, em 2003 esta população é estimada aproximadamente em 160 milhões de habitantes. Com estes dados, a demanda na produção agrícola aumentou muito nas últimas décadas, intensificando a busca de tratores agrícolas mais modernos, potentes e de melhor tração. Consequentemente, esta busca resultou em tratores mais pesados para poderem desenvolver melhor tração. No entanto, tratores mais pesados consequentemente causaram o problema de compactação no solo, tão indesejável para os produtores agrícolas. Deu-se, então, a procura por pneus de melhor tração e menor dano às propriedades físicas do solo, como os pneus de baixa pressão e alta flutuação, apesar da maioria dos pneus agrícolas no Brasil serem do tipo diagonal e radial. Devido à sua conformação, os pneus do tipo diagonal e radial são os que causam maiores alterações nas propriedades físicas do solo, gerando compactação nas camadas internas do mesmo.

A compactação do solo tem chamado muito a atenção dos pesquisadores, pois com ela a penetração das raízes em profundidade em busca de água e nutrientes fica difícil. Para avaliar a compactação dos solos, adaptou-se um equipamento, desenvolvido para outras finalidades, para simular a penetração das raízes no solo, chamado de penetrômetro.

Apesar de sua facilidade operacional, a utilização de penetrômetros ou penetrógrafos manuais, além de estar limitada ao esforço máximo que uma pessoa pode

fornecer, não garante velocidade constante de penetração, pois dificilmente o operador terá sensibilidade suficiente para variar instantaneamente a força aplicada em função das variações naturais de resistência do solo ao longo do perfil desejado, como densidade e teor de água. Com estas variações, a avaliação da resistência do solo à penetração em uma única área agrícola fica comprometida, devido à variação espacial de tipo de solo e condições do mesmo. Porque constantemente é feita de maneira aleatória, gerando uma média geral de resistência do solo à penetração na mesma área, podendo, assim, trazer prejuízos ao produtor como, consumo de combustível, ao descompactar áreas não totalmente compactadas.

Com isto, a utilização de tanques de solo no estudo da interação pneu, solo e resistência do solo à penetração, são cada vez maiores. Porque os tanques de solo permitem o controle das características físicas do solo e fornece condições homogêneas ao longo do seu perfil como o teor de água e densidade do solo. A avaliação da resistência à penetração em tanques de solo, é feita por meio de penetrômetros manuais, devido a sua facilidade operacional. Mesmo com esta facilidade operacional, penetrômetros manuais não garantem velocidade constante de penetração, portanto, o objetivo deste trabalho foi projetar e desenvolver um penetrômetro elétrico-eletrônico que fornecesse uma velocidade constante de penetração, não necessitando da intervenção do operador, proporcionando maior praticidade e rapidez na coleta dos dados.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. O Uso do Solo e as Alterações das Propriedades Físicas e Dinâmicas

A alteração das propriedades físicas do solo, pelo uso contínuo de máquinas, tem despertado a atenção de muitos pesquisadores, pois, com o passar dos anos, os solos intensamente cultivados vêm apresentando problemas de erosão hídrica e redução de produtividade, mesmo com aplicações de adubação e calagem recomendadas (SILVA, 1981).

De acordo com Dias Júnior (1996), a compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica, diminuindo a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros, principalmente no volume dos macroporos, enquanto os microporos permanecem teoricamente inalterados.

Segundo Harris citado por Maziero (1993), o solo pode ser descrito em termos de um esqueleto de partículas sólidas que variam de uma turfa orgânica até um cascalho, e que envolve vazios os quais deverão ser preenchidos por gás e líquido. Comenta, ainda o autor que quando o solo está sujeito a uma carga capaz de causar a variação de volume e esta mudança pode ser atribuída a quatro fatores:

- compressão das partículas sólidas
- compressão do líquido e gás dentro dos espaços porosos
- mudança do conteúdo de líquido e gás dentro dos espaços porosos
- rearranjo das partículas do solo.

De acordo com Maziero (1993) a compactação de um solo é definida como a diminuição do volume de uma determinada massa desse solo, provocado pelo rearranjo de suas partículas.

Akram & Kemper (1979) estudando cargas compactantes e teores de água nos solos, através de medidas da taxa de infiltração, redução de volume e densidade global, verificaram que a máxima compactação ocorre quando o solo está com seu teor de água próximo à capacidade de campo.

Beltrame et al. (1981) observaram que ocorre uma redução gradual na condutividade hidráulica com o aumento da densidade aparente do solo, sendo os reflexos maiores em um solo argiloso do que em um solo arenoso. Verificaram, ainda, que em camadas compactadas subsuperficiais a condutividade hidráulica saturada foi reduzida a 1/5 do seu valor inicial.

Rosenberg & Willits (1962) verificaram que em um solo arenoso o aumento da densidade aparente de 1,3 para 1,5 g.cm⁻³ melhorou a produção do feijoeiro, por causa da maior disponibilidade de água, porém em solo limo argiloso pequenos acréscimos na densidade aparente diminuíram a produção, em virtude de problemas com a difusão de oxigênio.

Novak (1989) estudou o 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. O autor concluiu que a umidade em torno de 33% (-0,06 MPa) é mais favorável à compactação do que em torno da umidade de 30% (-0,18 MPa).

Souza et al. (2003), com o objetivo de avaliar as modificações do movimento de água de um Latossolo Vermelho distrófico em função de diferentes manejos, verificou que o cultivo mínimo revelou-se como o sistema de manejo com melhores resultados, mostrando maior capacidade de infiltração de água no solo (264 mm.h⁻¹) e menor resistência do solo à penetração (1,30 MPa para a camada de 0-10 cm e 1,93 MPa para a camada de 10-20 cm), quando comparado ao sistema de vegetação natural (capacidade de infiltração de água no solo 330 mm.h⁻¹ e resistência do solo à penetração para as camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, 1,27 MPa e 1,71 MPa, respectivamente). Dentre os sistemas de usos e manejos estudados, o sistema com seringueira apresentou menor capacidade de infiltração da

água no solo (162 mm.h^{-1}) e maior resistência do solo à penetração (2,00 MPa para a camada de 0-10 cm e 3,21 MPa para a camada de 10-20 cm), em relação à vegetação natural.

Orlando et al. (1998) analisaram a uniformidade dos valores de índice de cone para cinco distintos teores de água do solo (25%, 30%, 35%, 40% e 45%), bem como o comportamento deste com o aumento da umidade do solo. O solo estudado foi um Podzólico Vermelho Amarelo fase terraço, de textura argilosa a muito argilosa, com densidade em média de $1,25 \text{ g/cm}^3$. Na análise dos dados verificou-se que as maiores médias dos valores de Índice de Cone ocorreram para os menores teores de água do solo, tendendo a um decréscimo linear com o aumento da umidade do solo, porém, apesar de não apresentar diferenças significativas. O Coeficiente de Variação (CV) dos dados apresentou valores inferiores a 40%, assim podemos considerar o solo como homogêneo. A maior homogeneidade dos dados de Índice de Cone ocorreu na faixa de umidade de 35%, o mesmo sendo observado pelo Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), devido provavelmente a estes valores de teor de água estarem na faixa de friabilidade do solo.

Thimoteo et al. (2001) avaliaram a compactação, através da densidade e resistência à penetração, em Latossolo Vermelho cultivado com milho, soja e mandioca nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (SC). Uma área de mata (MT) foi usada como testemunha. Na comparação dos resultados dos dois sistemas de cultivo com a mata, o PD apresentou os maiores valores de densidade ($D_s = 1,8 \text{ kg.dm}^{-3}$) e resistência à penetração ($RP = 12,45 \text{ MPa}$), quando comparados com o SC ($D_s = 1,77 \text{ kg.dm}^{-3}$ e $RP = 7,10 \text{ MPa}$) e a mata ($D_s = 1,70 \text{ kg.dm}^{-3}$ e $RP = 2,85 \text{ MPa}$).

4.2. Tráfego de Máquinas e a Compactação do Solo

De acordo com Cohron citado por Maziero (1993) as máquinas agrícolas tornaram-se inquestionavelmente a fonte primária de forças de compactação dos solos agrícolas. O aumento do peso dos tratores fez com que houvesse um aumento do tamanho dos pneus, num esforço de manter constante a pressão normal de contato do pneu com o solo.

O fenômeno da compactação pode ser avaliado sob dois pontos de vista: estático e dinâmico. Segundo Gill & Vanden Berg (1967), uma característica dinâmica

do solo é aquela que se revela como resposta à aplicação de uma força enquanto que uma característica estática independe desse fator. Portanto, na avaliação da compactação poderá utilizar como critério de medida a resistência oferecida à penetração como resposta à ação de uma força ou, a relação entre massa e volume. Horn et al. (1995) acrescentam que não somente a pressão estática (tensão normal) causa compactação, mas também forças dinâmicas causadas pela vibração do trator arrastando implementos e pelo patinamento.

Conforme Chancellor citado por Lanças (1996) a compactação do solo pode ser causada por diversos fatores, tais como as causas naturais de formação do solo que produzem camadas adensadas (Mech e Free, 1967) também citados por Lanças (1996), comentam que o pastoreio de animais, contração natural de alguns tipos de solo durante o processo de perda de água e, finalmente, a mais importante e principal causa da compactação de solos agrícolas na atualidade é a resposta do solo às pressões e deformações impostas por rodados e ferramentas de máquinas agrícolas e veículos florestais. Essas pressões exercidas na superfície do solo dependem do tipo de rodado e das características da superfície do solo. A distribuição de tensões dentro do solo é função do modelo das pressões na superfície do solo e das características físicas do solo.

Silveira citado por Novak (1989) menciona que a compactação pode ser natural ou artificial. Será natural se for formada por processos pedogenéticos e artificial, quando formada por máquinas usadas no preparo do solo, cultivo e também no transporte. O autor explica, ainda, que quando o preparo do solo é feito ano após ano, a uma mesma profundidade ocorre formação progressiva de uma camada mais compacta na profundidade de operação dos implementos, que é chamada de “pé-de-arado” ou “pé-de-grade”, pois é causada pelos discos do arado ou da grade ao passarem frequentemente no solo (ângulo de ataque dos discos).

De acordo com Maziero (1993), o tráfego de pneus em solos agrícolas difere radicalmente do tráfego em rodovias. Somente em circunstâncias excepcionais, o solo agrícola apresenta resistência à cargas aplicadas por pneus sem exceder o limite elástico e deformar-se permanentemente. A forma e a extensão dessas deformações dependem, sobretudo, das propriedades físicas do solo e do pneu. O autor ainda comenta que, em estudos da compactação do solo induzidas por patinagem da roda motriz de um trator agrícola que, colocando-se a compactação inicial do solo como nível de referência, e fazendo-se a

comparação dos incrementos relativos observados no índice de cone, verifica-se um aumento progressivo do efeito compactante com o aumento da patinagem. O autor acrescenta que, o aumento de carga no rodado propulsor em razão do aumento de carga na barra de tração aparentemente não influencia na compactação causada pelos diversos tratamentos, visto que teoricamente a pressão causada sobre o solo manteve-se praticamente igual entre eles.

Maziero et al. (1997) comentam que, o tipo de construção do pneu também pode determinar maior ou menor compactação do solo. Os pneus radiais, devido à disposição das lonas, tornam os flancos mais flexíveis, por isso obtêm maior área de contato que o pneu de construção diagonal.

Os mesmos autores estudaram a influência da patinagem dos pneus na compactação de um solo com textura franco, utilizando pneu Pirelli 18.4-33, R1, 10 lonas, com pressão de inflação de 125 kPa. Avaliou-se a compactação do solo pelo índice de cone com quatro níveis de patinagem, 0, 10, 20 e 30%. Os resultados apresentaram aumentos percentuais do índice de cone de 19,2; 22,0 e 31,9%, respectivamente para com os aumentos 10, 20 e 30% de patinagens, com maior influência da patinagem até a profundidade de 50 cm.

Raper et al. (1995) estudaram o comportamento do pneu radial 18.4 R 34, R1, medindo a pressão exercida ao solo, combinando 4 níveis de carga e pressão de inflação no pneu. Os resultados obtidos pelos autores permitiram verificar que com o aumento da pressão de inflação, a pressão de contato pneu-solo aumentou ao centro do rasto do pneu enquanto para as bordas do rasto não alteram significativamente. O aumento da pressão no centro do pneu, são transferidos para o solo aumentando a compactação, observados pela medição do índice de cone. O pneu inflado corretamente otimiza a tração líquida e eficiência tratória

Bailey et al. (1992) estudaram o desempenho de um pneu 18.4 R 38 R1, desenvolvendo uma velocidade de deslocamento de 0,15 m/s e patinagem de 10% combinando 3 níveis de carga e pressão de inflação. Foram instalados transdutores de pressão em 2 profundidades ao solo, na linha de deslocamento do pneu, com dois níveis de compactação do solo. Os resultados mostraram que a compactação do solo foi afetada significativamente pela carga em ambos os solos e na profundidade, enquanto que a pressão de inflação foi significativa somente para o solo arenoso.

Lanças et al. (1995) estudaram os efeitos de pneus radiais em rodagem dupla 20.8 R 48 em ambos eixos de tração em condições de campo com trator 4X4, para duas estações do ano (primavera e verão) em solo da Califórnia (EUA). Os testes realizados na primavera, foi realizado em um solo relativamente seco denominado Capay clay em um campo de arroz localizado em Woodland (EUA). Os testes realizados no verão, foram realizados em um solo denominado Ricon silt clay/yolo silt loan na Universidade de Davis-Califórnia. Os resultados mostraram que, com pressão correta/baixa ocorreram menor consumo de combustível, menor compactação do solo, maior desempenho operacional e maior capacidade de campo. A pressão de inflação reduzida tem sido recomendados pelos fabricantes de pneus agrícolas.

Munson et al. (1994) estudaram a compactação do solo utilizando um pneu 18.4 R 38, desenvolvendo uma velocidade de 8 km/h, impondo duas cargas (8054 kg e 5400 kg) e 3 níveis de pressão de inflação (165; 106,5 e 48 kPa) no eixo traseiro com 8% de patinagem. Os resultados indicaram que com a redução na pressão de inflação a compactação do solo pode ser minimizada significativamente.

Segundo Fernandes et al. (1998), em um trabalho cujo objetivo foi avaliar a compactação do solo causado pelo conjunto trator de pneus- guincho arrastador, antes e após da retirada de madeira da floresta, que para a resistência do solo à penetração os incrementos foram altos depois da passada e a maior diferença foi obtida na faixa de 0-15 cm (0,97 MPa).

4.3. Efeito da Compactação no Crescimento de Plantas

Toda compactação provoca, em grau menor ou maior, uma diminuição do tamanho dos poros e isto certamente irá afetar o desenvolvimento das raízes, (MAZIERO, 1993).

Pesquisadores sugerem que a densidade do solo não é o fator mais limitante ao crescimento radicular, mas sim a resistência que o solo oferece ao crescimento das raízes, podendo ser determinada por um penetrômetro (VOORHEES, 1983).

Taylor & Ratliff (1969) estudando a taxa de alongamento radicular em plantas de amendoim e algodão, em função da resistência do solo, mostraram que a taxa de

alongamento diminui com a resistência do solo em torno da raiz, e que, um acréscimo da resistência do solo à penetração de 0 para 10 kg.cm⁻² reduziu a taxa de alongamento da raiz do algodão em 62%, enquanto que para o amendoim foi em apenas 29%. Para uma resistência do solo à penetração de 5 a 30 kg.cm⁻², o alongamento da raiz de amendoim foi de 2,3 e 0,8 mm.h⁻¹, respectivamente.

Ortolani et al. (1982) mostram que a compactação além de diminuir significativamente a produtividade de grãos de soja, diminui a altura média das plantas.

Mantovani (1984) comenta que nem sempre a compactação provocada pelo cultivo frequente do solo é prejudicial ao desenvolvimento das plantas, pois em solos excessivamente porosos esse tipo de compactação modifica para melhor a retenção de água, a permeabilidade e a relação ar/água do sistema poroso.

Segundo Camargo & Alleoni (1997), as raízes penetram os solos crescendo através dos poros ou removendo partículas do caminho que elas criam. Quando encontram um poro no solo cujo diâmetro é menor do que o seu, só prosseguirá expandindo se for capaz de exercer pressão suficiente para dilatar os poros ou, então, terá que diminuir seu diâmetro o suficiente para passar através dele (na realidade, parece que o diâmetro da raiz aumenta em vez de diminuir, quando encontra tais obstáculos). O balanço de forças externas e internas é responsável pelo crescimento radicular e a raiz pode exercer pressões de até 0,9 a 1,13 MPa contra as paredes dos poros do solo. O que interessa, entretanto, não é a pressão máxima que a raiz pode exercer e sim qual a pressão imposta pelo meio que reduz consideravelmente a elongação radicular. Quanto a isto, há poucas informações, podendo-se dizer, entretanto, que à pressão entre 20 kPa a 50 kPa a elongação radicular é bem diminuída, apesar de haver diferenças entre espécies de plantas.

Se houver obstáculo apenas à raiz principal, proliferam-se as laterais, formando uma configuração de sistema radicular muito denso e raso que, em condições de campo, dificilmente sobrevive a um período de seca (Camargo & Alleoni, 1997).

Klein et al (1998) analisando a resistência do solo à penetração sob diferentes condições de umidade em um Latossolo Roxo, o qual as amostras foram submetidas a diferentes tensões (8, 50, 100 e 500 KPa). Os autores concluíram que, em relação à resistência limitante ao crescimento do sistema radicular, observou-se que já na tensão de 50 kPa, ocorreram valores superiores a 2 MPa nas camadas com densidade mais elevada. Neste

sentido, a resistência à penetração, determinada sob condições de umidade controlada, assume papel muito importante, pois deverá ser considerada para a determinação da água disponível às plantas. Em relação á recomendação de se efetuar a determinação no campo, próximo à capacidade de campo, a qual para este solo, corresponde a umidade na tensão de 0,08 bar, os valores de resistência não são limitantes ao crescimento do sistema radicular e a variação nos valores, apesar de acompanharem a variação da densidade do solo, é muito menor do que nas outras condições de umidade. Neste sentido, em uma situação de campo, a condição de capacidade de campo é mantida apenas por um curto período de tempo e conforme o solo vai secando é que a resistência passa a ser limitante, devendo-se, preferencialmente, fazer então a determinação.

Beutler et al (2003), verificaram em um trabalho, cujo objetivo foi avaliar a produção de soja (*Glycine Max* cv. EMBRAPA 48) em função do teor de água e da compactação do solo, que o nível crítico de resistência do solo à penetração, em relação à produção de grãos, foi de 1,66 e 2,22 MPa em um solo classificado como Latossolo Vermelho de textura média (Lvd) e 3,05 e 2,81 MPa no Latossolo Vermelho textura argilosa (Lvef), para o conteúdo de água retida na tensão de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. A maior produção de grãos foi obtida na tensão de 0,01 MPa. Os autores verificaram que a produção de grãos de soja foi afetada em níveis críticos de resistência do solo à penetração superiores a 2 MPa em latossolos com conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa.

4.4. Resistência do solo à penetração e índice de cone

Segundo Balastreire (1990), na representação de qualquer propriedade dinâmica do solo, o primeiro elemento a ser determinado é o modelo matemático que representa seu comportamento. O comportamento observado com penetração, ocorre quando sondas são pressionadas ou movidas no solo. Dependendo do tipo e forma do instrumento utilizado, corte ou separação, fratura por cisalhamento, fratura por atrito, por compressão ou mesmo “fratura plástica”, ou qualquer combinação destas, pode ocorrer quando o instrumento é forçado no solo. A resistência do solo, que é uma combinação das possíveis fraturas, obviamente é um parâmetro composto.

Ainda o mesmo autor, diz que, os modelos matemáticos utilizados para representar o comportamento durante a penetração no solo geralmente são dois: 1. a força requerida para causar penetração em termos de uma magnitude ou área unitária; 2. a energia requerida para causar penetração.

Os penetrômetros utilizados na determinação da resistência à penetração são basicamente de dois tipos: de impacto e estático. A maioria dos penetrômetros são do tipo estático, por serem mais simples que os de impacto (BALASTREIRE, 1990).

Um penetrômetro do tipo estático se constitui basicamente de uma sonda, geralmente cônica, que é introduzida lentamente no solo através de uma haste graduada. Na parte superior da haste existe um indicador da carga necessária para a penetração. A média das leituras efetuadas pelo penetrômetro cônico, transformadas em kgf/cm^2 , é chamada Índice de Cone e é utilizada na construção de gráficos. O Índice de Cone é obtido segundo uma recomendação padrão denominada ASAE R313, onde a força por unidade de área é obtida a uma velocidade uniforme de penetração de 1829 mm por minuto, com leituras a intervalos de 50 mm de penetração, utilizando-se um cone de 20,27 mm de diâmetro na base para solos macios, e 12,83 mm para solos duros. A recomendação é que a haste de suporte deve ter um diâmetro de 15,9 mm e 9,5 mm respectivamente, para solos macios e duros (BALASTREIRE, 1990). A Figura 1 demonstra melhor, as características técnicas para um penetrômetro de cone.

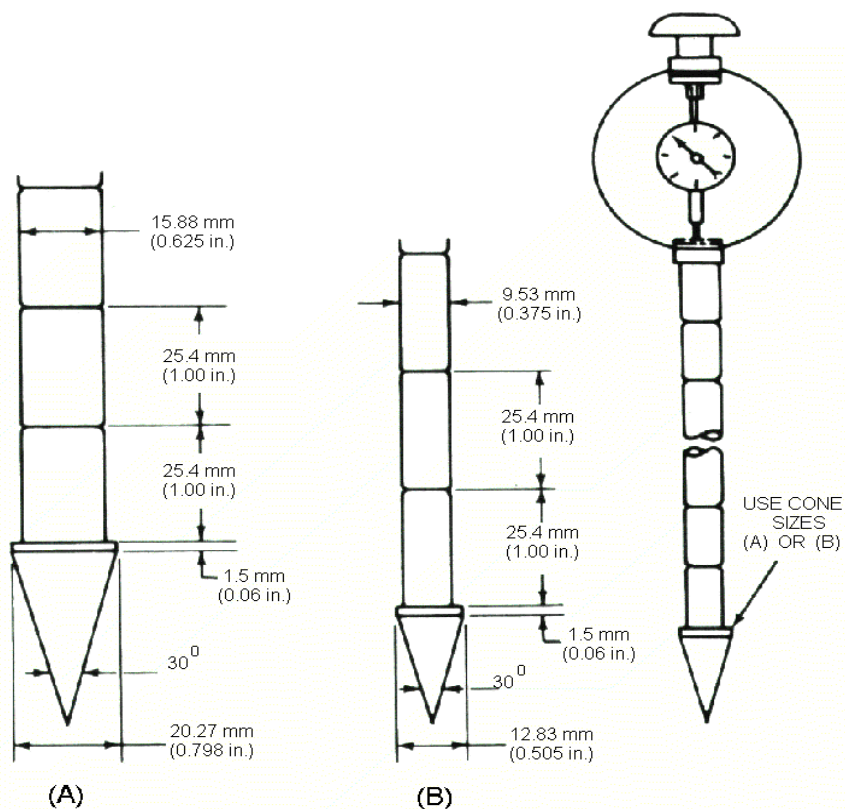


FIGURA 1 - Características técnicas para Penetrômetro de Cone ASAE S313.2 (1997)

Segundo Camargo (1983) alguns itens que devem ser observados, pois poderão evitar problemas com o uso do penetrômetro:

- a umidade do solo pode mascarar diferenças de densidade;
- a resistência do solo à penetração é influenciada pela textura;
- o uso do penetrômetro para medida de compactação do solo é limitado a medidas feitas para o mesmo solo à mesma umidade;
- a maioria dos penetrômetros tem diâmetro maior do que as porções das raízes que estão se alongando;
- a ponta das raízes têm normalmente camadas de mucilagem que reduzem o coeficiente de fricção na superfície de contato com o solo comparado ao do penetrômetro;
- a raiz se deforma facilmente enquanto a ponta do penetrômetro é rígida;
- deve-se tomar cuidado ao usar o penetrômetro em solos pedregosos;
- penetrômetros diferentes, em solos iguais, dão medidas diferentes da resistência do solo.

Voorhees et al. (1978) estudando o tráfego controlado em um solo barro limo argiloso, comparou as técnicas da resistência ao cone e densidade do solo durante cinco anos. Os autores consideram que a resistência do solo à penetração é uma indicação mais sensível da compactação que a densidade do solo. Citam também que onde os valores de densidade do solo tiveram um aumento de 20% ou menos devido ao tráfego, os valores de resistência ao penetrômetro aumentaram mais de 400%.

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

Porém, apesar das limitações, a resistência do solo à penetração é frequentemente usada para a indicação comparativa da compactação em solos de mesmo tipo e mesmo teor de água, devido à facilidade, rapidez e baixo custo com que numerosas medidas podem ser realizadas e, posteriormente, analisadas. Além disso, o penetrômetro se constitui em uma boa ferramenta para investigar solos arenosos, nos quais a obtenção de amostras inderformadas se constitui em uma tarefa muito difícil (CASTRO NETO, 2001).

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

De acordo com Lanças (2000b), é possível realizar comparações da resistência do solo à penetração em mesmo local, mas em épocas diferentes, porém com o solo na mesma condição de teor de água, tal como na avaliação da evolução da compactação num mesmo local ao longo do tempo. O autor comenta que a utilização de penetrômetros ou penetrógrafos manuais, além de estar limitada ao esforço máximo que uma pessoa pode fornecer, não garante velocidade constante de penetração, pois dificilmente o operador terá sensibilidade o suficiente para variar instantaneamente a força aplicada em função das variações naturais da resistência mecânica do solo ao longo do perfil desejado.

O índice de cone de 2,0 MPa foi considerado impeditivo para o crescimento de raízes no solo por Tormena e Roloff, citados por Souza & Alves (2000), sendo que, conforme comentam os autores, a literatura indica que um índice de cone abaixo deste valor já é prejudicial para o desenvolvimento de raízes no solo. Por outro lado, Castro Neto (2001) comenta que, deve-se lembrar que os valores de índice de cone sem a informação do tipo de solo e do teor de água no qual a determinação tenha sido realizada não são possíveis de comparação.

Segundo Taylor et al. (1966), a resistência à penetração de 20 kg/cm² é considerada como índice do limite inferior para o solo ser tido como compactado.

Fernandes (1996) realizou uma pesquisa com máquinas de exploração florestal com a finalidade de avaliar a compactação do solo causado pelo tráfego e determinar os dias potencialmente úteis para o trabalho. Utilizando-se um penetrógrafo manual para obter os dados de compactação do solo, o autor avaliou as diferenças entre a resistência à penetração pela fórmula:

$$y = D - A \quad \text{em que:} \quad (1)$$

y = Diferença entre as resistências (MPa)

D = Resistência do solo à penetração depois do tráfego (MPa)

A = Resistência do solo à penetração antes do tráfego (MPa)

O autor verificou, ainda, que o maior incremento da resistência do solo à penetração devido ao tráfego das máquinas pesquisadas ocorreu para a profundidade de 0 a 15 cm.

Ferreira (1998) pesquisou a compactação do solo por tráfego de máquinas de colheita florestal e concluiu que a resistência à penetração do solo foi maior para profundidade entre 5 a 15 cm e que ocorreu um incremento de aproximadamente 55% na resistência à penetração do solo entre a fase pré-colheita e pós-colheita, variando de 1075,2 kPa para 1666,4 kPa respectivamente.

De acordo com Nagaoka (2001), no desenvolvimento e avaliação do desempenho de um equipamento para ensaio dinâmico de rodado agrícola individual, o tipo de pneu utilizado, apresentou influência significativa na compactação do solo, mostrando que na média dos valores obtidos, o índice de cone com o pneu diagonal (23.1-30) (2510 kPa) foi maior do que o pneu radial (23.1-R 30) (2380 kPa). Todas as cargas utilizadas no experimento

modificaram a condição inicial do solo, sendo que as cargas mais elevadas (19000 N e 16000 N) provocaram maiores valores de índice de cone e seus incrementos. As camadas do solo de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm sofreram maiores incrementos no índice cone. Os tratamentos que utilizaram pneu radial com carga de 16000 N causaram os maiores incrementos do índice de cone do solo.

Silva et al. (2000), em uma pesquisa sobre a resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora de grãos em dois sistemas de manejo do solo (Plantio Direto e Preparo Reduzido do Solo) e duas condições de umidade do solo (seco e úmido), concluíram que as diferenças de resistência à penetração entre os sistemas de manejo do solo e onde foi trafegado com a colhedora são maiores quando o solo está mais seco. Com maiores conteúdos de água no solo, a resistência mecânica à penetração foi baixa (menor que 2 MPa) entre os diferentes tratamentos, não limitando o crescimento radicular. O efeito da diminuição da resistência do solo pelo preparo pode ser anulado por única passagem do pneu da colhedora. O sistema de plantio direto apresenta maiores valores de resistência do solo à penetração e maior estado de compactação, especialmente na camada de 7,5 a 17,0 cm. A maior resistência mecânica do solo à penetração não reduziu a produtividade da soja, permanecendo em torno de 3,15 ton.ha⁻¹.

Reis et al. (1998), realizaram um estudo em busca de conhecer a variabilidade espacial de valores de índice de cone (IC) numa área experimental de planossolo. Para tanto, locou-se aleatoriamente na área seis transeções de 4,8 m cada, três delas numa direção ortogonal às anteriores. Em cada transeção foram feitas 32 determinações de IC espaçadas de 0,15 m. Os valores de IC de cada transeção nas profundidades de 0,10, 0,20 e 0,30 m foram analisados a fim de conhecer-se a área de influência de uma amostra. A análise dos autocorrelogramas obtidos demonstrou que o raio de influência de uma determinação de IC variou entre 0,257 e 0,545 m, sendo em média de 0,322 m, a resistência do solo à penetração, pode ser caracterizada com segurança através de amostras espaçadas até 0,30 m e que a distância máxima de dependência de um valor de IC tende a ser mais elevado a 0,30 m de profundidade.

Cruz et al. (2001), avaliaram a resistência do solo à penetração de um Argissolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. Foram realizadas 18 determinações por sistema de manejo, plantio direto, sistema convencional 1 e 2 e campo

nativo. Os resultados mostraram que existe diferença nas respostas aos testes com penetrômetro entre os sistemas estudados. Os sistemas convencionais mostraram comportamento bastante semelhante entre si ao longo de todas as profundidades avaliadas. Para cada centímetro de profundidade o sistema de plantio direto apresentou um aumento de 0,059 MPa, enquanto que o campo nativo aumentou 0,034 MPa, o sistema convencional 2, 0,0679 MPa e o sistema convencional 1, 0,0595 MPa. O campo nativo apresentou a reta de menor inclinação e o sistema plantio direto mostrou, ao longo dos 60 cm avaliados o perfil menos compactado.

4.5. Utilização de Caixas de Solo na Avaliação da Compactação

Segundo Batchelder et al. (1971) a pesquisa de campo com máquinas de preparo do solo, por muitos anos, baseou-se somente na resposta de planta para avaliar o desempenho da máquina agrícola. Mais tarde, os estudos ampliaram-se para a medição de força de algumas ferramentas, a fim de melhor avaliar o desempenho global da máquina agrícola. Entretanto, estes estudos encontraram dificuldades quando se depararam com as inúmeras variáveis do solo e com a reprodução de resultados. Tais problemas levaram ao desenvolvimento dos denominados canais ou caixas de solo. Os canais de solo ou caixas de solo, vêm sendo reconhecidos como valiosíssimas ferramentas de pesquisa na área de preparo do solo e mecânica da tração.

Lepore e Steffen Jr. (1986), citam que nos últimos vinte anos, a interação solo-ferramenta tem sido estudada pela utilização de canais de solo. Deste modo, modelos de ferramenta em escala total e reduzida podem ser testados. Com este tipo de recurso, os atributos do solo (umidade, tamanho de partículas, etc) devem ser controlados para se obterem as condições de teste desejadas. Entretanto, não é matéria simples correlacionar os resultados obtidos em canais de solo com aqueles obtidos em condições reais de campo, uma vez que muitas variáveis aparecem quando a ferramenta é instalada numa máquina agrícola. Como exemplo, vê-se que o movimento da máquina influencia o comportamento do conjunto ferramenta-solo e os resultados são significativamente modificados.

A necessidade de um laboratório torna-se evidente, pelo fato de que os resultados de diferentes estudos de campo não proporcionam uma compreensão científica das

relações dinâmicas envolvidas. Há estudos feitos por etapas e isolados devido à falta de acesso a um local com solos diferentes, além do atraso que a dependência da natureza provoca enquanto se esperam as condições desejadas (TAVARES, 1995).

Baseando-se nas razões que determinam a construção de canais de solo, Correa (1990), afirma que as principais vantagens de um canal de solo, são:

- a) fornecer condições homogêneas de solo;
- b) permitir o controle das propriedades físicas do solo;
- c) permitir a comparação de resultados de diferentes ferramentas, uma vez que são testados em condições semelhantes;
- d) permitir a repetibilidade de ensaios.

Godwin et al. (1980) projetaram um tanque de solo simples com 13 metros de comprimento, 5 metros de largura e 0,5 metros de profundidade, para ensaios com velocidades de 0,1 a 2,5 m/s. A finalidade foi testar implementos agrícolas em escala reduzida e protótipos de vários tipos, tendo como objetivo: a) conseguir condições de homogeneização de solo isotrópicas, estudando os modelos de implementos e a validade do prognóstico das forças que atuam nos modelos; b) usar equipamentos disponíveis e instrumentação simples; c) minimizar custos e reduzir mão-de-obra. Os autores afirmam que já existem tanques de solos de grande porte, mas necessitam de instrumentação sofisticada e de alto custo financeiro.

No caso de um rolo compactador, Stafford (1975), conclui que a velocidade de avanço deve ser aproximadamente igual à velocidade tangencial de giro do rolo, para evitar tensões de cisalhamento. Ainda o mesmo autor, realizou com bons resultados testes em caixa de solo, tomando cuidado especial com a umidade. Para isso a água foi pulverizada em cima da caixa e depois misturada ao solo sendo a caixa posteriormente coberta por um dia (solos arenosos) ou até uma semana (solos argilosos), para permitir uma melhor homogeneidade da umidade no solo. A caixa era mantida coberta quando não estava em uso. A água foi pulverizada novamente apenas em intervalos semanais.

Lépore & Steffen (1999) afirmaram que há possibilidade de numerosas alternativas nos ensaios em tanques de solos, e tais alternativas podem ser melhores e mais rapidamente analisadas em tanques em escala reduzida, uma vez que a construção de modelos consome menos material. Além da preparação do solo para cada ensaio, é necessário consumir menos tempo e apresentar uma melhor uniformidade do mesmo. Acrescentam ainda que, do

ponto de vista prático, para que seja possível conseguir um teste bem controlado é indispensável dispor de um tanque de solo com dimensões adequadas e instalado em um laboratório com ambiente controlado.

Bulinsk et al. (1998) estudaram variações resultantes da compactação de camadas em um solo arenoso, acondicionadas em tanque de solo. A finalidade do ensaio foi avaliar a influência das dimensões das camadas de solo acondicionadas no interior do referido tanque, submetendo esse solo a vários níveis de compactação. Para obtenção dos resultados os autores realizaram testes utilizando dois tipos de penetrômetro, um penetrômetro com 12,8 mm de diâmetro na base do cone e ângulo de abertura de 60^0 e outro penetrômetro com 20,7 mm de diâmetro na base do cone e ângulo de abertura de 30^0 . Foi considerado para os dois tipos de penetrômetro o efeito da velocidade de penetração e tipo de cone. O autor utilizou uma velocidade de penetração no solo numa faixa de 0,01-0,03 m/s e a densidade do solo variou numa faixa de 1.65 a 1.81 g.cm⁻³. Os resultados obtidos com a utilização dos penetrômetros em condições iguais de operação mostraram que, o penetrômetro com cone de menor abertura foi 65% mais eficiente que o outro penetrômetro de cone com maior abertura, e o incremento de velocidade de penetração provocou um acréscimo da resistência à penetração de 60%, em relação ao penetrômetro com 12,8 mm de diâmetro de base do cone com ângulo de abertura de 60^0 . Concluíram ainda, que deveriam ser construídos mais tanques de solo e também, utilizados e testados outros tipos de penetrômetros e vários tipos de cones.

O National Soil Dynamics Laboratory (NSDL), segundo Correa (1990), é o mais conhecido laboratório de pesquisa com máquinas de preparo do solo. Os estudos de ferramentas em escala total e das relações destas com o solo, são realizados em nove canais de solo a céu aberto. Cada canal tem 7 m de largura, 76 m de comprimento por 0,6 a 1,5 m de profundidade. Além dos grandes canais de solo, o mesmo autor comenta que, o NSDL dispõe de pequenos canais localizados internamente, e que servem para estudos expeditos das relações solo-máquina. Um canal de solo circular, que é usado para estudar ferramentas pequenas ou modelos de ferramentas, tem 0,61 m de largura, 0,30 m de profundidade, diâmetro externo de 5,49 m e diâmetro interno de 4,88 m.

4.6. Projeto de máquinas

Projetar com sucesso exige algo mais do que apenas projetar! A primeira condição é, antes de tudo, uma dedicação integral ao trabalho. A condição seguinte é o domínio sobre numerosos pontos de vista e experiências, que não se enquadram totalmente no ramo das atividades de projeto propriamente ditas (NIEMANN, 1971).

Segundo Faires (1966), um projeto de máquinas é bastante complexo e envolve uma série de conhecimentos bastante extensos. Assim, um bom projetista deve, entre outras coisas, ter:

- a) sólidos conhecimentos de resistência e propriedades dos materiais;
- b) conhecimento dos processos de fabricação;
- c) conhecimentos especializados, tais como propriedades particulares dos materiais em atmosferas corrosivas, em baixas ou relativamente altas temperaturas;
- d) bom-senso suficiente para saber quando deve usar um catálogo, uma fórmula empírica ou a teoria;
- e) idéia da aparência que o produto deve ter;
- f) cuidado com o aspecto econômico do projeto.

O mesmo autor comenta que, existem outras considerações importantes e um conjunto amplo de detalhes, a saber:

- Constituirá a máquina um perigo para o operador?
- Estará o operador protegido contra seu próprio erro ou falta de cuidado?
- A máquina oferecerá segurança operacional?
- A montagem é simples?
- E a manutenção?

Segundo Niemann (1971), é através de cálculos e análises preliminares que se vem a saber onde devem ser feitos certos gastos e onde se devem fazer certas economias. Apenas depois de obtidas tais informações é que se podem estabelecer, numericamente, da maneira mais geral e mais exata possível, as exigências técnicas, como por exemplo: potências, velocidades, rotações, capacidades, instalações necessárias, etc.

Em 1985, foi lançado no Brasil em escala comercial o Penetrographer SC-60 fabricado pela Soil Control, com uma haste de 600 mm de comprimento e 9,53 mm de

diâmetro. Pretendia-se seguir as normas da ASAE, mas as primeiras unidades do aparelho ofereciam apenas cones com ângulo sólido de 60° . Devido a sua facilidade operacional, o aparelho foi bastante difundido (VIEIRA e DIAS, 1997).

Amaral (1994), desenvolveu um penetrógrafo eletrônico portátil, cuja operação foi controlada por um microprocessador que realiza a leitura dos sensores de força e profundidade, possibilitando armazenar dados referentes a 99 curvas com 200 pares, sendo estes posteriormente transferidos a um microcomputador, via interface serial. O equipamento permitiu economia de tempo no processamento das informações, evitou erros de leitura e representou uma grande evolução tecnológica em relação aos métodos de determinação do índice de cone utilizados no Brasil.

Lins e Silva et al. (1998) realizaram o aprimoramento de um penetrógrafo hidráulico com aquisição eletrônica de dados, montado no sistema hidráulico de três pontos de tratores agrícolas, onde os sinais analógicos de transdutores de força e posição são condicionados, transformados em digitais e gravados em um “data logger”, permitindo regular e operar em velocidades constantes de penetração do cone no perfil do solo. As modificações de melhoramento implementadas ao sistema, proporcionaram a versatilidade esperada de um equipamento dessa natureza, permitindo significativo aprimoramento aos métodos de aquisição de dados de índice de cone e de avaliação da resistência do solo à penetração, em condições de campo e de laboratório.

Lanças e Santos (1998), construíram um penetrômetro hidráulico-eletrônico para a determinação da resistência à penetração do solo. O sistema tem como elementos básicos um pistão hidráulico, uma célula de carga, uma haste de aço contendo uma ponteira cônica de ângulo sólido de 30° , com diâmetro de 19,5mm. O sistema hidráulico do trator (“controle remoto”) foi utilizado para obtenção da pressão necessária para cravar o cone na direção normal ao solo. A velocidade constante de 1820 mm/min independentemente da resistência do solo à penetração foi obtida pela instalação de uma válvula de controle de vazão no circuito hidráulico. A obtenção, o registro e o armazenamento dos dados de resistência à penetração do solo foram possíveis pela utilização de sistema eletrônico, formado pelos seguintes componentes: sensor de força (célula de carga), potenciômetro utilizado como sensor de profundidade, sistema de aquisição e armazenamento de dados (“Micrologger”), microcomputador e programa para análise dos dados ou planilha eletrônica.

Lanças et al. (2000a) equiparam o penetrômetro hidráulico-eletrônico com um Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS), instalado em carreta rodoviária, e elaboraram um programa para tratar, gerar e manipular os dados levantados para criação de gráficos em planilhas eletrônicas e mapas de isocompactação do solo agrícola. O sistema mostrou-se prático e flexível para ser aplicado tanto em pesquisas de campo como em grandes áreas agrícolas.

Vaz et al. (2001), desenvolveram um penetrômetro combinado com TDR (Time Domain Reflectometry), onde dois fios condutores paralelos foram enrolados no cone do penetrômetro obtendo assim, a constante dielétrica no solo. O intuito do desenvolvimento deste equipamento foi obter dados simultâneos em profundidade de resistência do solo à penetração com teor de água no solo. O experimento de campo foi conduzido em um solo denominado Yolo clay silt loam, no campo experimental da Universidade da Califórnia, em Davis (EUA), onde o efeito combinado entre teor de água e densidade do solo foi permitido através de um ajuste, utilizando uma equação exponencial de força. Foi feita uma análise de correlação entre resistência do solo à penetração e teor de água no solo, sendo o resultado desta positiva ($r^2 = 0,72$). Utilizando os dados combinados do penetrômetro de cone e TDR, a equação ajustada pode ser utilizada para estimar a densidade do solo.

Novas pesquisas vêm sendo realizadas com equipamentos de tecnologia de ponta e mais sofisticados com o objetivo de obtenção de resultados rápidos. Lanças (1996) apresentou algumas tendências, como utilização de raios gama, raio X, para a detecção da camada compactada e distribuição de agregados do solo, respectivamente, entre outros métodos e equipamentos.

A construção de um penetrômetro “automático” para ser utilizado em tanques de solo é de suma importância. Por se tratar de solo desestruturado com características físicas homogêneas, a análise de resistência do solo realizada com penetrógrafo manual torna-se inadequada, pois necessita da sensibilidade do operador na introdução do equipamento ao solo, o que nem sempre é feito com velocidade de penetração constante, obtendo, assim, respostas não condizentes com a real situação do solo. Neste sentido, o desenvolvimento de um penetrômetro elétrico-eletrônico para avaliação da resistência do solo à penetração viabiliza o estudo em tanques de solo, fornecendo resultados mais confiáveis e reproduzíveis.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Materiais

5.1.1. Solo

Os ensaios foram executados com amostras de um Latossolo Vermelho distrófico EMBRAPA (1999), de textura arenosa média pertencente a uma área experimental da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP, Campus de Botucatu/SP, localizada geograficamente em 22° 51'22'' de latitude sul e 48° 26'08'' de longitude oeste, à 840 metros acima do nível do mar

5.1.2. Tanque de solo

O tanque de solo foi construído com a finalidade de simular e avaliar o comportamento dos rodados em condições de campo e sua influência sobre o solo quando submetidos a variações crescentes de carga.

Construído com perfis de aço carbono SAE 1020, ABNT, de seção quadrada, sendo suas paredes revestidas com chapa de aço laminado, o tanque apresentou as dimensões de 2,0 m de comprimento, 1,0 m de largura e 0,80 m de altura. Foi totalmente preenchido com 4 (quatro) camadas de solo, colocadas uma a uma, sendo posteriormente compactadas por um rolo compactador.

5.1.3. Pneu

Para efetuar a compactação no tanque de solo através de uma Prensa Hidráulica, foi utilizado um pneu, conforme pode ser visualizado na Figura 2, com as seguintes descrições:

- Fabricante: Goodyear
- Tipo: Diagonal
- Modelo: Dyna Torque II 23.1 – 30

Para a execução dos ensaios no tanque de solo, o pneu agrícola Diagonal 23.1- 30 foi inflado com uma pressão de 194,70 kPa (20 psi).



FIGURA 2. Pneu Diagonal 23.1 - 30

5.1.4. Quadro de madeira

Foi utilizado um quadro de madeira com 990 mm de comprimento e 850 mm de largura sendo que no interior foi colocado uma malha de barbante (100 x 100 mm) para demarcação das perfurações das linhas de resistência do solo à penetração.

5.1.5. Sistemas de aquisição de dados

Para a aquisição dos valores de resistência do solo à penetração, foi utilizado um sistema de aquisição de dados fabricado por Campbell Scientific, Inc. (Logan, Utah, EUA), modelo CR23X Micrologger, conforme mostra a Figura 3, cujas características técnicas principais são apresentadas no Apêndice.

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

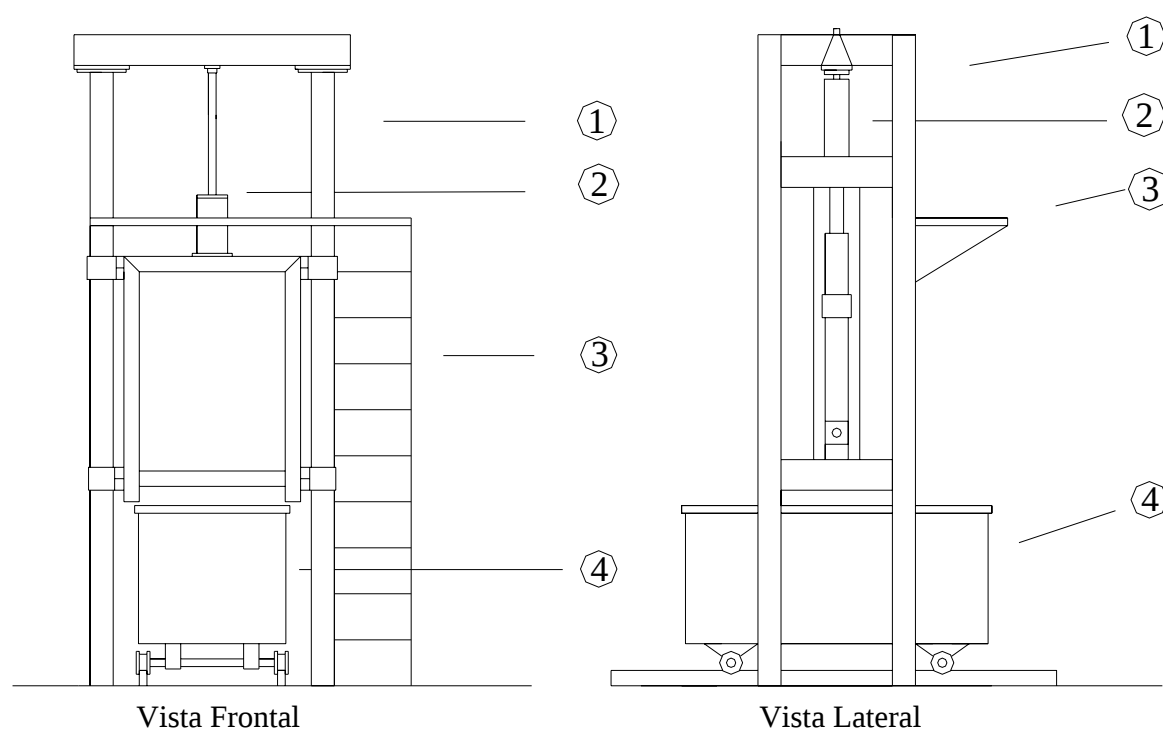


FIGURA 3. Sistema de aquisição de dados (“Micrologger”) utilizado no experimento.

5.1.6. Prensa hidráulica

A prensa hidráulica utilizada nos ensaios pertence ao NEMPA (Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agrícolas), desenvolvida por Santos (1999). Sob a prensa, foi colocado o tanque de solo sobre uma mesa móvel, apoiado sobre rodas de aço. O acionamento da prensa ocorre por meio de comandos hidráulicos e seu funcionamento se processa por meio de um conjunto motor-bomba alimentado por corrente elétrica. A prensa é composta de uma válvula direcional com alavanca de comando, que tem a finalidade de controlar os movimentos de subida e descida do atuador hidráulico e também para a transmissão de

carregamentos aos rodados. Possui ainda, uma válvula controladora de vazão, tendo como função o controle da velocidade de descida do êmbolo do atuador hidráulico. O equipamento possui ainda, um manômetro de pressão destinado à mensuração e calibragem das cargas aplicadas aos pneumáticos e uma régua de aço destinada à leitura da deformação total, relativa a cada pneu a ser ensaiado no tanque de solo. O pneu ensaiado nessa prensa foi primeiramente acoplado a um eixo por um sistema de flange e contra-flange, sendo içado posteriormente por meio de uma talha fixada no topo de um pórtico móvel, sendo finalmente esse pneumático fixado em uma estrutura aporticada dessa prensa. O desenho esquemático da Prensa Hidráulica pode ser visualizado na Figura 4.



LEGENDA	
1 - Prensa Hidráulica	
2 - Atuador Hidráulico	
3 - Escada Marinheiro (Vista Frontal), Plataforma (Vista Lateral)	
4 - Tanque de Solo	

FIGURA 4. Desenho esquemático da Prensa Hidráulica desenvolvida por Santos (1999).

5.1.7. Penetrógrafo manual

Para avaliação da resistência do solo à penetração a ser comparado os valores de resistência do solo à penetração obtidos pelo penetrômetro elétrico-eletrônico a ser desenvolvido foi utilizado o penetrógrafo manual SC – 60, comercializado pela Soilcontrol, o qual é constituído por um dinamômetro projetado com molas múltiplas, eixo central do dinamômetro em latão retificado, deslizante em buchas de bronze grafitado de baixo coeficiente de atrito, de uma haste projetada em duas seções para permitir facilidade de acondicionamento e transportabilidade e de um cone cementado para alta dureza superficial, maior resistência a impactos e baixo desgaste.

O conjunto registrador é composto por um sistema de tambor roscado, micro-engrenagens de latão e carro-ábaco deslizante por trilho linear de esferas e o traçador gráfico, do tipo esferográfico de boa resolução e fácil substituição.

O Ábaco foi padronizado em unidades métricas e inglesas, de fácil leitura e interpretação, permitindo a fácil visualização das camadas compactadas do solo, sua espessura e profundidade. Ainda no Ábaco foi reservado um espaço para anotações importantes de cada ensaio, bem como para uma recomendação preliminar para o preparo do solo (gradagem, escarificação ou subsolagem) e para romper as camadas compactadas identificadas.

Especificações:

- Penetração máxima: 60 cm (24")
- Resistência/ Registro: 76 kg/cm^2 (ou de 0 a 1080 psi)
- Carga Máxima Admitida: 120 kg
- Cone/ Haste: ângulo sólido: 30° , área da base: $126,7 \text{ mm}^2$ ($\varnothing 1/2"$), diâmetro da haste: 9,5 mm ($3/8"$)

5.1.8. Material utilizado para construção do penetrômetro elétrico-eletrônico

Um conjunto de redução corôa e pinhão foi utilizado, sendo este acoplado entre o eixo de saída do Moto-Redutor e o eixo de entrada do Redutor de Velocidade. Sendo o pinhão com 16 dentes (Z 16) e 66,2 mm de diâmetro primitivo; corôa com 38 dentes (Z 38) e 157,2 mm de diâmetro primitivo e uma corrente 428H (passo da corrente) e 116L que corresponde ao número de elos. Foi utilizado também um redutor de velocidade, onde as suas engrenagens são de dentes retos e redução de saída 3:1.

Utilizou-se um pinhão de dentes retos, módulo 4 (quatro) de fabricação, 18 dentes (Z 18) e 72 mm de diâmetro primitivo, o qual foi acoplado no eixo de saída do redutor que aciona uma cremalheira, usinada em aço-carbono de seção redonda, sendo de dentes retos, 800 mm de comprimento, 40 mm de diâmetro e passo igual à 12,56 mm.

O acionamento de todo o equipamento se deu através de um automatizador utilizado por portões deslizantes, com características técnicas descritas no Apêndice. A Figura 5 mostra o moto-redutor utilizado no equipamento.

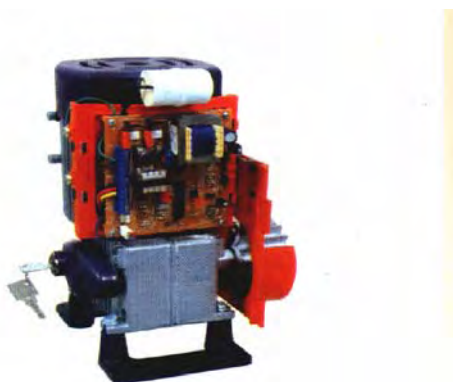


FIGURA 5. Moto-redutor utilizado para acionamento do penetrômetro elétrico-eletrônico

A haste de penetração foi construída em aço-carbono ABNT 1045, de diâmetro igual à 9,5 mm seguindo a norma ASAE S313.2 (1997) e 491 mm de comprimento. A haste foi desenvolvida com roscas nas extremidades para permitir facilidade de acoplamento do cone e transdutor de força (célula de carga) e também facilitar a transportabilidade.

O cone da haste de penetração foi construído em aço-carbono ABNT 1045, diâmetro 12,83 mm, perfazendo uma área de 129,28 mm², ângulo sólido igual a 30⁰ e altura de 24 mm. A base do cone possuía 1,5 mm de espessura, conforme ASAE S313.2 (1997).

Para medir a profundidade do ensaio, utilizou-se de um potenciômetro marca Spectrol Reliance Precision Potentiometer, modelo 534, com resistência de 100 k Ω e variação $\pm 5\%$, uma engrenagem de bronze passo igual à 4,71 mm, 30 mm de diâmetro primitivo e uma cremalheira em aço-carbono de seção redonda, passo igual a 4,71 mm, 800 mm de comprimento e diâmetro igual a 18 mm.

Para medir a força necessária para penetrar o cone no solo, foi utilizado um transdutor de força fabricado por:

- SODMEX – Indústria e Comércio de Material de Extensiometria Ltda
- Tipo: N – 320
- Escala Nominal: 0 – 5 kN
- Número de Série: 4575
- Sensibilidade para escala nominal em tração: 1,869 mV/V.

Para calibrar a célula de carga, utilizou-se uma prensa universal para ensaios de tração e compressão computadorizado, marca EMIC, modelo DL10000, equipado com célula de carga constantemente calibrada pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial).

5.1.9. Cronômetro e Trena de aço

Para avaliar a velocidade de deslocamento da cremalheira projetada, foi utilizado um cronômetro digital marca Casio, com precisão de 0,01s e para a calibração do transdutor de profundidade, foi utilizada uma trena de aço com 5 m de extensão.

5.2.Métodos

5.2.1. Preenchimento do tanque de solo

A condição inicial para execução dos trabalhos foi estabelecer camadas de solo de 10 cm de espessura, perfazendo um total de quatro camadas de solo, para cada tanque, de modo que, cada camada de solo somou um volume de 185.000,00 cm³ e massa aproximada de 269 kg, caracterizando uma densidade média final de 1,30 kg/dm³ por camada de solo a um teor de água inicial médio de 0,12 kg.kg⁻¹.

Para estimar a massa de solo por camada, foi considerado a Ds inicial e o teor de água na condição natural. Com base nessas condições de contorno, utilizou-se as seguintes relações matemáticas:

$$Ds = \frac{Ms}{Vt} \quad \text{onde:} \quad (2)$$

Ds = densidade do solo (kg/dm³)

Ms = massa de solo seco (kg)

Vt = volume total do solo (dm³)

$$TFSA = TFSE \cdot (1 + U) \quad \text{onde:} \quad (3)$$

TFSA = terra fina seca ao ar

TFSE = terra fina seca em estufa

U = umidade do solo (kg.kg⁻¹)

Então para o teor de água médio de 0,12 kg.kg⁻¹, o procedimento de cálculo foi o seguinte:

Densidade do solo (Ds) = 1,3 g/m³

Umidade (U) = 0,12 kg.kg⁻¹

Altura de cada camada de solo no tanque (h) = 10 cm = 0,10 m

Área do tanque (A) = 1,85 m² Volume de cada camada de solo (V) = 0,185 m³

$$Ds = \frac{Ms}{Vs} \Rightarrow 1,30 = \frac{Ms}{0,185} \Rightarrow Ms = 0,24m^3 \Rightarrow Ms = 240kg \text{ de sólidos}$$

$$TFSE = \frac{TFSA}{1+U} \Rightarrow TFSE = \frac{100kg}{1,12} \Rightarrow TFSE = 89,28 \text{ kg de sólidos (TFSE)}$$

Logo:

100-----	89,28 kg de sólidos
x -----	240 kg
x = 268,82 kg de solo úmido (TFSA)	

A aplicação e execução de cada camada de solo no interior do tanque de solo consistiram inicialmente, em peneirar toda a amostra de solo (3 m³ de solo) coletada no campo com a finalidade de homogeneizar o solo. Na sequência, para a correção do teor de água foi utilizada uma betoneira para promover a homogeneização da massa de solo.

Finalizada a operação de homogeneização, a massa de solo foi retirada da betoneira e colocada dentro de um tambor, com capacidade para içar até 300 kg de massa de solo. A seguir, a massa de solo contida no mesmo foi mensurada por meio de uma balança e após este procedimento, o tambor foi içado por meio de uma talha mecânica e finalmente a referida massa foi basculada no interior do tanque de solo.

Na operação de modelamento das camadas de solo no interior do tanque, foram utilizadas ferramentas para o nivelamento do solo, como enxada, sarrafo fabricado em perfis de aço carbono, pá e colher de pedreiro. Após o nivelamento da respectiva camada de solo, o processo de compactação do solo foi executado por meio de um rolo compactador (massa igual à 12 kg), com a finalidade de se obter a densidade do solo estimada previamente, e atingir a cota dos 10 cm.

Finalizada a execução das camadas do tanque de solo, este foi encaminhado para a Prensa Hidráulica para dar início aos ensaios.

O Quadro 1 mostra as condições de ensaio do equipamento e os resultados obtidos para o teor de água do solo em cada avaliação, ou seja, 0,123 kg kg⁻¹ durante a determinação das linhas de resistência do solo à penetração e 0,103 kg kg⁻¹ durante a comparação do penetrômetro elétrico-eletrônico com o penetrógrafo manual e úmido.

Quadro 1. Análise do teor de água no solo após a determinação das linhas de resistência do solo à penetração (RLP) e após comparação entre o penetômetro elétrico-eletrônico e penetrógrafo manual (CP)

Tipo De Solo	Repetição	Densidade (kg / dm ³)	Teor De Água (kg kg ⁻¹)	
			RLP	CP
Latossolo Vermelho Distrófico	1	1,30	0,12	0,103
	2		0,125	0,103
	3		0,124	0,102
	4		0,124	0,104
Média	-	1,30	0,123	0,103

5.2.2. Aplicação das forças normais ao solo

Os níveis de carregamento relativos às forças normais aplicadas ao solo pelo pneu, por meio de um atuador hidráulico, foram: 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 kN, sendo estas cargas controladas e registradas por meio de um manômetro acoplado ao painel da referida prensa.

As quatro magnitudes de forças normais foram aplicadas ao solo, inicialmente aplicando-se a menor força estabelecida no ensaio (correspondente a 0,5 kN), sendo que, após a avaliação das linhas de resistência do solo à penetração esvaziou-se o tanque de solo. Posteriormente este foi preenchido para uma nova avaliação das linhas de resistência do solo à penetração da força seguinte (1,0 kN), procedendo-se desta maneira até a força normal de 2,0 kN.

5.2.3. Avaliação das linhas de resistência do solo à penetração

Iniciou-se a avaliação das linhas de resistência do solo à penetração com a aplicação da força de 0,5 kN, imposta pela Prensa Hidráulica através do pneu sobre o solo acondicionado no tanque, onde foi colocado um quadro de madeira sobre o perfil do solo, fazendo coincidir a linha de centro da malha do quadro de madeira com a linha de centro do pneu. Posteriormente, foram feitas perfurações a cada 10 cm, de acordo com a malha do quadro obtendo a resistência do solo à penetração na maior seção longitudinal do pneu e na maior seção transversal do pneu. Após o término das perfurações, esvaziou-se todo o tanque

de solo, preencheu novamente o tanque com quatro camadas de solo, estando cada camada com teor de água médio de $0,12 \text{ kg.kg}^{-1}$ e densidade média do solo de $1,30 \text{ kg/dm}^3$ e iniciou-se a avaliação das linhas de resistência do solo à penetração com a aplicação da força seguinte, sendo esta de 1,0 kN, procedendo-se da mesma maneira todo o método anteriormente descrito, sendo posteriormente feitas as avaliações para as forças de 1,5 kN e 2,0 kN.

Para facilitar a interpretação dos gráficos de linhas de resistência do solo à penetração, convencionou-se que o lado esquerdo da linha de centro da diagonal menor e a parte dianteira à partir da linha de centro da diagonal maior, são apresentados nos gráficos pelo sinal negativo. O ponto 0 (zero), tanto na profundidade quanto à resistência do solo à penetração, coincidem com a linha de centro do pneu e linhas de centro das diagonais maior e menor.

5.2.4. Comparação entre os valores obtidos de resistência do solo à penetração do penetrômetro elétrico-eletrônico e do penetrógrafo manual

Para comparar os valores obtidos de resistência do solo à penetração do penetrômetro elétrico-eletrônico e do penetrógrafo manual, foram realizadas 6 perfurações dentro da área de contato pneu/solo e 6 externas a essa, para cada equipamento, em lados opostos da diagonal maior imposta pelo pneu, com a finalidade de obter o incremento da compactação desse solo e correlação entre os equipamentos. As determinações com o penetrógrafo manual foram feitas conforme ASAE S313.2 (1997), que exige para o teste a introdução da haste no solo através da força do operador sobre duas manoplas a uma velocidade de penetração constante de 1829 mm por minuto, sendo o valor obtido graficamente por uma ficha anexa ao mesmo, relacionando a força com a profundidade de penetração. As determinações com o penetrômetro elétrico-eletrônico foram feitas a uma velocidade de penetração uniforme conforme proposta pela norma ASAE S313.2 (1997). Os dados de força e profundidade foram registrados pelo microllogger e posteriormente tabulados em uma planilha eletrônica Excell. Na Figura 6 é mostrado os pontos amostrados por cada um dos equipamentos.

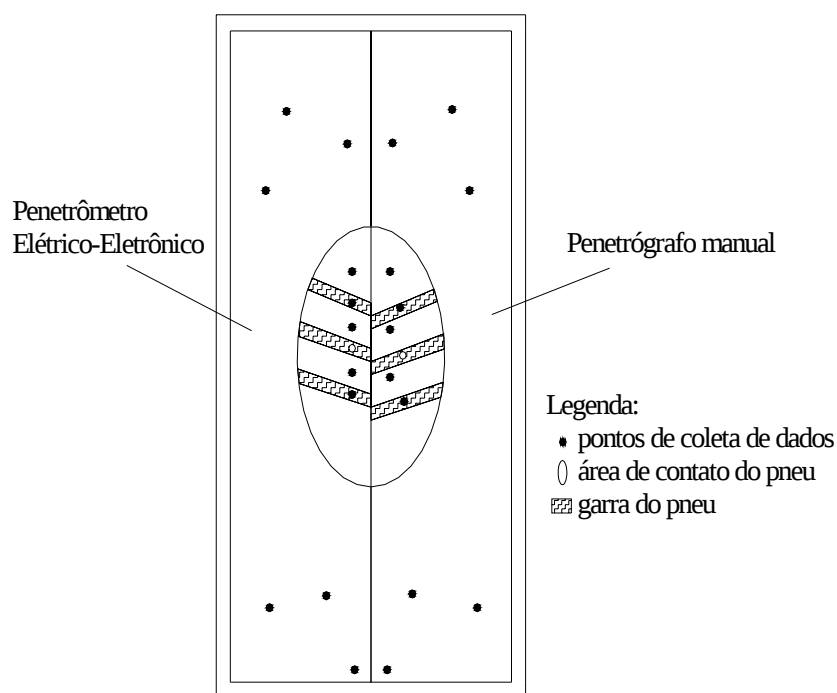


FIGURA 6. Esboço da área de contato do pneu/solo e os pontos amostrados no tanque de solo.

5.2.5. Sistema de aquisição de dados (“micrologger”)

O primeiro passo para monitorar e gravar os sinais recebidos na elaboração do programa a ser usado pelo “micrologger”, foi especificar os transdutores usados no ensaio. As instruções de programa foram inseridas no “micrologger” diretamente pelo teclado e transferidas de um computador com ajuda do software PC208W, fornecido pelo fabricante do “Micrologger”, que permitiu trabalhar em ambiente Windows do computador. Este Software permitiu também programar, descarregar e gravar os dados coletados pelo “micrologger”.

O programa foi desenvolvido para o sistema de aquisição de dados com a finalidade de gravar as informações de profundidade e carga a cada 0,3 segundos, ou seja, 3,33 Hertz. Após cada coleta de dados, estes foram transferidos para um microcomputador conectado ao sistema de aquisição por intermédio da interface RS-232C, para posterior processamento, conforme pode ser visualizado na Figura 7. O processo de

transferência de dados foi realizado pelo programa PC208W (Campbell Scientific, Inc.). Na Figura 8 é mostrado o fluxograma do programa utilizado no sistema de aquisição de dados.



FIGURA 7. Instrumentação para coleta de dados.

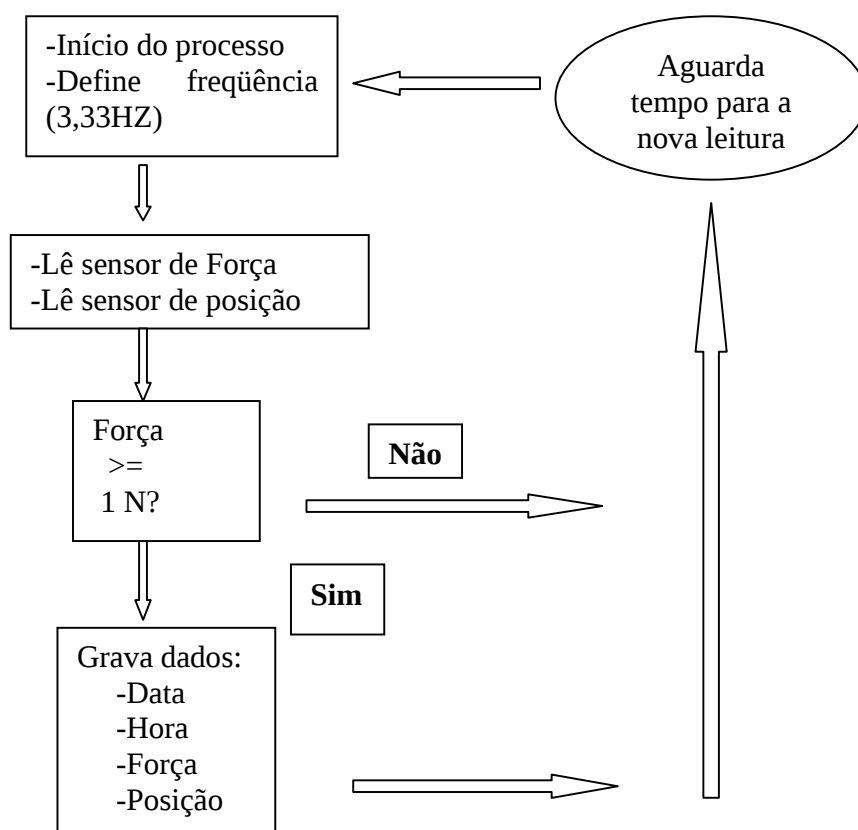


FIGURA 8. Fluxograma simplificado do programa utilizado no sistema de aquisição de dados.

No programa os dados foram gravados em unidades de engenharia (SI, MKS). A gravação dos dados em unidades de engenharia, requer a entrada de um fator de conversão chamado “multiplier”, que fez a correspondência entre o sinal gerado pelo transdutor e a unidade desejada. Para os dados de Força a unidade utilizada foi quilograma-força (kgf) e para os dados de profundidade, a unidade utilizada foi centrímetro (cm).

5.2.6. Calibração da Célula de carga (força)

A célula de carga (SODMEX) foi submetida à várias cargas pela prensa universal (EMIC) e as leituras em ambas as células foram avaliadas e comparadas por meio de regressão linear.

5.2.7. Sistematização e análise estatística dos dados ensaiados

O ensaio do penetrômetro elétrico-eletrônico foi sistematizado para permitir uma comparação entre os valores obtidos de resistência do solo à penetração do penetrômetro elétrico-eletrônico e do penetrógrafo manual. Foi feita uma relação linear simples entre os valores de resistência do solo à penetração obtida pelo penetrômetro elétrico-eletrônico e os valores obtidos pelo penetrógrafo manual. Posteriormente, foi feita a Correlação de Pearson.

Foi sistematizado, também, para permitir avaliar as linhas de resistência do solo à penetração, assim como, o comportamento da resistência do solo à penetração nas diagonais transversal maior e longitudinal maior do pneu ao longo do perfil do solo, para cada força normal aplicada, na forma de gráficos obtidas pelo penetrômetro elétrico-eletrônico.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos em forma de Figuras. Para facilitar a visualização e também a interpretação do projeto proposto os resultados e suas discussões serão apresentados em duas etapas. Na primeira etapa será apresentado o projeto do sistema e na segunda a análise dos parâmetros ensaiados.

6.1 Projeto e desenvolvimento do Equipamento

Para o dimensionamento dos órgãos de acionamento e deslocamento do equipamento (órgãos mecânicos), foram utilizadas as metodologias propostas por Niemann (1971) e Tavares (1999).

6.1.1 Cálculos desenvolvidos para dimensionamento da transmissão por corrente

Diâmetro do círculo primitivo do pinhão

$$d_0 = \frac{t * Z}{\pi} = \frac{13 * 16}{\pi} = 66,2mm \quad \text{onde:} \quad (4)$$

d_0 = diâmetro do círculo primitivo (mm)

t = passo da corrente (mm)

Z = número de dentes do pinhão

Diâmetro do círculo primitivo da corôa

$$d_0 = \frac{t * Z}{\pi} = \frac{13 * 38}{\pi} = 157,2mm \quad \text{onde:} \quad (5)$$

d_0 = diâmetro do círculo primitivo (mm)

t = passo da corrente (mm)

Z = número de dentes da corôa

Número de elos da corrente

$$x = \frac{2 * a}{t} + \frac{Z_1 + Z_2}{2} + \left(\frac{Z_2 - Z_1}{2 * \pi} \right)^2 * \frac{t}{a} = x = \frac{2 * 223,5}{13} + \frac{16 + 38}{2} + \left(\frac{38 - 16}{2 * \pi} \right)^2 * \frac{13}{223,5} = 62,09 \cong$$

$$62 \text{ elos, onde:} \quad (6)$$

x = número de elos da corrente

Z = número de dentes das engrenagens

t = passo da corrente (mm)

Comprimento da corrente

$$L_k = x * \frac{t}{10^3} = 62 * \frac{13}{1000} = 0,806m = 806mm \quad \text{onde:} \quad (7)$$

L_k = verdadeiro comprimento da corrente (m)

t = passo da corrente (mm)

x = número de elos da corrente

Relação de multiplicação

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{38}{16} = 2,375 \quad \text{onde:} \quad (8)$$

i = relação de multiplicação

Z_1 e Z_2 = número de dentes das engrenagens

Velocidade da corrente

$$v = \frac{Z_1 * t * n_1}{10^3 * 60} = \frac{16 * 13 * 58,33}{1000 * 60} = 0,2022 \text{ m.s}^{-1} \quad \text{onde:} \quad (9)$$

v = velocidade tangencial (m/s)

Z_1 = número de dentes do pinhão

t = passo da corrente (mm)

n_1 = rotação do pinhão (rpm)

Força tangencial

$$U = \frac{75 * N}{v} = \frac{75 * 0,25}{0,2022} = 92,73 \text{ kgf} \quad \text{onde:} \quad (10)$$

U = força tangencial (kgf)

N = potência (cv)

v = velocidade tangencial (m/s)

Força centrífuga na corrente

$$U_F = \frac{G * v^2}{9,81} = \frac{792,22 * 0.2022^2}{9,81} = 3,30 \text{ kgf} \quad \text{onde:} \quad (11)$$

U_F = força centrífuga na corrente (kgf)

G = peso da corrente por um metro comprimento (kgf/m)

v = velocidade tangencial (m/s)

Força de tração na corrente

$$P = U + U_F = 92,73 + 3,30 = 96,03 \text{ kgf} \quad \text{onde:} \quad (12)$$

P = força de tração na corrente (kgf)

U = força tangencial (kgf)

U_F = força centrífuga na corrente (kgf)

Pressão na articulação

$$p = \frac{P}{f} = \frac{96,03}{81} = 1,18 \text{ kgf/mm}^2 \quad \text{onde:} \quad (13)$$

p = pressão na articulação (kgf/mm²)

P = força de tração na corrente (kgf)

f = superfície de articulação (mm²)

$$f = d_B * b_H = 9 * 9 = 81 \text{ mm}^2 \quad \text{onde:} \quad (14)$$

d_B = diâmetro da bucha (mm)

b_H = comprimento da bucha (mm)

Força tangencial nominal

C_S = transmissão com motor elétrico e carregamentos com choques médios = acionamento secundário de máquina operatriz (cremalheira do penetrômetro) $\rightarrow C_S = 1$

$$U_m = \frac{P - U_F}{C_S} = \frac{96,03 - 3,30}{1} = 92,73 \text{ kgf} \quad \text{onde:} \quad (15)$$

U_m = força tangencial média (kgf)

P = força de tração na corrente (kgf)

U_F = força centrífuga na corrente (kgf)

Potência nominal transmissível

$$N_m = \frac{U_m * v}{75} = \frac{92,73 * 0,2022}{75} = 0,25 \text{ cv} \quad (16)$$

6.1.2 Dimensionamento do pinhão da cremalheira de acionamento da haste de penetração

Símbolo	Significado correspondente	Unidade
Z	Número de dentes	-
m	módulo	-
d_p	Diâmetro primitivo	mm
P_c	Passo circular	mm
S	Espessura do dente	mm
d_e	Diâmetro externo	mm
d_i	Diâmetro interno	mm
θ	Ângulo de pressão usual	-

d_b	Círculo de base	mm
a	Addendum	mm
b	Deddendum	mm
h	Altura do dente	mm
e	Folga	mm
L	Comprimento do dente	mm

$$Z_{\min} = \frac{2}{\sin^2 \theta} = \frac{2}{\sin^2 20^\circ} = \frac{2}{0,1169} = 17,1 \text{ dentes} \quad (17)$$

$Z_{\min} = 17$ dentes, então, foi adotado $Z = 18$ dentes

Diâmetro primitivo

$$d_p = m * Z = 4 * 18 = 72 \text{ mm} \quad (18)$$

Passo circular

$$p = \frac{\pi * d_p}{Z} = \frac{\pi * 72}{18} = 12,56 \text{ mm} \quad (19)$$

Espessura do dente

$$s = \frac{m * \pi}{2} = \frac{\pi * 4}{2} = 6,28 \text{ mm} \quad (20)$$

Addendum

$$a = m = 4 \text{ mm}$$

Deddendum

$$b = \frac{7}{6} * m = \frac{7}{6} * 4 = 4,67 \text{ mm} \quad (21)$$

Diâmetro externo

$$d_e = d_p + 2 * a = 72 + (2 * 4) = 80 \text{ mm} \quad (22)$$

Diâmetro interno

$$d_i = d_p - 2 * b = 72 - (2 * 4,67) = 62,66 \text{ mm} \quad (23)$$

Ângulo da pressão usual

$\theta = 20^\circ$, mais utilizado em máquinas e implementos agrícolas

Círculo de base

$$d_b = d_p * \cos \theta = 72 * 0,9396 = 67,65 \text{ mm} \quad (24)$$

Altura do dente

$$h = a + b = 4 + 4,67 = 8,67 \text{ mm} \quad (25)$$

Folga

$$e = 0,167 * m = 0,167 * 4 = 0,668 \text{ mm} \quad (26)$$

Comprimento do dente

$$L = (5a16) * m \Rightarrow L = 6,25 * m = 6,25 * 4 = 25 \text{ mm} \quad (27)$$

6.1.3 Dimensionamento do pinhão da cremalheira do transdutor de profundidade

$$Z_{\min} = \frac{2}{\sin^2 \theta} = \frac{2}{\sin^2 20^\circ} = \frac{2}{0,1169} = 17,1 \text{ dentes} \quad (28)$$

$Z_{\min} = 17$ dentes, então, foi adotado $Z = 20$ dentes

Diâmetro primitivo

$$d_p = m * Z = 1,5 * 20 = 30 \text{ mm} \quad (29)$$

Passo circular

$$p = m * \pi = 1,5 * \pi = 4,71 \text{ mm} \quad (30)$$

Espessura do dente

$$s = \frac{m * \pi}{2} = \frac{1,5 * \pi}{2} = 2,35 \text{ mm} \quad (31)$$

Addendum

$$a = m = 1,5 \text{ mm}$$

Deddendum

$$b = 1,167 * m = 1,167 * 1,5 = 1,75 \text{ mm} \quad (32)$$

Diâmetro externo

$$d_e = m * (Z + 2) = 1,5 * (20 + 2) = 33 \text{ mm} \quad (33)$$

Diâmetro interno

$$d_i = d_p - 2 * (1,167 * m) = 30 - 2 * (1,167 * 1,5) = 30 - 3,501 = 26,49 \text{ mm} \quad (34)$$

Ângulo da pressão usual

$\theta = 20^0$, mais utilizado em máquinas e implementos agrícolas

Círculo de base

$$d_b = d_p * \cos \theta = 30 * \cos 20^0 = 28,19 \text{ mm} \quad (35)$$

Altura do dente

$$h = a + b = 1,5 + 1,75 = 3,25 \text{ mm} \quad (36)$$

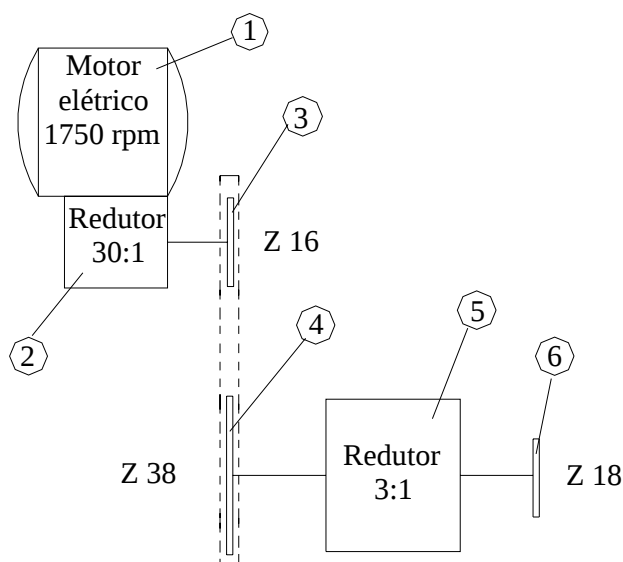
Folga

$$e = 0,167 * m = 0,167 * 1,5 = 0,25 \text{ mm} \quad (37)$$

Comprimento do dente

$$L = 6 * m = 6 * 1,5 = 9 \text{ mm} \quad (38)$$

6.1.4 Memorial de cálculo da relação de transmissão do penetrômetro elétrico-eletrônico, força máxima do equipamento e resistência do solo à penetração máxima



LEGENDA	
1 - (M)	Motor elétrico 1750 rpm
2 - (MR)	Redutor do motor elétrico 30:1
3 - (P1)	Pinhão localizado no eixo de saída do redutor1 (ESR1) Z16
4 - (C)	Corôa localizada no eixo de entrada do redutor2 Z38
5 - (R)	Redutor2 (3:1)
6 - (P2)	Pinhão da cremalheira de acionamento da haste de penetração Z18

FIGURA 9. Relação de transmissão do penetrômetro elétrico-eletrônico

Rotação do eixo de saída do moto-redutor (ESR)

Relação de transmissão do moto-redutor (i) = 30:1

$$i = \frac{n_m}{n_{ESR}} \Rightarrow 30 = \frac{1750}{n_{ESR}} \Rightarrow n_{ESR} = 58,33 \text{ rpm} \quad (39)$$

Rotação da corôa (C)

$$n_{P1} = n_{ESR} = 58,33 \text{ rpm} \quad (40)$$

$$n_C = n_{p1} * \frac{Z16}{Z38} = 58,33 * \frac{1}{2,375} = 24,56 \text{ rpm} \quad (41)$$

Rotação do pinhão da cremalheira de acionamento da haste de penetração

Relação de transmissão do redutor $i_{R2} = 3:1$

$$i_{R2} = \frac{n_C}{n_{p2}} \Rightarrow 3 = \frac{24,56}{n_{p2}} \Rightarrow n_{p2} = 8,19 \text{ rpm} \quad (42)$$

Velocidade do Penetrômetro Elétrico-Eletrônico

$$V = \frac{2 * \pi}{60} * n_{p2} * r_{p2} = \frac{2 * \pi}{60} * 8,19 * 0,036 = 0,03087 \text{ m.s}^{-1} = 30,87 \text{ mm.s}^{-1} \quad (43)$$

$$V = 1852 \text{ mm.min}^{-1}$$

Força máxima do penetrômetro elétrico-eletrônico

Potência do motor (P) = 0,25 cv

$$P = \frac{F * V}{75} \Rightarrow 0,25 = \frac{F * 0,03087}{75} \Rightarrow F = \frac{18,75}{0,03087} = 607,39 \text{ kgf} \quad (44)$$

Resistência do solo à penetração máxima que o penetrômetro elétrico-eletrônico suporta

Ø da base do cone de penetração = 12,83 mm = 0,01283 m

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0,01283^2}{4} = 0,00012928 \text{ m}^2 = 1,2928 \text{ cm}^2 \quad (45)$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{607,39}{1,2928} = 469,83 \text{ kgf/cm}^2 * 100 \text{ kPa} = 46982,52 \text{ kPa} \quad \text{então, a resistência do solo à}$$

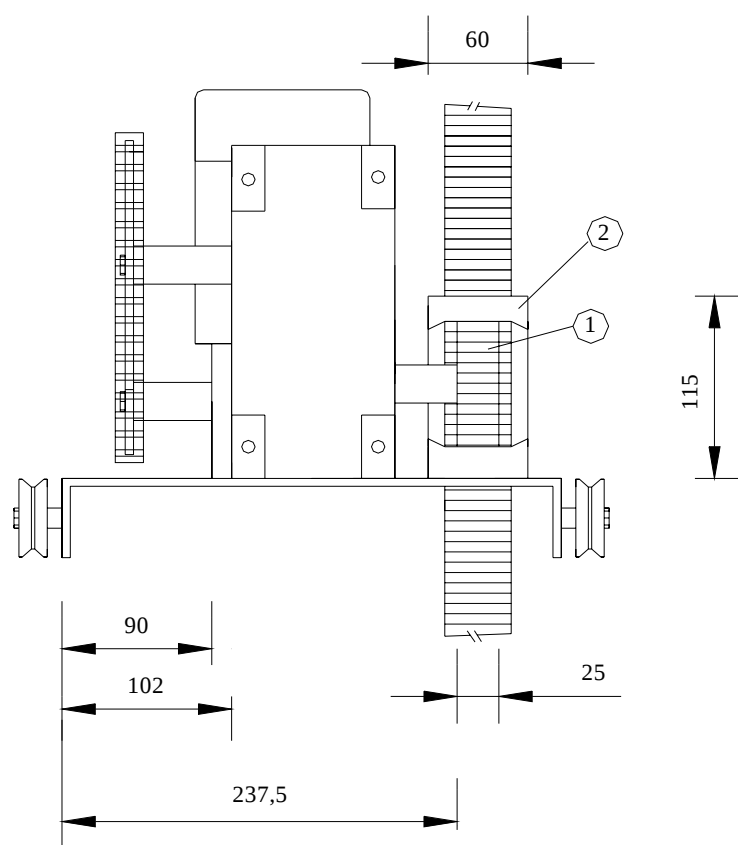
penetração máxima que o equipamento suporta penetrar é igual a 46982,52 kPa.

6.1.5 Croquis de Projeto

As Figuras 16 a 26 mostram plantas e croquis para a construção do penetrômetro elétrico eletrônico.

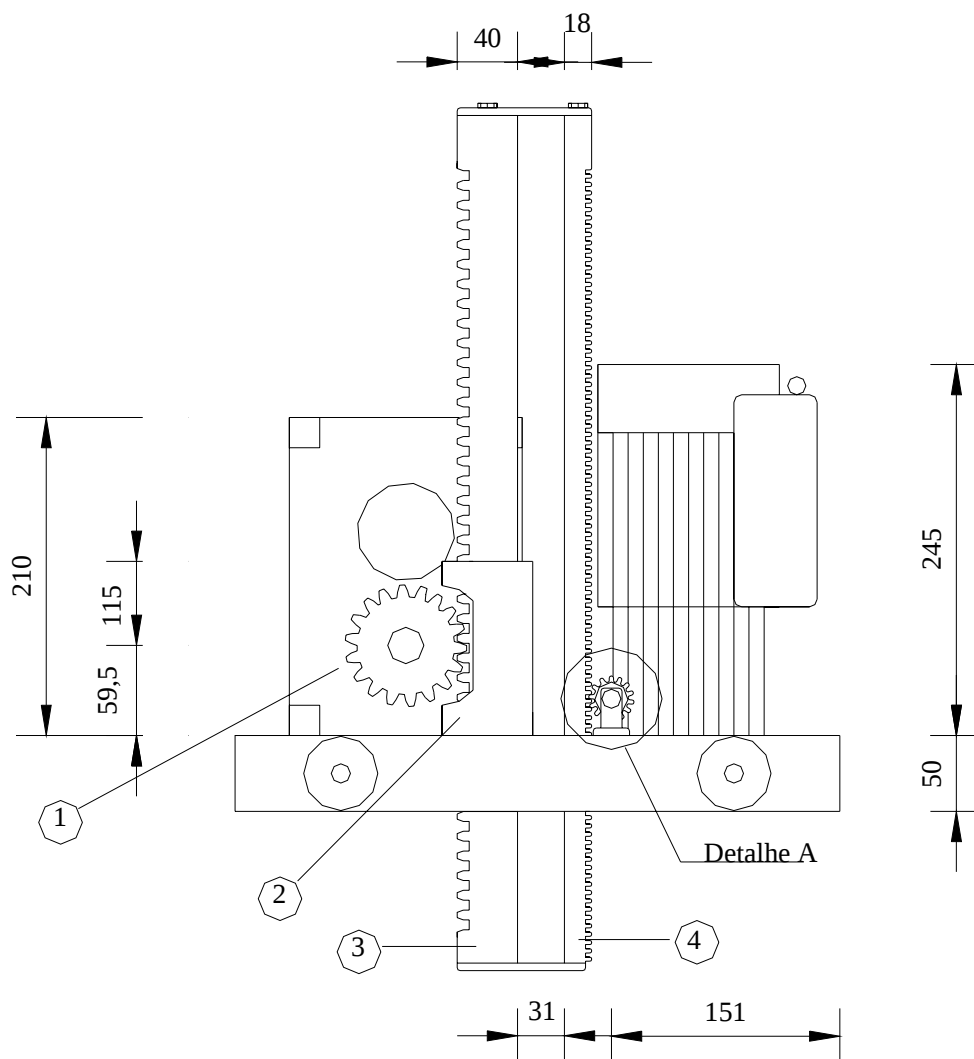


FIGURA 10. Vista frontal do Penetrômetro Elétrico-Eletrônico (cotas em milímetros).



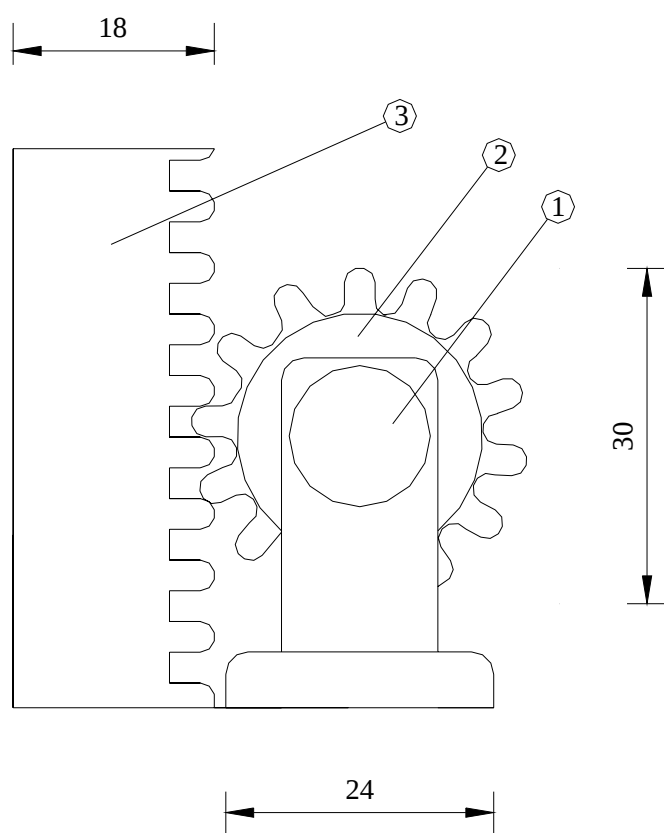
LEGENDA	
1 – Pinhão (Z18)	
2 – Luva de fixação da cremalheira de acionamento da haste de penetração (115 mm)	

FIGURA 11. Vista lateral do Penetrômetro Elétrico-Eletrônico (cotas em milímetros).



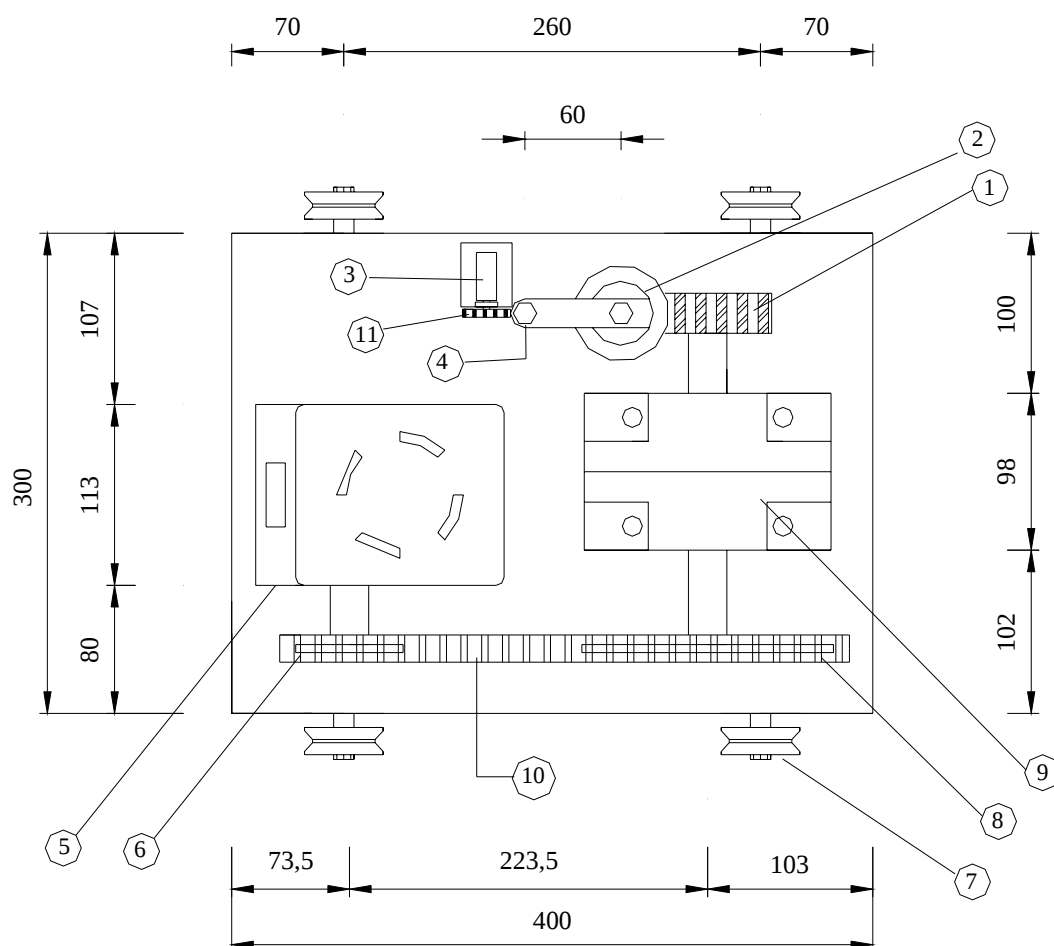
LEGENDA	
1 - Pinhão (Z18)	
2 - Luva de fixação da cremalheira de acionamento da haste de penetração (115 mm)	
3 - Cremalheira de acionamento da haste de penetração (Ø 40 mm)	
4 - Cremalheira do transdutor de profundidade (Ø 18 mm)	
5 - Transdutor de Profundidade (Potenciômetro)	

FIGURA 12. Vista de fundo do Penetrômetro Elétrico-Eletrônico (cotas em milímetros).



LEGENDA	
1 -	Transdutor de profundidade (Potenciômetro)
2 -	Engrenagem de bronze de dentes retos ($\varnothing_{\text{externo}}$ 30 mm)
3 -	Cremalheira do transdutor de profundidade ($\varnothing$ 18 mm)

FIGURA 13. Detalhe A do transdutor de profundidade “Potenciômetro” (cotas em milímetros).



LEGENDA	
1 - Pinhão (Z18)	
2 - Cremalheira de acionamento da haste de penetração (Ø 40 mm)	
3 - Transdutor de Profundidade (Potenciômetro)	
4 - Cremalheira do transdutor de profundidade (Ø 18 mm)	
5 - Moto-redutor elétrico (30:1)	
6 - Pinhão (Z16)	
7 - Roldana (Ø 50 mm)	
8 - Corôa (Z38)	
9 - Caixa de redução (3:1)	
10 - Corrente (428H x 116L)	
11 - Engrenagem do Potenciômetro	

FIGURA 14. Vista superior do Penetrômetro Elétrico-Eletrônico (cotas em milímetros).

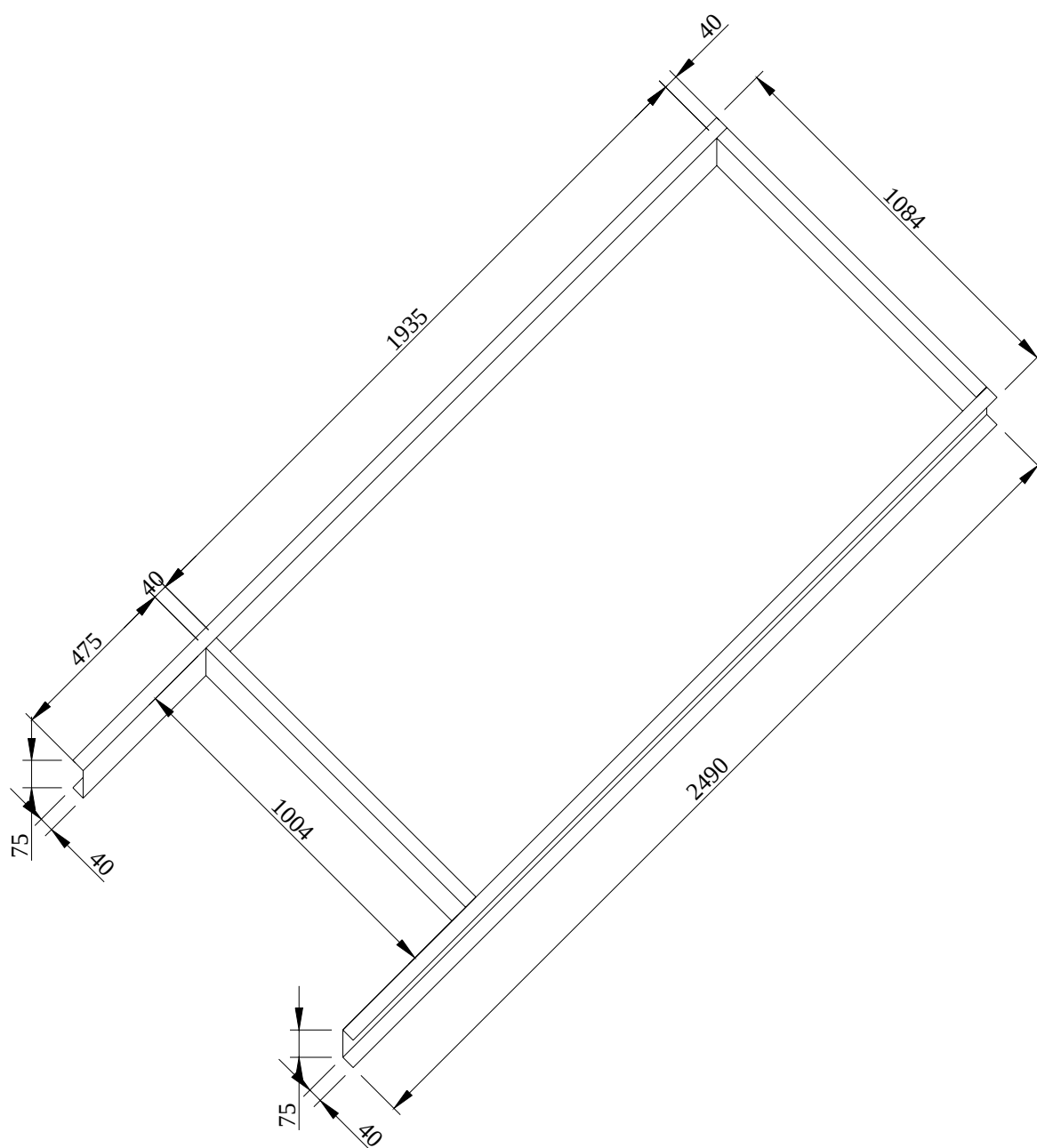


FIGURA 15. Vista em perspectiva 45° do trilho de fixação sobre o Tanque de Solo (cotas em milímetros).

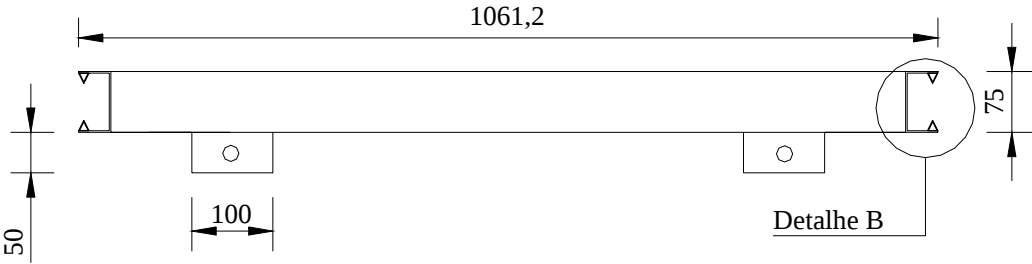
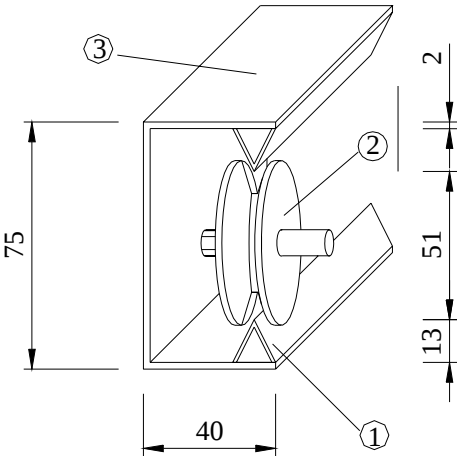


FIGURA 16. Vista frontal do trilho de fixação sobre o tanque de solo (cotas em milímetros).



LEGENDA	
1	Cantoneira de aço ABNT 1020
2	Roldana (Ø 50 mm)
3	Viga de aço-carbono ABNT 1020 perfil C

FIGURA 17. Detalhe B com vista em perspectiva cavaleira 45° do trilho de fixação sobre o tanque de solo e polia (cotas em milímetros).

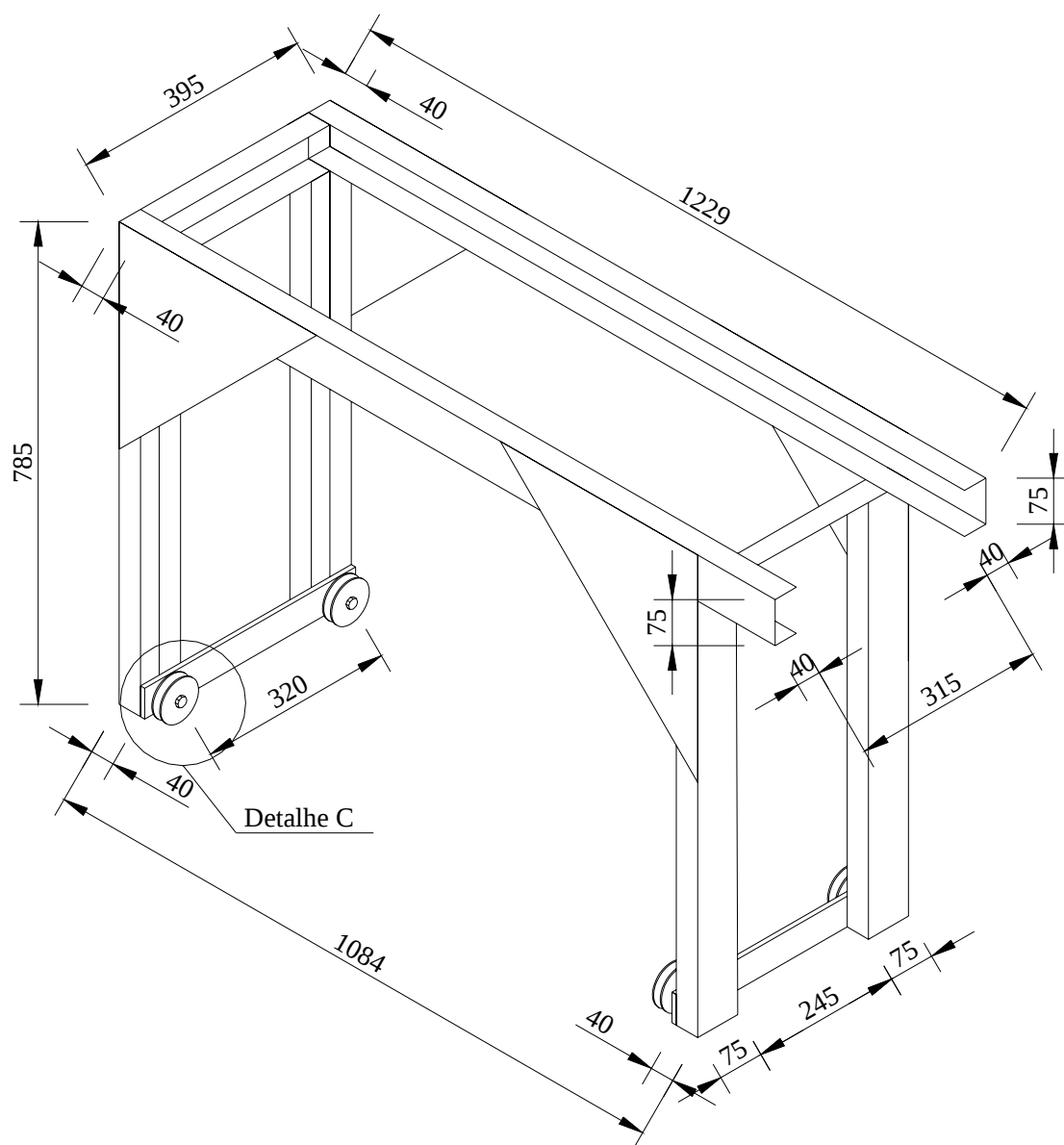
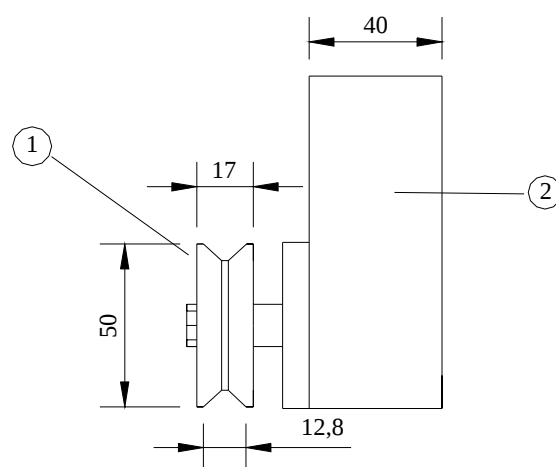


FIGURA 18. Vista em perspectiva 30⁰ da estrutura do Penetrômetro (cotas em milímetros).



LEGENDA	
1 - Roldana (Ø 50 mm)	
2 - Viga de aço-carbono ABNT 1020 perfil C	

FIGURA 19. Detalhe C com vista da polia e viga perfil C (cotas em milímetros).

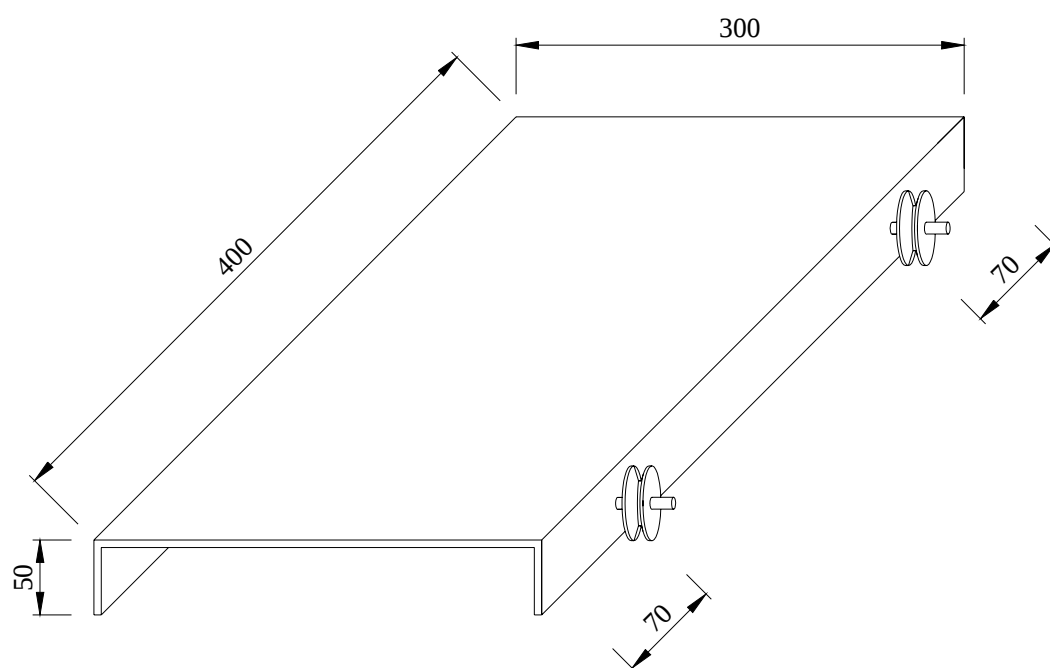


FIGURA 20. Perspectiva cavaleira 45° da chapa de aço dobrada nas pontas utilizada como base para fixação do sistema penetrômetro elétrico-eletrônico.

6.1.6 Penetrômetro Elétrico-Eletrônico

O penetrômetro elétrico-eletrônico é construído e fixado em uma chapa de aço-carbono ABNT 1020 com quatro polias (diâmetro 50 mm), as quais sustentam o sistema elétrico de acionamento da haste, as reduções mecânicas e o sistema eletrônico de aquisição de dados.

A chapa de aço dobrada nas pontas possui quatro polias, encaixadas em vigas de aço-carbono ABNT 1020, perfil C e 2 mm de espessura, nas quais foram soldadas cantoneiras de aço numa posição semelhante à um trilho, nas extremidades (superior e inferior) da viga, de forma que a chapa de aço com todo equipamento movimenta-se transversalmente ao tanque de solo. Toda a estrutura de viga perfil C, conforme pode ser visualizado na Figura 21, é apoiada sobre quatro polias, permitindo o movimento longitudinal do equipamento sobre o tanque de solo. Estas estruturas servem como lastro para auxiliar a penetração do cone no solo.

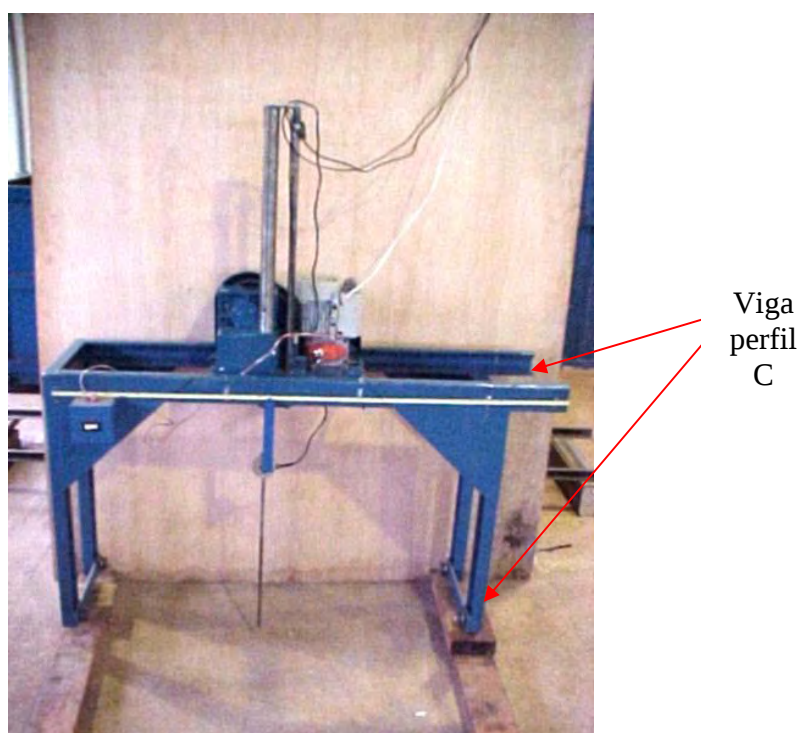


FIGURA 21. Vista frontal do penetrômetro elétrico-eletrônico.

O sistema elétrico de acionamento é constituído por um motor elétrico acoplado a um redutor (redução 30:1) e uma placa de circuito eletrônico, a qual comanda os sensores de fim de curso e controla o acionamento do motor, entre outros. A Figura 22 mostra o moto-redutor utilizado no equipamento.

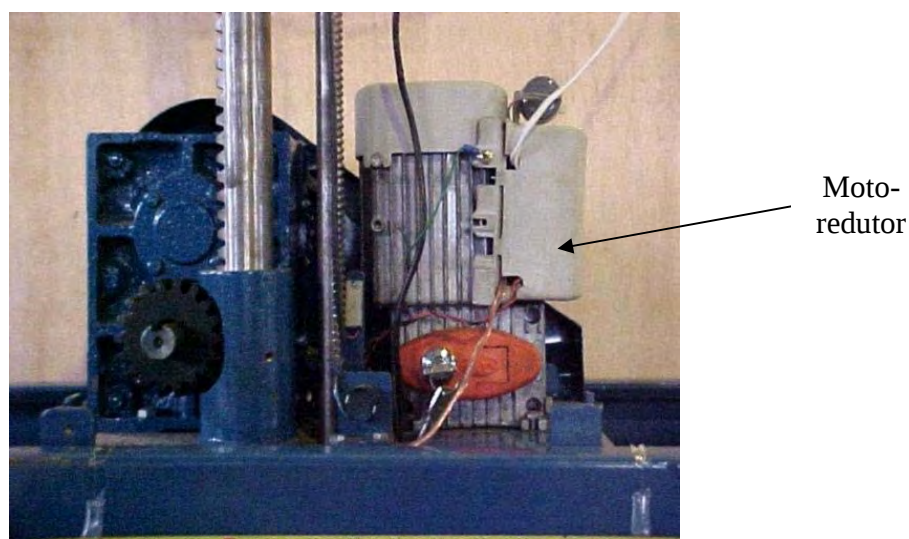


FIGURA 22. Moto-redutor utilizado para o acionamento de todo sistema.

O moto-redutor aciona o sistema de reduções mecânicas composto por: corôa e pinhão de motocicleta (redução 2,375:1), caixa redutora (redução 3:1), pinhão e cremalheira. Na extremidade da cremalheira, são fixados a célula de carga e a haste de penetração, o que pode ser visualizado nas Figuras 23 a 26.

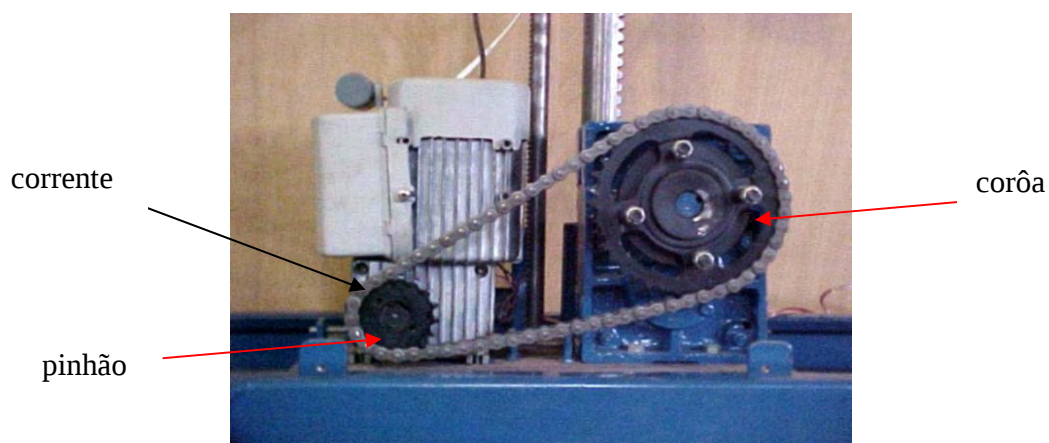


FIGURA 23. Conjunto corrente, corôa e pinhão de redução para motocicleta utilizado no Penetrômetro Elétrico-Eletrônico.

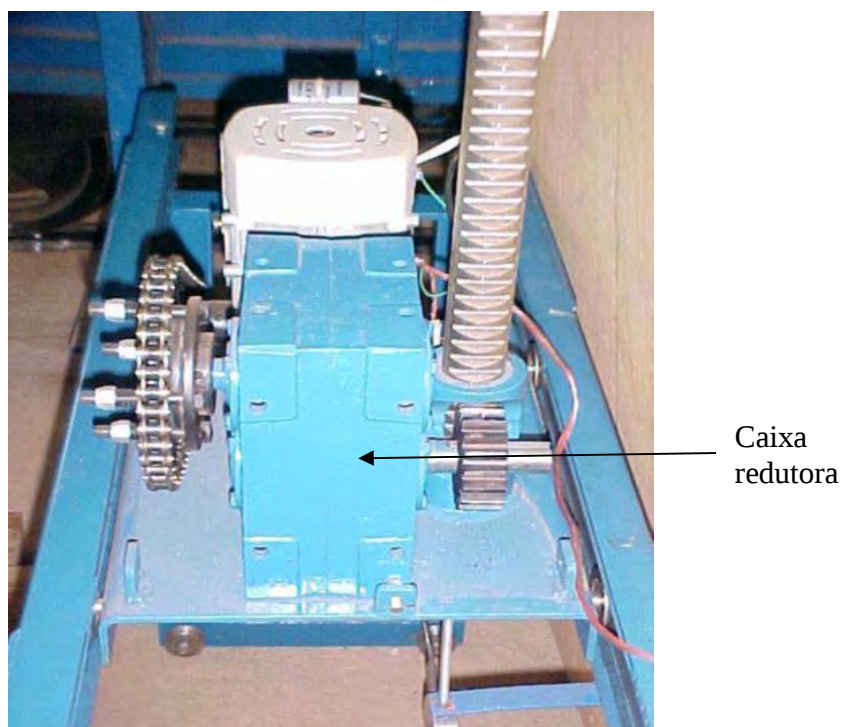


FIGURA 24. Caixa redutora (3:1) utilizada no Penetrômetro Elétrico-Eletrônico.

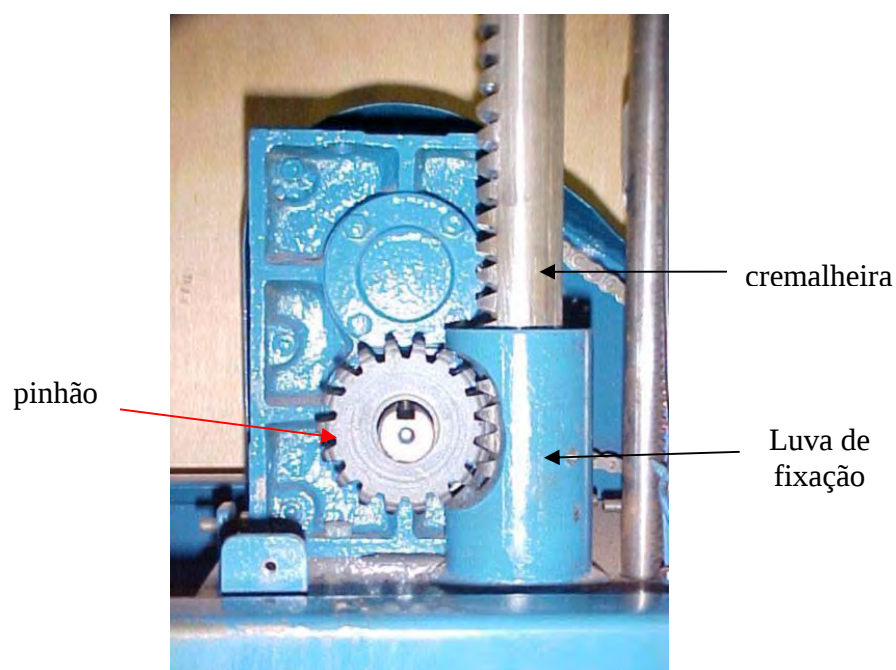


FIGURA 25. Vista frontal da cremalheira-pinhão para acionamento da haste de penetração.

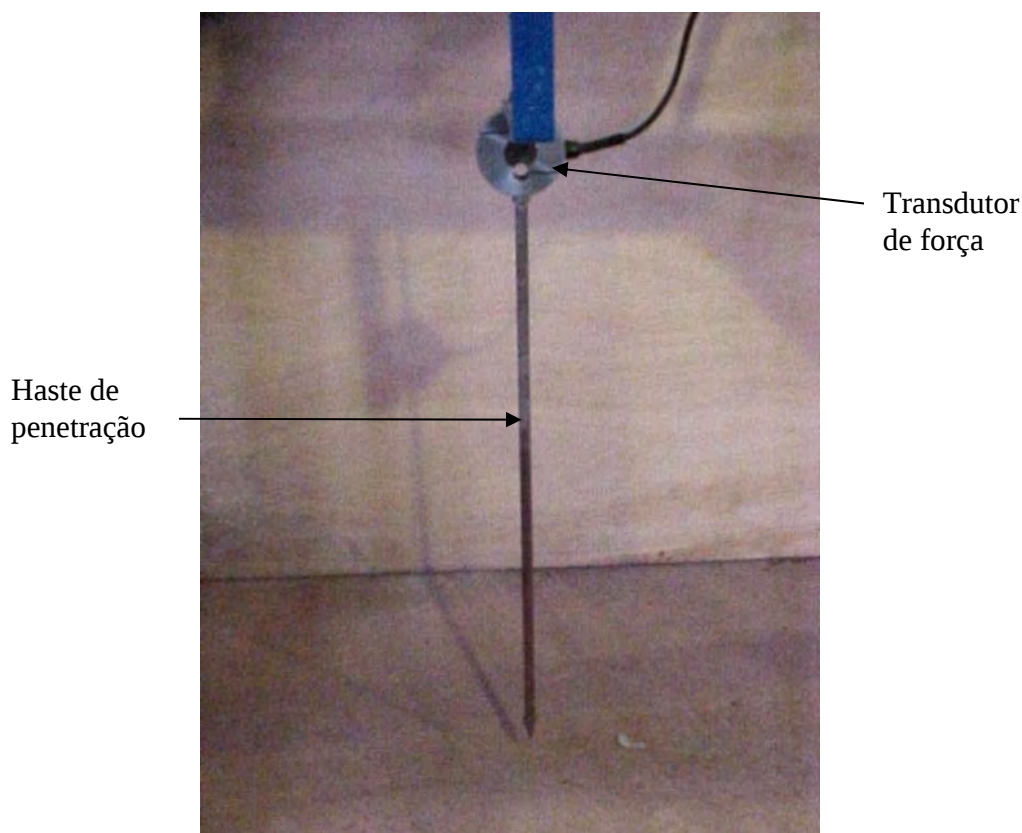


FIGURA 26. Transdutor de Força (célula de carga) e haste de penetração.

Acoplada à corôa, o sistema possui uma embreagem que atua com o intuito de proteger o motor elétrico e todo o equipamento de possíveis sobrecargas ou falhas nos sensores de fim de curso.

O sistema de aquisição de dados é composto por uma célula de carga, com capacidade para 5 kN. Esta célula, instalada na base da cremalheira, fornece a força exercida pela haste durante a penetração no solo. Para determinar a profundidade de penetração do cone no solo, é utilizado um potenciômetro elétrico, instalado no eixo de uma engrenagem que desliza lateralmente numa cremalheira de diâmetro 18 mm e 800 mm de comprimento, o qual se desloca junto com a cremalheira (base para a haste do cone), conforme pode ser visualizado na Figura 27. Um Micrologger CR 23X, que recebe as informações (em milivolts) da célula de carga e do potenciômetro e armazena estes dados, num programa computacional (PC 208W) previamente instalado, é utilizado para registrar e armazenar dados. Os dados são descarregados em um computador, os quais são transformados de milivolts para quilograma-força e centímetros de profundidade. Posteriormente os mesmos são

transformados em quilograma-força por metro-quadrado, e calculada, portanto, a resistência do solo à penetração.

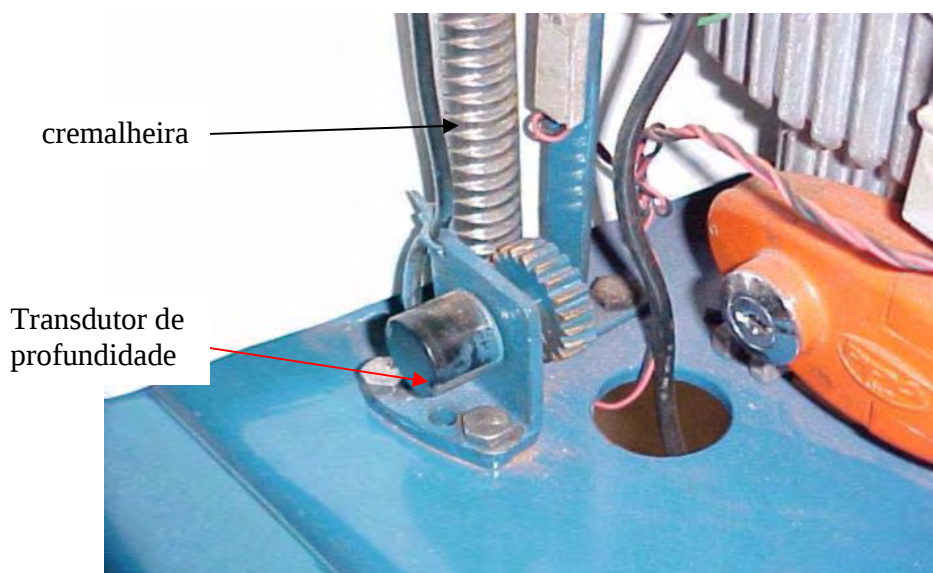


FIGURA 27. Transdutor de profundidade utilizado no Penetrômetro Elétrico-Eletrônico.

6.1.7 Calibração dos sensores eletrônicos e do equipamento projetado

A célula de carga foi calibrada em confronto com a prensa universal, encontrando-se o valor de 54,411 kgf para o multiplicador (multiply) o qual foi utilizado no sistema de aquisição de dados, e -283,285 kgf para o offset, conforme pode ser observado na Figura 28.

O potenciômetro foi calibrado, obtendo-se um valor de 42 cm para o multiplicador e -5036 cm para o offset.

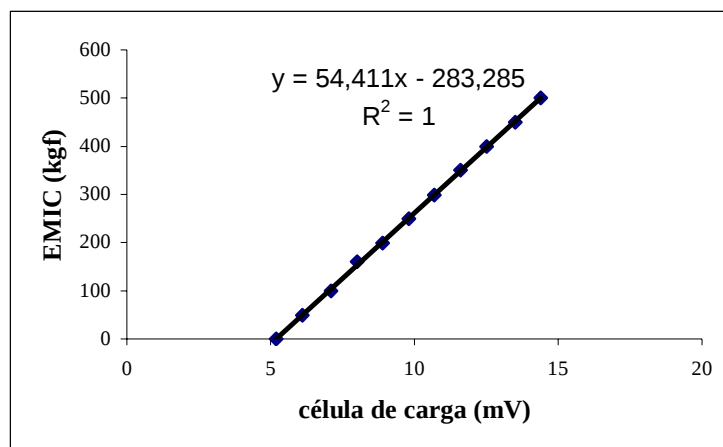


FIGURA 28. Curva de calibração da célula de carga de 5,0 kN.

A velocidade média final de deslocamento da cremalheira avaliada foi de 1896 mm min^{-1} , próxima à determinada pela ASAE /1997 (1829 mm min^{-1}).

6.2 Avaliação do Sistema projetado e análise dos parâmetros ensaiados

Todos os parâmetros referentes aos dados obtidos nos ensaios, bem como os valores calculados a partir destes, são apresentados .

6.2.1 Linhas de resistência do solo à penetração

As linhas de resistência do solo à penetração foram determinadas no tanque de solo para as forças 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 kN. As Figuras 29, 30 e 31, mostram a determinação das linhas de resistência do solo à penetração durante o ensaio para solo úmido e seco.

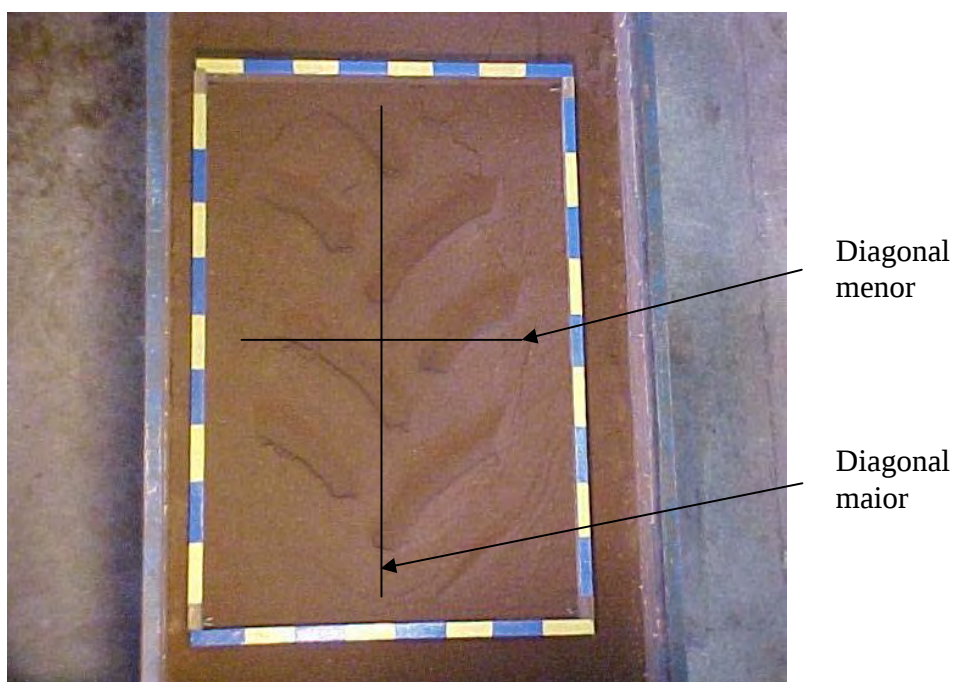


FIGURA 29. Solo deformado pelo pneu agrícola diagonal através da Prensa Hidráulica.

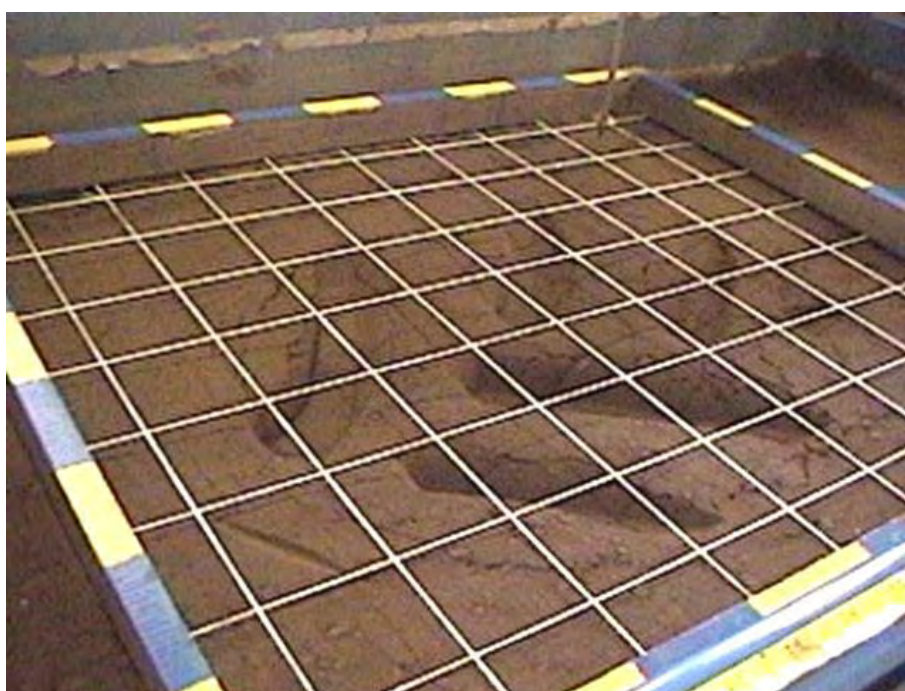


FIGURA 30. Quadro de madeira utilizado na determinação das linhas de resistência do solo à penetração.

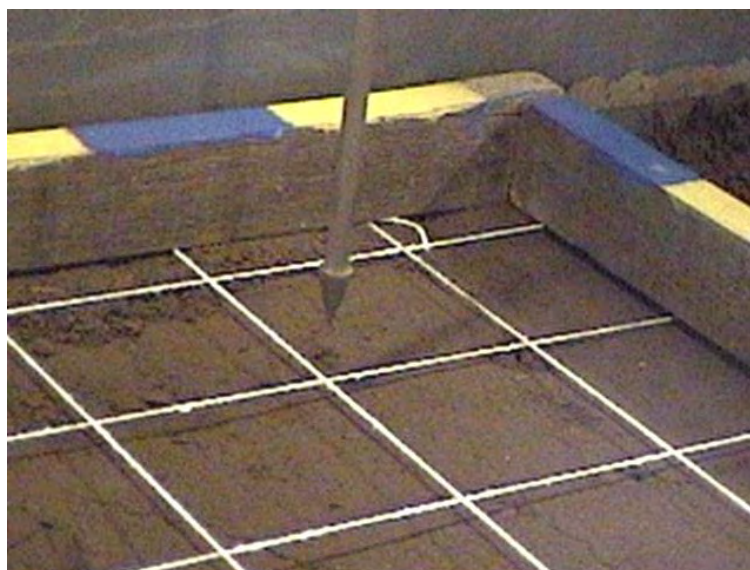


FIGURA 31. Determinação das linhas de resistência do solo à penetração.

Foram determinadas linhas de resistência do solo à penetração na área deformada pelo pneu no tanque de solo na diagonal maior e menor do pneu agrícola para cada força aplicada, conforme pode ser visualizado nas Figuras 32 a 39.

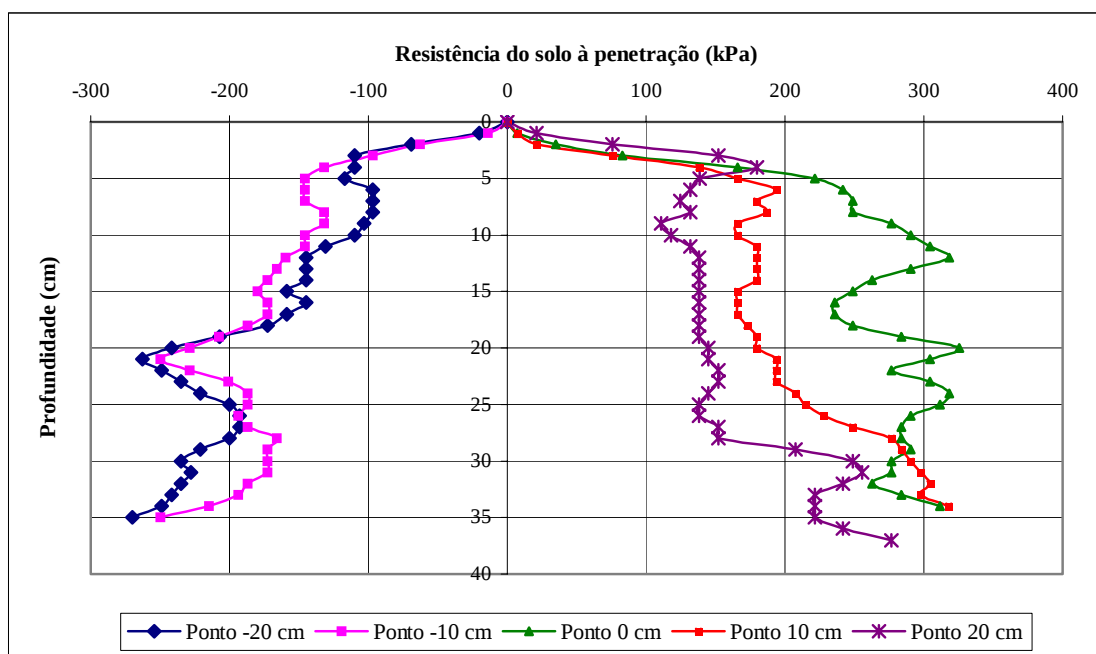


FIGURA 32. Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 0,5 kN (Diagonal menor).

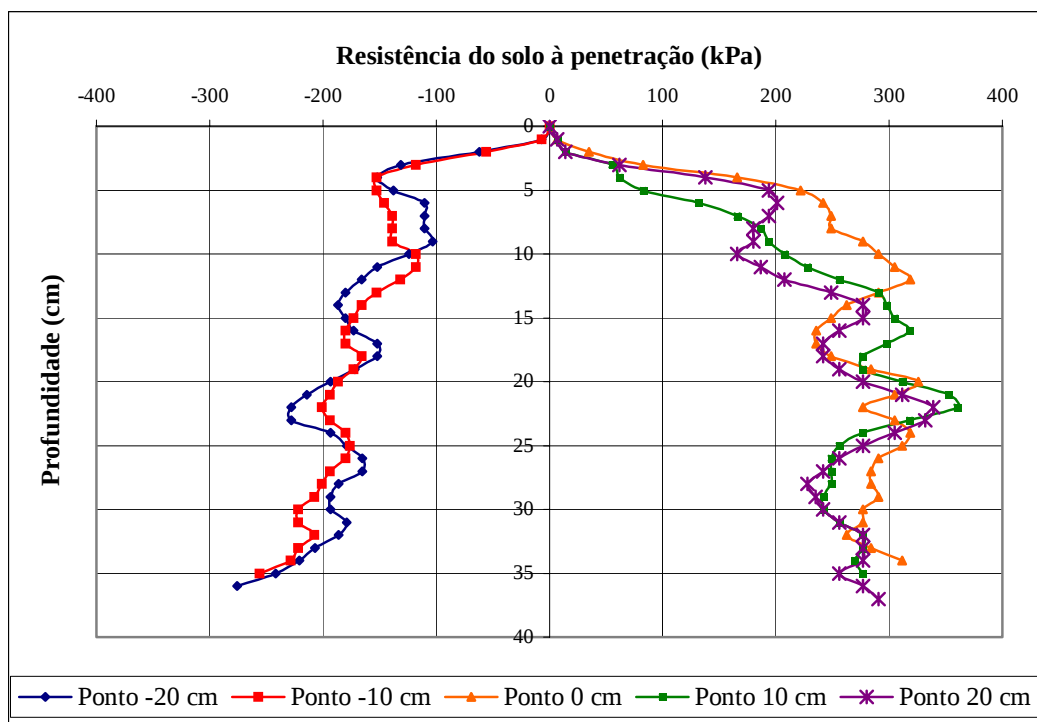


FIGURA 33. Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 0,5 kN (Diagonal maior).

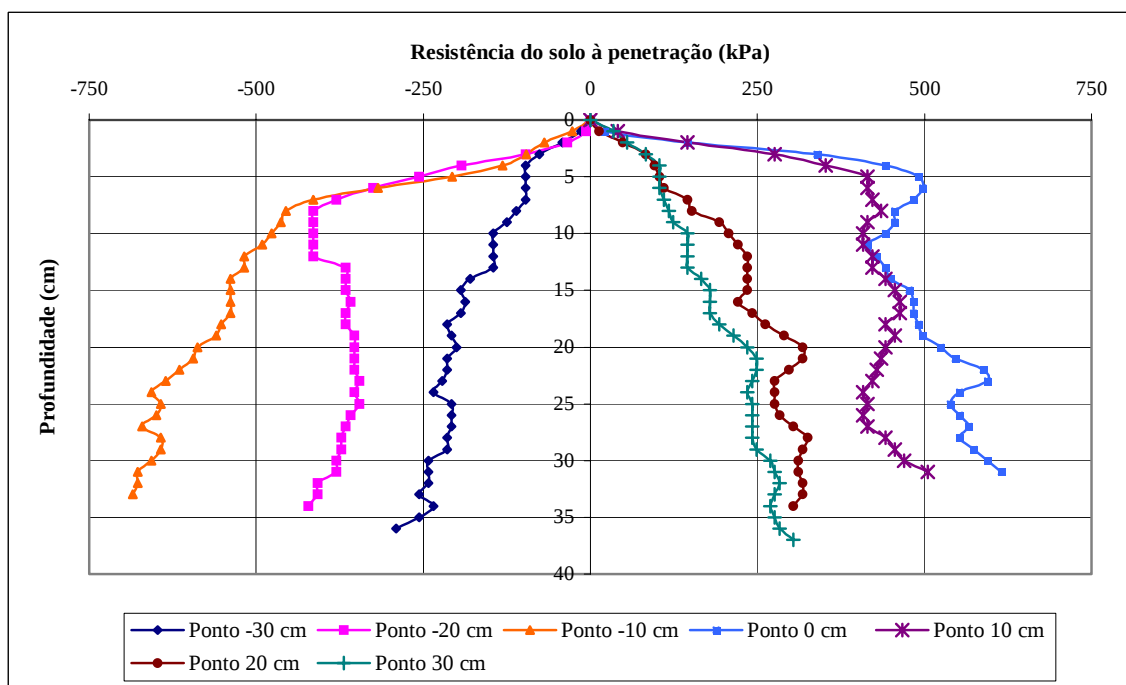


FIGURA 34. Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 1,0 kN (Diagonal menor).

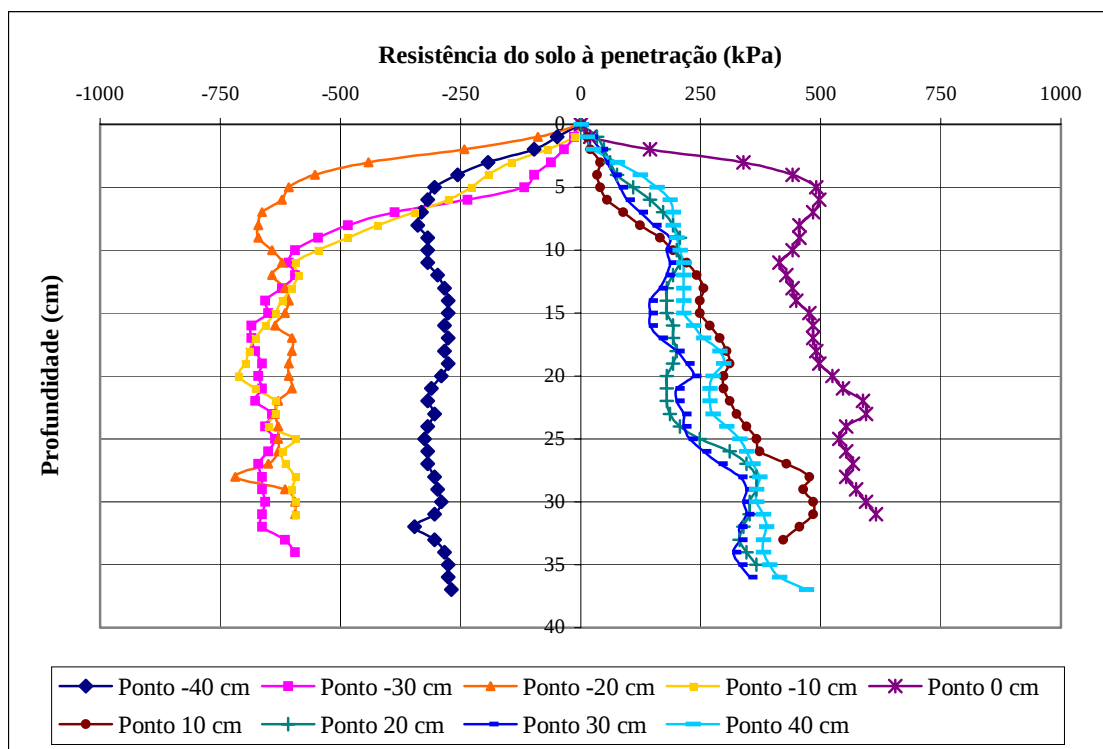


FIGURA 35. Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 1,0 kN (Diagonal maior).

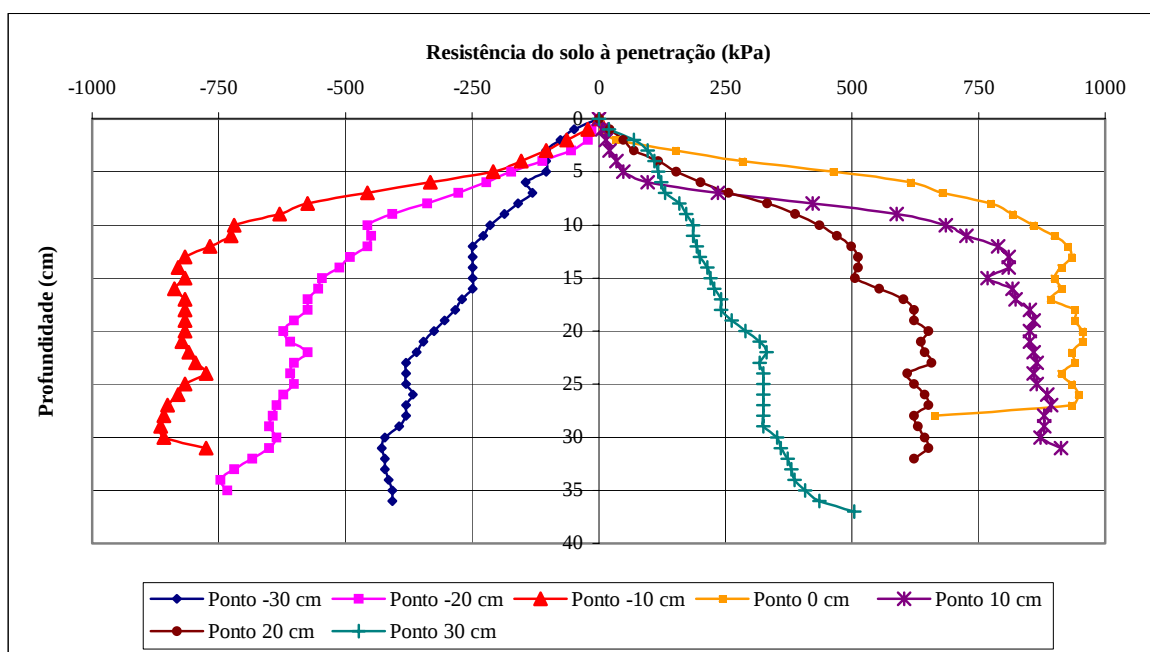


FIGURA 36. Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 1,5 kN (Diagonal menor).

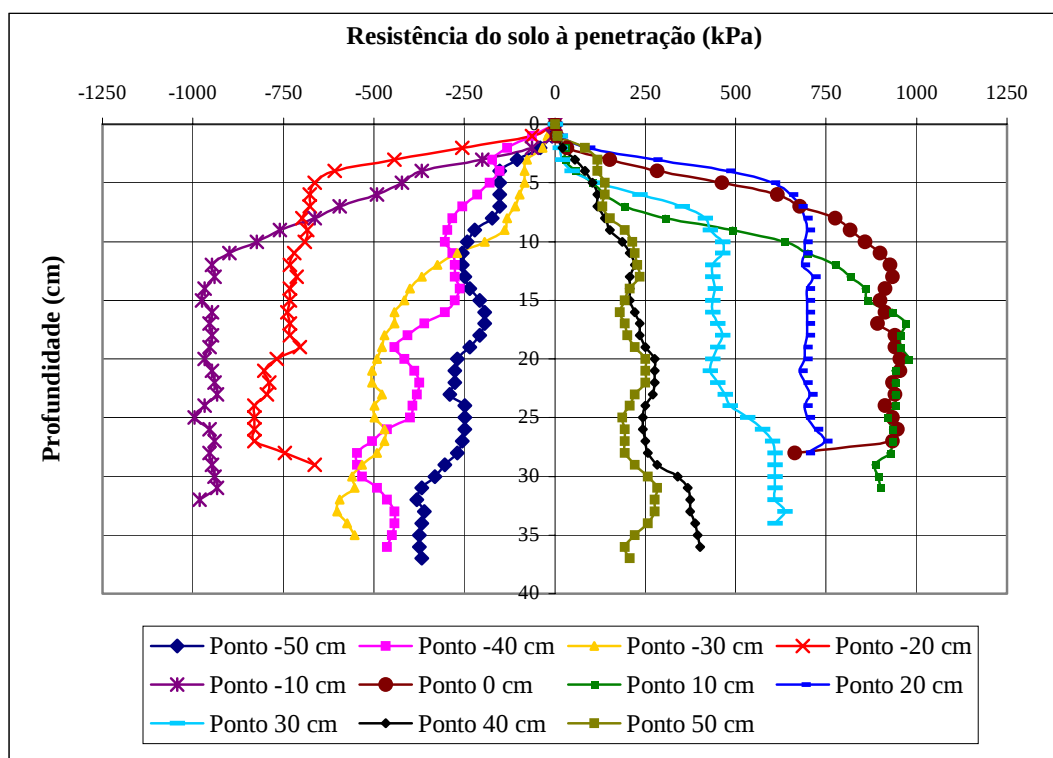


FIGURA 37. Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 1,5 kN (Diagonal maior).

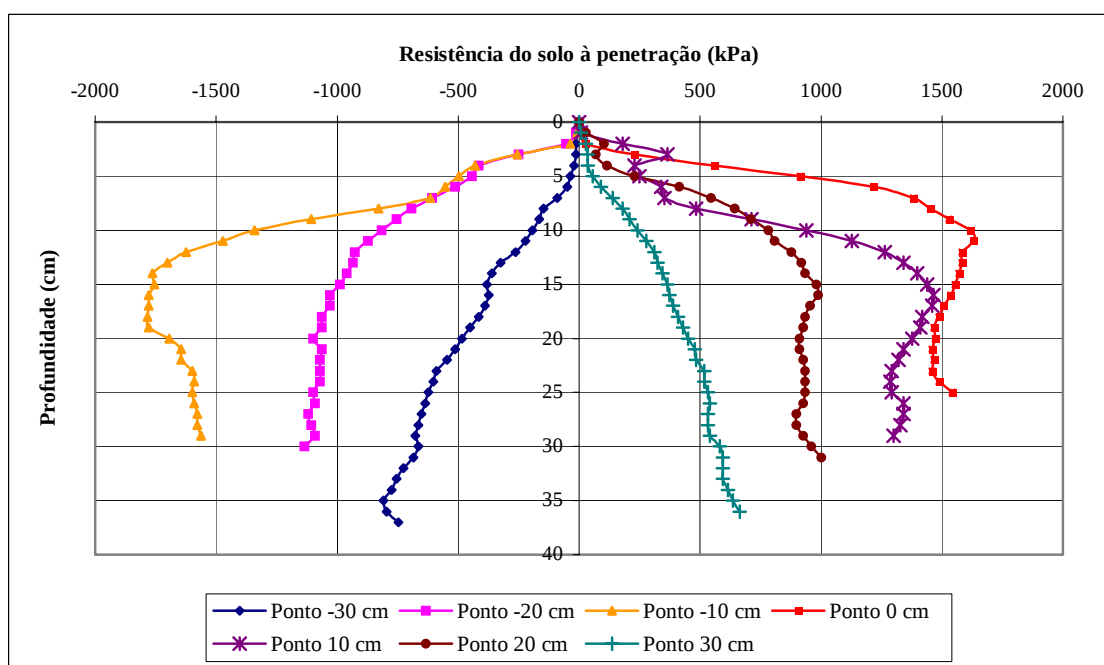


FIGURA 38. Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 2,0 kN (Diagonal menor).

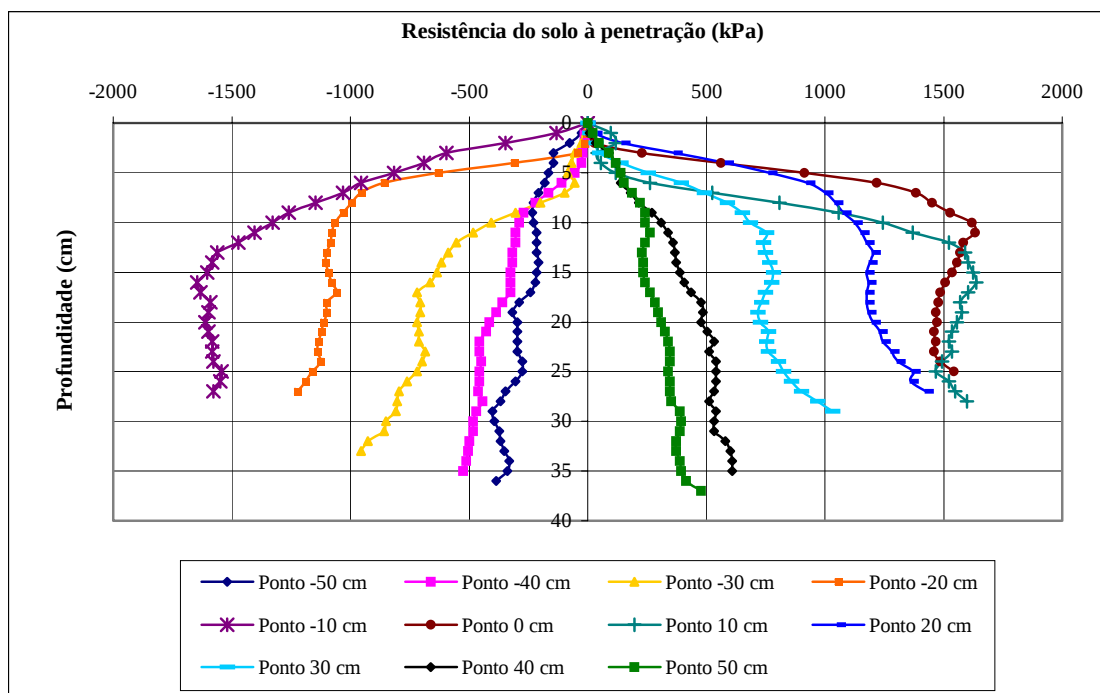


FIGURA 39. Linhas de resistência do solo à penetração no tanque através do penetrômetro elétrico-eletrônico para a força aplicada de 2,0 kN (Diagonal maior).

Pode-se observar pelas Figuras 32 à 39 que a distribuição de tensão imposta pelo pneu ao solo foi simétrica para todas as forças aplicadas pelo rodado. Fato este que pode ser atribuído aos teores de água e densidade do solo estarem homogêneos ao longo do perfil do tanque.

Conforme pode ser visualizado nas Figuras 32, 34, 36 e 48, os maiores valores de resistência do solo à penetração para as forças aplicadas 0,5 kN, 1,0 kN, 1,5 kN e 2,0 kN, foram respectivamente, 325,58 kPa; 670,54 kPa; 954,26 kPa e 1784,5 kPa, na diagonal menor da área de contato pneu-solo no tanque. Já, os maiores valores observados de resistência do solo à penetração na diagonal maior da área de contato pneu/solo no tanque para as forças aplicadas 0,5 kN, 1,0 kN, 1,5 kN e 2,0 kN, foram respectivamente, 359,7 kPa; 718,6 kPa; 996,12 kPa e 1646,5 kPa (Figuras 33, 35, 37 e 39). Portanto, o aumento das forças normais ao solo resultou em aumento dos valores de resistência do solo à penetração, o que foi detectado pela sensibilidade do penetrômetro elétrico-eletrônico, tanto na diagonal menor quanto na diagonal maior.

O penetrômetro elétrico-eletrônico operou de maneira satisfatória e rápida, entre 16 a 19 segundos por amostra. Resultados semelhantes foram obtidos por Santos (1998) no projeto e desenvolvimento de um penetrômetro hidráulico-eletrônico, onde o tempo gasto para avaliar a resistência do solo à penetração foi entre 18 e 20 segundos por amostra.

6.2.2 Comparação entre os valores de resistência do solo à penetração obtidos pelo penetrômetro elétrico-eletrônico e penetrógrafo manual

As comparações dos valores obtidos de resistência do solo à penetração pelo penetrômetro elétrico-eletrônico e pelo penetrógrafo manual com teor de água de $0,103 \text{ kg.kg}^{-1}$ e densidade do solo igual a $1,30 \text{ kg/dm}^3$ no tanque de solo, são mostradas nas Figuras 40, 41 e 42.

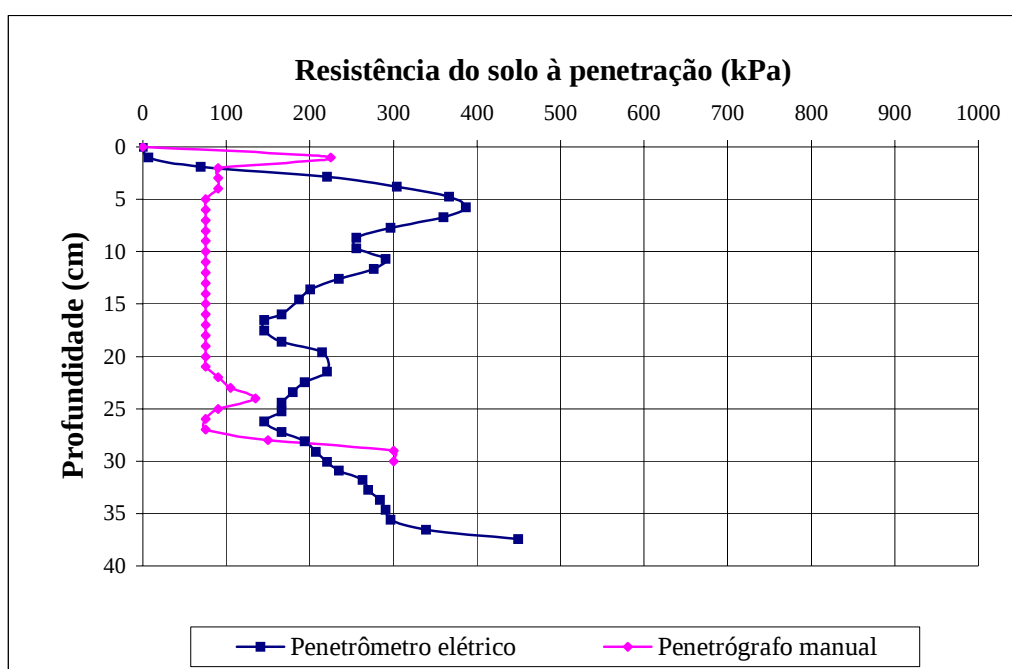


FIGURA 40. Resistência do solo à penetração para o penetrômetro elétrico-eletrônico e para o penetrógrafo manual fora da área de contato do pneu/solo no tanque.

Na avaliação da resistência do solo à penetração fora da área de contato pneu/solo, ilustrada na Figura 40, pode-se observar que o penetrógrafo manual não apresentou sensibilidade suficiente para detectar as diferenças de resistência do solo à

penetração entre as 4 camadas de solo existentes no tanque, enquanto o penetrômetro elétrico-eletrônico as diferenciou satisfatoriamente, indicando uma maior sensibilidade do penetrômetro elétrico-eletrônico em detectar pequenas diferenças de resistência do solo à penetração. Provavelmente, este fato se deve à constante velocidade de penetração do penetrômetro elétrico-eletrônico e a não interferência do operador na introdução do equipamento ao solo.

Vale ressaltar que no ponto de amostragem representado pela Figura 40, além de se tratar de um solo desestruturado, este não sofreu a influência do pneu, por estar fora da área de contato pneu/solo. Portanto, a maior variação da resistência do solo à penetração apresentada pelo penetrômetro elétrico-eletrônico sugere uma maior sensibilidade do equipamento, conforme o esperado.

As comparações entre o penetrômetro elétrico-eletrônico e penetrógrafo manual, dentro da área de contato do pneu/solo, são mostradas nas Figuras 41 e 42.

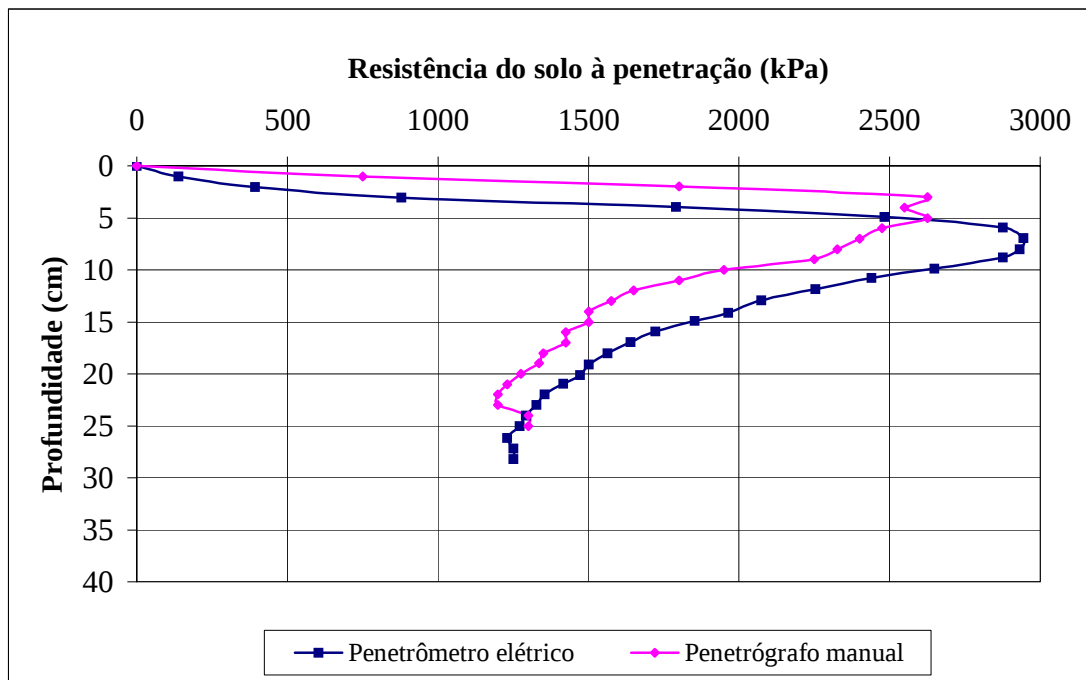


FIGURA 41. Resistência do solo à penetração para o penetrômetro elétrico-eletrônico e para o penetrógrafo manual dentro da área de contato do pneu/solo (fora da garra do pneu).

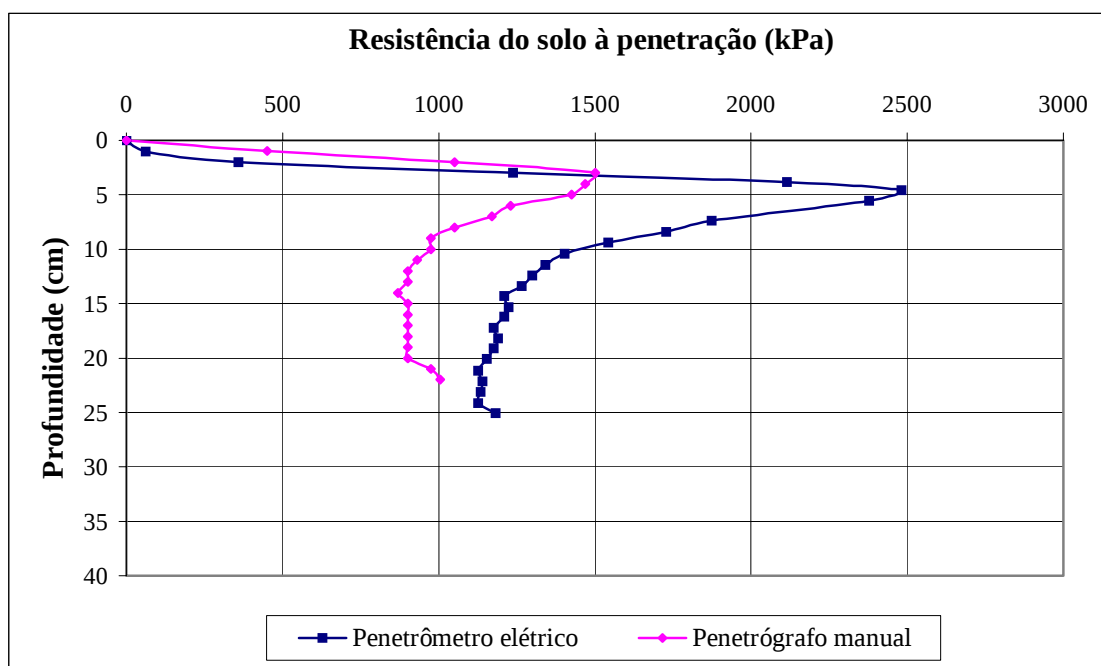


FIGURA 42. Resistência do solo à penetração para o penetrômetro elétrico-eletrônico e para o penetrógrafo manual dentro da área de contato do pneu/solo (dentro da garra do pneu).

Observando as Figuras 40, 41 e 42, o penetrômetro elétrico-eletrônico apresentou valores de resistência do solo à penetração maiores do que o penetrógrafo manual. Entretanto, estes resultados não conferem com Santos (1998), que comparou os valores obtidos em campo entre um penetrômetro hidráulico-eletrônico e penetrógrafo manual SC 60 para o Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho escuro, Latossolo Roxo e Terra Roxa estruturada, estando estes sob dois teores de água no solo (seco e úmido). Os resultados obtidos de resistência do solo à penetração pelo penetrômetro hidráulico-eletrônico foram menores do que os registrados com o penetrógrafo manual, em todas as situações amostradas no campo. Por outro lado, Camargo (1983), comenta que penetrômetros diferentes, em solos iguais apresentam valores diferentes de resistência do solo à penetração.

A Figura 43 mostra uma regressão linear simples feita para os dados de resistência do solo à penetração obtidos pelo penetrômetro elétrico-eletrônico e penetrógrafo manual.

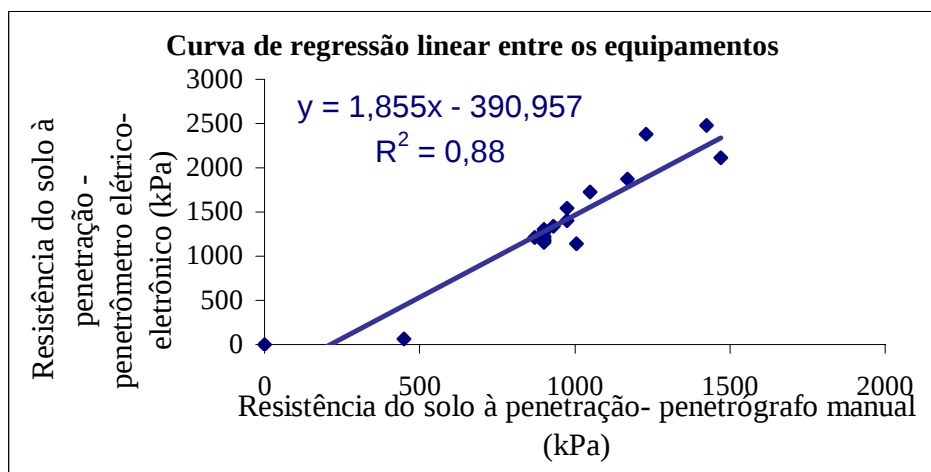


FIGURA 43. Relação linear simples entre o penetômetro elétrico-eletrônico e penetrógrafo manual.

Analisando a Figura 43, observa-se que o penetômetro elétrico-eletrônico e o penetrógrafo manual têm comportamentos semelhantes, ou seja, à medida que aumentam os valores de resistência do solo à penetração obtidos pelo penetômetro elétrico, aumentam também os valores obtidos pelo penetrógrafo. Desta forma, de posse dos valores pode-se estimar os valores de resistência do solo à penetração para o penetômetro elétrico e vice-versa de acordo com a equação de regressão descrita na Figura 43.

A Correlação de Pearson entre o penetômetro elétrico-eletrônico e o penetrógrafo manual foi positiva e significativa ao nível de 1% de probabilidade, sendo o coeficiente de correlação de 93,8%.

A maior resistência do solo à penetração detectada pelo penetômetro elétrico-eletrônico foi 2944,96 kPa, enquanto que, para o penetrógrafo manual a maior resistência detectada foi 2625 kPa (Figura 41).

Pode-se observar que, para uma mesma força (2,0 kN) imposta pelo pneu ao solo através da Prensa Hidráulica sobre o tanque, no mesmo tipo de solo e densidade, o penetômetro elétrico-eletrônico mostrou sensibilidade para diferenciar os teores de água do solo ensaiados.

7 CONCLUSÕES

- O penetrômetro elétrico-eletrônico operou de maneira satisfatória, rápida e sem a influência do operador em todas as situações ensaiadas, não apresentando problemas mecânicos, elétricos ou eletrônicos tanto na aquisição como no manuseio dos dados.
- A correlação positiva com coeficiente de correlação de 0,93 entre o equipamento desenvolvido e o penetrógrafo manual atestam de forma satisfatória o uso de penetrômetro elétrico-eletrônico em estudos de resistência do solo à penetração em tanques de solo
- Para uma mesma força imposta pelo pneu ao solo através da Prensa Hidráulica sobre o tanque, no mesmo tipo de solo e densidade, o penetrômetro elétrico-eletrônico mostrou sensibilidade suficiente para diferenciar os teores de água do solo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKRAM, M. & KEMPER, W.D. Infiltration of soils as affected by the pressure and water content at the time of compaction. **Soil Science Society American Journal**. Los Angeles v. 43, n. 6, p. 1080-86, 1979.

AMARAL, J.R. **Desenvolvimento e construção de um penetrógrafo eletrônico**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1994. 103p. (Dissertação - Mestrado em Agronomia/ Máquinas Agrícolas).

ASAE STANDARDS ASAE S313.2, **Soil Cone Penetrometer**, 1997 Standards Engineering Practices Data, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, EUA, 978p., 1997.

BALASTREIRE, L.A. **Máquinas Agrícolas**. 1ed. São Paulo: Editora Manole Ltda. 1990.307p.

BATCHELDER, D. G.; PORTERFIELD, J. G.; CHISHOLM, T. S.; McLAUGHLIN, G. L. A continuous linear soil bin. St Joseph: **Transaction of the ASAE**, , v.14, p. 1009-1010, Nov./Dec. 1971.

BAYLEY, A.C.; RAPER, R.L. & BURT, E.C. Soil stresses under tires with low inflation pressure. St. Joseph: **ASAE**, 1992. (Paper 921581).

BELTRAME, L.F.S.; GONDIM, L.A. P.; TAYLOR, J.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. Campinas: **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 5, n. 3, p. 145-149, 1981.

BEUTLER, A.N. & CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Revista PAB- Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.7, jul./2003.

BULINSKI, J.; MAJEWSKI, Z. Evaluating discrepancies in soil compaction measurement results under various test conditions. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 41, n. 3, 18 ref., p.201-210, 1998.

CAMARGO, O.A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Fundação Cargill. Campinas, 44p, 1983.

CAMARGO, O.A. de; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do Solo e o Desenvolvimento das Plantas**. Piracicaba, SP: O.A. Camargo, L.R.F. Alleoni, 1997. 132p.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **CR23X micrologger operator's manual**. Logan, 1998. não pag.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. Botucatu: FCA/UNESP, 2001. 155p. (Tese - Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura).

CHANCELLOR, W.J. **Compaction of soil agricultural equipment**. Bull. Div. Agric. Sci..Univ. Calif., n.1881, p.1-53, 1977.

CORREA, I.M. **Canais de Solo**. Piracicaba: ESALQ, 1990. 25p. (Apostila).

CRUZ, A.C.R.; PAULETTO, E.A.; FLORES, C.A.; SILVA, J.B.da. Resistência do solo à penetração em Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. In CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28, 2001. **Anais...**Londrina: EMBRAPA/SBSC, 2001. p.8.

DIAS JÚNIOR, M.S. **Notas de aula de Física do Solo**. Lavras: UFLA/Departamento de Física do Solo, 1996. 168 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (Rio de Janeiro, R.J.) – Brasília: EMBRAPA, Rio de Janeiro, 1999. 412p.

FAIRES, V.M. **Elementos orgânicos de máquinas**. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1966. 658p.

FERNANDES, H.C. **Máquinas de exploração florestal: compactação das trilhas e dias potencialmente úteis para o trabalho**. Botucatu: FCA/UNESP, 1996. 145p. (Tese - Doutorado em Agronomia/ Energia na Agricultura).

FERNANDES, H.C.; LANÇAS, K.P. Arraste de madeira e compactação do solo: Avaliação do conjunto Trator de pneus-guincho arrastador. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, v.3. **Anais...**Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998, p.19-21.

FERREIRA, M.C.D. **Compactação do solo por tráfego de máquinas de colheita em um plantio florestal de (eucalyptus saligna)**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1998. 83p. (Dissertação - Mestrado em Agronomia/ Máquinas Agrícolas).

GILL, W.R., VANDEN BERG, G.E. **Soil dynamics in tillage and traction**. Washington. USDA, 1967. 511 p. (USDA Agricultural Handbook, 316).

GODWIN, R.J.; SPOOR, G.; KILGOUR, J. The design and operation of a simple low cost soil bin. **Journal Agricultural Engineering Research**. n. 25, p. 99-104, 1980.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKAJURKIEWICZ, A.; et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 23-26, 1995.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. & SILVA, A.P. Resistência do solo à penetração sob diferentes condições de umidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, v.3. **Anais...**Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998, p.61-63.

LANÇAS, K.P. **A compactação do solo agrícola**. Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 1996a. 23 p.

LANÇAS, K.P. **Desempenho operacional de pneus radiais em função da pressão de inflação, da lastragem e do deslizamento das rodas de tratores agrícolas**. Botucatu: FCA/UNESP, 1996, 170p. (Tese - Livre Docência na disciplina de Mecânica Aplicada do Departamento de Engenharia Rural).

LANÇAS, K.P.; SANTOS, C.A. **Penetrômetro hidráulico-eletrônico equipado com DGPS para avaliação da compactação do solo**. In: BALBUENA, R.H.; BENEZ, S.H.; JORAJURIA, D. Ingenieria rural y mecanización agraria en el ámbito latino-americano. La Plata: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, 1998. p.570-6.

LANÇAS, K.P., SANTOS FILHO, G. & UPADHYAYA, S.K. Implication of using low/correct inflation pressure for radial ply tractor tires. St. Joseph, **ASAE**, 1995. (Paper AETC 95-056).

LANÇAS, K.P., CASTRO NETO, P., NAGAOKA, A.K., GUERRA, S.P.S. Índice de cone e mapas de isocompactação do solo agrícola, obtidos com a utilização de um penetrômetro hidráulico-eletrônico e um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS). In:

BALASTREIRE, L.A. **O estado da arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba, L.A. Balastreire, 2000a. p.113-23.

LEPORE, N.; STEFFEN, Jr. V. Experimental field-testing device for agricultural tools. In: **Experimental Techniques**. 1986. p.24-26.

LÉPORE, N.F.P.; STEFFEN JR. Estudo da redução da potência e da força de arraste num implemento agrícola vibratório. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA. 7. 1983. Uberlândia. Associação Brasileira de Engenharia Mecânica, 1999 p. 471-480..

LINS e SILVA, M.L., SVERZUT, C.B., DANIEL, L.A. Melhoramento eletrônico e hidráulico de um penetrógrafo para aplicação em laboratório e campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, v.3. **Anais...**Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998, p. 409-411.

MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário.**, Belo Horizonte, v. 13, n. 147, p. 52-5, 1987.

MAZIERO, J.V.G. **Compactação do solo por patinagem da roda motriz de um trator agrícola**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1993. 105p. (Dissertação – Mestrado em Agronomia/ Máquinas Agrícolas).

MAZIERO, J.V.G.; MIALHE, L.G.; CORRÊA, I.M.; YANAI, K. & MENEZES, J.F. Efeito da patinagem da roda motriz de um trator na compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p. 191-197, 1997.

MUNSON, K.L.; ERBACH, D.C. & BERN, C.J. Tire inflation and soil compaction. St. Joseph: **ASAE**, 1994 (Paper 941052).

NAGAOKA, A.K. **Desenvolvimento e avaliação do desempenho de um equipamento para ensaio dinâmico de rodado agrícola individual**. Botucatu: FCA/UNESP, 2001, 206p. (Tese - Doutorado em Agronomia/ Energia na Agricultura).

NIEMANN, G. **Elementos de máquinas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1971, v.1, 220p.

NIEMANN, G. **Elementos de máquinas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1971, v.2, 207p.

NIEMANN, G. **Elementos de máquinas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1971, v.3, 170p.

NOVAK, L.R. **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**. Viçosa: UFV, 1989, 58p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola/ Máquinas Agrícolas).

ORLANDO, R.C.; VIEIRA, L.B. & BARBOSA, J.A. Análise da Variabilidade do Índice de Cone para diferentes níveis de teor de água do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, v.3. **Anais...**Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p. 268-270.

ORTOLANI, A.F.; COAN, O.; SALLES, H.C. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja (*Glycine max* (L) Merrill). **Eng. Agrícola**, Botucatu, SP, v. 6, n.1, p. 35-42, 1982.

PORTAS e PORTÕES AUTOMÁTICOS, Ltda. *Manual do Técnico: Automatizador com Controle Digital Microprocessado para Portões de Garagem, Eurus 20*. Garça. 2002. 18p.

RAPER, R.L.; BAILEY, A.C.; BURT, E.C.; WAY, T.R. & LIBERATI, P. The effect of reduced inflation pressure on soil-tire in interface stress and soil strength. **Journal of Terramechanics**, v.32, n.1, p.43-51, 1995.

REIS, A.V.; MACHADO, R.L.T.; MACHADO, A.L.T. & GRINN, H. Variabilidade Espacial de Índice de Cone em Planossolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, v.3. **Anais...**Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p. 316-318.

ROSENBERG, N.J. & WILLITS, N.A. Yield and physiological response of barley and beans grown in artificially compacted soils. **Soil Science Society American Proc.** Madison, v. 26, p. 78-82, 1962.

SANTOS, C.A. **Projeto e construção de um penetrômetro hidráulico-eletrônico.** Botucatu, 1998. 105p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

SANTOS, P.I.B. **Determinação da Área de Contato Entre um Pneu Agrícola e uma Superfície Rígida Utilizando-se O Método dos Elementos Finitos e o Método da Prensa Hidráulica.** Botucatu: FCA/UNESP, 1999. 171p. (Dissertação – Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura).

SILVA, I.F.da.; KLAMT, E.; SCHENEIDER, P.; SCOPEL, I.. Efeitos de sistema manejo e tempo de cultivo sobre propriedades de cultivo sobre propriedades físicas de um Latossolo. In.: III ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, Recife-PE, 1981. **Anais.**

SILVA, V.R. da; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Resistência mecânica do sol à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.5, p.795-801, 2000.

SOUZA,Z.M., ALVES, M.C. Influência de usos e manejos na densidade do solo,porosidade e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho-Escuro de cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza-CE. **Separata...**Fortaleza-CE: SBEA, 2000. 3p.

SOUZA, Z.M., ALVES, M.C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p. 18-23, 2003.

STAFFORD, J. V. A versatile high-speed soil tank for studying soil and implement interaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Newcastle, n.24, p. 57-66, 1975.

TAVARES, G. **Avaliação da Caixa-de-Solo do DEG-UFLA como local para análise da interação Ferramenta-Solo**. Lavras: UFLA, 1995.36p. (Dissertação - Mestrado em Agronomia/ Solos e Nutrição de Plantas).

TAVARES, G. **Elementos orgânicos fundamentais de máquinas e implementos agrícolas**. 1. ed. Londrina: Ed. UEL, 1999. 247 p.

TAYLOR, H.M.; RATLIFF, L.F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of strength and soil water content. **Soil Science**, Baltimore, v. 108, n. 2, p. 113-19, 1969.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.& PARKER, J.J. Soil strength root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil. Science.**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

THIMOTEO, C.M.S.; BENINNI, E.R.Y.; MURATA, I.M.; TAVARES FILHO, J. Avaliação da compactação do solo em dois sistemas de cultivo sob Latossolo Vermelho. In CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28, 2001. **Anais...**Londrina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2001. p. 10

VAZ, C.M.P., BASSOI, L.H., HOPMANS, J.W. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, p.35-42, 2001.

VIEIRA, L.B., DIAS, G.P. **Penetrometria e caracterização física do solo**. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais/ Departamento de Engenharia Agrícola/Universidade Federal de Viçosa, 1997. p.1-22. (Caderno didático, 28).

VOORHEES, W.B.; SENST, C.G.; NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by traffic in the northencorn belt. **Soil Science Society American Journal**, Los Angeles, v. 42, n. 4, p. 344-49, 1978.

VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and naturl forces in alleviating wheel-induced soil compaction. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, p.129-133, 1983.

APÊNDICE

SUMÁRIO

1. Material utilizado para o preenchimento do tanque de solo	88
2. Balança de pesagem	88
3. Micrologger CR23X	89
4. Moto-redutor	90

1. Material utilizado para o preenchimento do tanque de solo

Para o preenchimento do tanque foram utilizados os seguintes equipamentos e ferramentas:

- a) Betoneira para homogeneização da umidade do solo, marca Fischer, motor 1/2 KW, 110 V, com capacidade para 120 L,
- b) Tambor de ferro para locomoção do solo, com capacidade para 200 L ou 260 kg,
- c) Sarrafo de ferro para nivelamento das camadas de solo,
- d) Peneira de malha com 8 mm de abertura para peneiramento e homogeneização do solo,
- e) Balança de precisão em kg para pesagem do solo
- f) Proveta para medição do volume de água a ser acrescentado no solo,
- g) Rolo compactador,
- h) Talha mecânica, com capacidade para 3ton,
- i) Ferramentas como: enxada, pá e colher de pedreiro que serviram para distribuição do solo no interior do tanque.

2. Balança de Pesagem

A balança utilizada para medição da amostra de solo, possuía as seguintes características:

Marca: J-STAR ELETRONICS

Distribuidor: CASALLI DO BRASIL S.A.

Modelo: 6000

Capacidade Bruta: 33240 N

Capacidade da Célula de Carga: 2 unidades de 33240 N

Indicador de Peso Digital, P/N 146771

Conversor de Energia de 110 V para 12 V, P/N 146030

3. Micrologger CR23X

Para a aquisição dos dados de força e profundidade, foi utilizado um Micrologger CR23X, onde, as características técnicas do sistema de aquisição de dados são mostradas no Quadro 1.

Quadro 1- Características técnicas do “micrologger” (Fonte: Catálogo do fabricante)

Características	Descrição
Fabricante	Campbell Scientific, Inc.
Modelo	CR23X
Entrada de canais analógicos	12 diferenciais e 24 não diferenciais
Canais contadores de pulso	4
Canais de saída com excitação comutada	4
Portas de controle digital	8 (voltagem 0 a 5 V)
Saídas analógicas contínuas	2
Resolução analógica	0,33 μ V
Bits analógicos para digital	14
Faixa de temperatura padrão ($^{\circ}$ C)	-5 a 50
Faixa de temperatura estendida ($^{\circ}$ C)	-55 a +80
Memória RAM	1 Megabyte
Valores de dados armazenados	570000 (em baixa resolução)
Dimensões	24 x 17,8 x 9,6 cm
Massa	3,8 kg

4. Moto-redutor

As características técnicas do moto-redutor para o acionamento do penetrômetro elétrico-eletrônico estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2- Características técnicas do moto-redutor. (Fonte: Manual do Técnico)

Característica	Descrição
Fabricante	PPA- Portas e Portões Automáticos Ltda
Alimentação	220 V
Fase	Mono
Frequência	60 Hz
Potência	¼ HP ou 0,25 cv
Rotação	1750 rpm
Redução	30:1
Proteção	IP 44
Temperatura de funcionamento	50 ⁰ C
Regime	S3
Capacitor	12 uf x 400V
Isolação	B
Peso do automatizador	9 kg
Peso máximo do portão	600 kg
Velocidade de abertura/fechamento	12 m/min (20 cm/s)