

Ladislau Marcelino Rabello

INSTRUMENTAÇÃO AVANÇADA PARA TOMADA DE  
DECISÃO NA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO À  
PENETRAÇÃO DE RAÍZES.

Tese apresentada à Escola de  
Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, como parte  
dos requisitos para a obtenção do Título  
de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador : Prof. Dr. Paulo Estevão Cruvinel

São Carlos

2003

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a  $\Lambda\Omega^1$ , aos meus pais, Antonio e Elda, a minha esposa Eliana e aos meus filhos Gabriela e Victor.

---

<sup>1</sup> Apocalipse 1;8

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço ao Dr. Paulo E. Cruvinel, pelas discussões, orientações, incentivo e direções tomadas no desenvolvimento deste trabalho;

Ao meu irmão Antonio Auro Rabello, pela qualidade e profissionalismo dos desenhos mecânicos;

Aos colegas Fabian Chiari, Luciano Koenigkan, Mauricio Pereira e Rafael Vieira, que dentro de suas especializações, enriqueceram com seus conhecimentos a qualidade deste trabalho;

Aos Professores, Dr. Sergio Mascarenhas e Dr. Silvio Crestana pelo constante incentivo ao desenvolvimento da instrumentação e novos métodos para a agropecuária;

Ao Professor Dr. Paulo Cesar Corsini pela participação nas discussões iniciais que motivaram o desenvolvimento do trabalho;

À Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Programa de Pós-graduação da Engenharia Elétrica, representado nesta oportunidade pelo Prof. Dr. Murilo Araujo Romero, aos Professores Dra. Vilma Alves de Oliveira e Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim pelo apoio institucional:

A Embrapa Instrumentação Agropecuária, nesta oportunidade, representada pelo Dr. Ladislau Martin Neto, Chefe Geral pelo suporte institucional e em particular aos colegas, Alessandra Siqueira, André Brassolatti, André Bugnolli, André Torre Neto, Dr. Carlos Vaz; Ednaldo Ferreira, Fabiana Crnkowise, Gilmar Victorino, Janis Baldovinotti, Jorge Novi, José Ferrazini, Dr. Luiz Alberto Colnago, Luis Godoi, Luiz Matteo, Moacyr Souza, Paulo Lasso, Valentim Monzane, Vicente Estevam Junior, Vicente Real Junior, Victor Bertucci Neto, Washington Barros Melo e a todos os colegas que de forma direta ou indireta colaboraram no desenvolvimento do trabalho.

A Embrapa Pecuária Sudeste, nesta oportunidade representada pelo Dr. Aliomar Gabriel da Silva seu Chefe Geral e aos colegas Dr. Rogério T. Barbosa e Dr. Odo Primavesi.

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um instrumento para auxílio à tomada de decisão em processos que envolvem avaliações da resistência do solo à penetração de raízes. Seu desenvolvimento fundamenta-se na concepção de uma nova ferramenta instrumental avançada, que viabiliza em tempo quase real informações para análise da variabilidade espacial da resistência do solo à penetração de raízes, tanto para área como para perfil, devido aos processos de compactação natural ou artificial do solo. Ensaios para a medida da resistência do solo à penetração de raízes podem ser realizados tanto em ambiente laboratorial como diretamente em campo agrícola. Para o desenvolvimento utilizou-se o enfoque da instrumentação inteligente, bem como uma microsonda (ângulo de cone de 30°, diâmetro de base de 1,6 mm e comprimento total de 30 mm) sensorizada por célula de carga. Resultados mostram que medidas de resistência do solo à penetração de raízes podem ser realizadas até um limite de  $(49,03 \pm 0,07)$ kgf com resolução de 1,57kgf. Adicionalmente, a versatilidade do sistema é verificada para a coleta de dados e interpretação da resistência do solo à penetração de raízes, uma vez que podem ser apresentados na forma de tabelas, gráficos unidimensionais, mapas bidimensionais e mapas tridimensionais. Desta maneira, o sistema possibilita ao usuário uma rápida interpretação sobre o estado de agregação do solo em áreas de cultivo agrícolas.

Palavras-chave : Sistemas inteligentes, instrumentação agropecuária, processamento de sinais, penetrômetros, microsonda, resistência do solo.

**ABSTRACT**

This work is presented an instrument for decision-making in agricultural processes based on the measurements and mapping of soil resistance to the root penetration. Its development was based on a new and advanced instrumentation tool, which enables in almost real-time to acquire the necessary information for spatial variability analysis of the resistance to root of plants penetration in soils, due to, either, natural or artificial compaction soil processes, i.e., not only for an area of soil but also to soil profile. The system allows soil resistance essays for both laboratory and agricultural field. Moreover, intelligent instrumentation concept was focused in the development, as well as a microprobe (30° for the spire angle, 1,6 mm for the base diameter, and 30 mm of total length), sensed by strain-gage transducers. Results have shown that measurements of soil resistance to root of plant penetration are allowed up to the limit of  $(49,03 \pm 0,07)$ kgf, with 1,57kgf of resolution. Additionally, the suitability of the system is verified for soil resistance data collection and its interpretation to root plant penetration, since they can be presented in format of tables, one-dimensional graphics, two-dimensional maps and three-dimensional maps. Therefore, this system allows to the users a fast interpretation of soil aggregation state in agricultural areas.

Keywords : Intelligent systems, agricultural instrumentation, signal processing, soil penetrometer, soil microprobe, soil resistance.

## LISTA DE FIGURAS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| FIGURA 1.1 | Perfil do solo ilustrando os horizontes de profundidade.....  | 5  |
| FIGURA 1.2 | Desenvolvimento radicular de plantas para solos compactado com densidades semelhantes.....  | 19 |
| FIGURA 1.3 | Efeito da pressão na ramificação das raízes, a esquerda, com obstáculo tanto na principal como nas laterais, no centro, sem obstáculos e a direita, obstáculo somente na principal.....                             | 20 |
| FIGURA 2.1 | Arquitetura convencional de um sistema de aquisição e controle. O computador central tem a responsabilidade exclusiva de gerar todos os estímulos apropriados e interpretar os resultado destes no experimento..... | 30 |
| FIGURA 2.2 | Arquitetura incorporando unidades inteligentes.....   | 30 |
| FIGURA 3.1 | Diagrama de um cone de penetrômetro e as forças atuando em um ponto qualquer sobre sua superfície. As componentes verticais das forças são mostradas a direita ao alto.....   | 44 |
| FIGURA 3.2 | Componente de adesão da resistência do penetrômetro em função do ângulo do cone(BENGOUGH, 1992).....  | 46 |
| FIGURA 3.3 | Diagrama representativo da microsonda com suas partes componentes (haste e cone de penetração)....  | 49 |
| FIGURA 3.4 | Varição de RSP em função da variação da densidade do solo para umidade de 4% e 11%, profundidade de 0,0168 m.....   | 51 |
| FIGURA 3.5 | Varição de RSP em função da umidade do solo para densidade igual a $0,1 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ e $1,2 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ e profundidade igual a 0,0168 m.....                                   | 51 |
| FIGURA 3.6 | Simulação da variação da medida de RSP em   |    |

|                |   |    |
|----------------|---|----|
|                | função da profundidade para um solo homogêneo tendo densidade igual a $0,408 \times 10^3 \text{ Kg.m}^{-3}$ e umidade igual a 8,2%.....   | 53 |
| FIGURA 3.7     | Simulação da variação da medida de RSP em função da profundidade para um solo não homogêneo tendo a densidade variada aleatoriamente entre 0 e $1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ e umidade igual a 8,2%.....  | 53 |
| FIGURA 3.8     | Simulação para avaliação da variação da medida de RSP em função de um perfil de solo, para umidade igual a 4%, profundidade igual a 0,0168 m e densidade variada aleatoriamente entre 0 e $1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ , plano bidimensional com valores de RSP normalizado na paleta de padrão de cinzas..... | 54 |
| FIGURA 3.9     | Comportamento da resistência solo-metal da eq. (10) em função do ângulo interno do cone.....  | 55 |
| FIGURA 3.10    | Derivada ponto a ponto dos dados da figura 3.9.....   | 55 |
| FIGURA 3.11    | Diagrama de bloco geral do sistema de medida de resistência do solo à penetração de raízes.....   | 57 |
| FIGURA 3.12    | Diagrama em bloco da parte mecânica do sistema de medida da resistência do solo à penetração de raízes.....   | 58 |
| FIGURA 3.13    | Barras do suporte da estrutura mecânica.....  | 59 |
| FIGURA 3.14(a) | Placas de união das barras do suporte da estrutura mecânica (motora).....   | 60 |
| FIGURA 3.14(b) | Placas de união das barras do suporte da estrutura mecânica (manual).....   | 61 |
| FIGURA 3.15    | Desenho dos sistemas de sustentação da estrutura mecânica.....  | 62 |
| FIGURA 3.16    | Desenho do sistema de posicionamento da microsonda, Mesa XYZ.....   | 63 |
| FIGURA 3.17    | Esquema mecânico da armação metálica ilustrando a armação central; o sistema de posicionamento da   |    |



---

|             |   |    |
|-------------|---|----|
|             | microsonda e os fuso de esfera.....   | 65 |
| FIGURA 3.18 | Sistema de deslocamento para o eixo Y, mostrado na parte superior a direita, e sistema de deslocamento para o eixo Z, ilustrado na figura como o sistema vertical a esquerda..... | 68 |
| FIGURA 3.19 | Sistema de medida de força, composto por célula de carga e microsonda.....  | 69 |
| FIGURA 3.20 | Microsondas desenvolvidas: a esquerda, microsonda com corpo rebaixado e a direita, microsonda sem rebaixo.....  | 70 |
| FIGURA 3.21 | Diagrama em blocos do sistema eletrônico do instrumento de medida de resistência do solo à penetração.....  | 72 |
| FIGURA 3.22 | Placa de circuito impresso para o microcontrolador 80535 e periféricos.....   | 73 |
| FIGURA 3.23 | Diagrama elétrico da placa microcontrolada.....   | 75 |
| FIGURA 3.24 | Esquema elétrico do circuito de controle dos motores.....   | 79 |
| FIGURA 3.25 | Esquema elétrico das fontes de alimentação: 5Vdc, +12Vdc e - 12Vdc.....   | 82 |
| FIGURA 3.26 | Esquema elétrico do circuito de leitura do sinal da célula de carga.....  | 84 |
| FIGURA 3.27 | Foto do instrumento para o mapeamento da resistência do solo à penetração de raízes.....  | 85 |
| FIGURA 3.28 | Foto do conjunto de medida de força do instrumento para o mapeamento da resistência do solo à penetração de raízes.....   | 85 |
| FIGURA 3.29 | Ambiente de desenvolvimento READS51, utilizado na programação do microcontrolador 80535.....  | 87 |
| FIGURA 3.30 | Diagrama de blocos representando a organização das rotinas constituintes da programação.....  | 88 |
| FIGURA 3.31 | Diagrama de bloco da máquina de estado do   |    |

---

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
|             | programa AUTOMATICO.C.....   | 92  |
| FIGURA 3.32 | Processo de aceleração e de desaceleração do motor.....  | 95  |
| FIGURA 3.33 | Diagrama de blocos representando as unidades de códigos que constituem o aplicativo para Win32.....  | 98  |
| FIGURA 3.34 | Interface com o usuário do aplicativo win32.....   | 99  |
| FIGURA 3.35 | Itens do menu Micropenetrômetro.....   | 100 |
| FIGURA 3.36 | Janela da função calibrar na interface com o usuário.  | 102 |
| FIGURA 3.37 | Menu <u>B</u> ase de Dados, <u>R</u> elatório e <u>S</u> air da interface com o usuário.....   | 103 |
| FIGURA 3.38 | Painel Medir Ponto, ao alto a esquerda na interface com o usuário.....   | 103 |
| FIGURA 3.39 | Painel Medir Região, ao alto no centro da interface com o usuário.....   | 104 |
| FIGURA 3.40 | Painel Dados, no canto esquerdo abaixo da interface com o usuário.....   | 105 |
| FIGURA 3.41 | Painel Leituras com as pastas Gráficos e Tabela, centro e abaixo na interface com o usuário.....   | 106 |
| FIGURA 3.42 | Painel Mensagem e barra para mensagem, canto inferior esquerdo da interface com o usuário.....   | 107 |
| FIGURA 3.43 | Tela principal do programa de visualização de imagem na interface com o usuário.....   | 108 |
| FIGURA 3.44 | Tela de reconstrução da imagem da camada de valor Z da caixa <i>Valor Z</i> , a área reservada para a imagem esta com aumento de 10x na interface com o usuário..... | 110 |
| FIGURA 3.45 | Exemplo de interpolação e aproximação por B-wavelets.....  | 113 |
| FIGURA 3.46 | Tela de visualização dos mapas tridimensionais.....  | 116 |
| FIGURA 3.47 | Menu <i>File</i> do programa de visualização volumétrica, ao alto a esquerda.....  | 117 |
| FIGURA 3.48 | Menu <i>Option</i> do programa de visualização volumétrica, ao alto a esquerda.....  | 118 |

---

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| FIGURA 4.1  | Erro percentual para os valores lidos na conversão analógica.....  | 125 |
| FIGURA 4.2  | Diferença entre o valor teórico de conversão do A/D e valor medido.....  | 126 |
| FIGURA 4.3  | Mapa de solos da Embrapa Pecuária Sudeste, com as áreas de coleta de amostras e de medidas (CALDERANO FILHO <i>et al.</i> , 1998).....   | 135 |
| FIGURA 4.4  | Ensaio com amostra de solo (LVd2), coletado com cilindro amostrador.....   | 137 |
| FIGURA 4.5  | Resultado de uma coleta de dados para perfil de um único sítio, ilustrando os dados no painel <i>Leituras em Tabela</i> .....  | 137 |
| FIGURA 4.6  | Resultado de uma coleta de dados para o perfil de um único sítio, ilustrando os dados no painel <i>Leituras em Gráfico</i> .....   | 138 |
| FIGURA 4.7  | Página de relatório fornecido pelo sistema de medida de resistência do solo à penetração de raízes (folha A4, escala 1:2,38).....  | 140 |
| FIGURA 4.8  | Amostra de solo não deformada em forma de bloco, para o ensaio de geração de mapa de RSPRxPosiçãoxProfundidade (amostra coletada na Embrapa Pecuária Sudeste, com coordenadas geofísicas : latitude s21°57'10,9591", longitude o47°50'35,8174")..... | 141 |
| FIGURA 4.9  | RSPRxPosiçãoxProfundidade, para as coordenadas X=440 e Y=120.....  | 144 |
| FIGURA 4.10 | Visualização da resistência do solo à penetração de raízes em uma camada na profundidade de 0,5 mm..   | 145 |
| FIGURA 4.11 | Visualização da resistência do solo à penetração de raízes em uma camada na profundidade de 7,0 mm..   | 145 |
| FIGURA 4.12 | Visualização da resistência do solo à penetração de raízes em uma camada na profundidade de 14,0 mm.....   | 146 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| FIGURA 4.13 | Visualização da resistência do solo à penetração de raízes em uma camada na profundidade de 29,0 mm.....   | 146 |
| FIGURA 4.14 | Visualização volumétrica da resistência do solo à penetração de raízes, em escala de cinza, da amostra de bloco de solo (Embrapa Pecuária Sudeste, latitude s21°57'10,9591", longitude o47°50'35,8174")..... | 148 |
| FIGURA 4.15 | Visualização de mapa 3D para uma selecionada faixa de RSPR, região de alta resistência do solo à penetração de raízes, faixa de 4,7 kg a 5,0 kg (46,10 kgf a 49,03 kgf).....                                 | 148 |
| FIGURA 4.16 | Visualização de mapa 3D para uma selecionada faixa de RSPR, região de baixa resistência do solo à penetração de raízes, faixa de 0,20 kg a 0,98 kg (1,96 kgf a 9,61 kgf).....                                | 149 |
| FIGURA 4.17 | Resultado com interpolação de 10 camadas entre as camadas de profundidade de 13,00 mm e de 16,00 mm.....   | 149 |
| FIGURA 4.18 | Ilustração de parte dos resultados de coleta de campo, com medidas de resistência do solo à penetração de raízes.....  | 152 |
| FIGURA 4.19 | Variação da resistência do solo à penetração de raízes em função da profundidade Z, para as coordenadas X=255 e Y=105.....   | 154 |
| FIGURA 4.20 | Ilustração de um perfil do solo amostrado no ensaio de campo, onde se observa menor agregação próxima a região superficial.....  | 159 |
| FIGURA 4.21 | Região de medida após o termino da coleta de dados, onde se observa à área ensaiada com a microsonda.....  | 159 |
| FIGURA 4.22 | Mapa tridimensional dos dados de resistência do solo à penetração de raízes coletados no ensaio de   |     |

---

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
|             | campo.....   | 160 |
| FIGURA 4.23 | Ensaio de campo : região de alta resistência do solo à penetração de raízes (de 45,11 kgf a 49,03 kgf).....              | 161 |
| FIGURA 4.24 | Ensaio de campo : região de valores médios de resistência do solo à penetração de raízes (de 22,55 kgf a 25,49 kgf)..... | 161 |
| FIGURA 4.25 | Ensaio de campo : região de baixa resistência do solo à penetração de raízes (de 0,58 kgf a 3,04 kgf)..                  | 162 |

## LISTA DE TABELAS

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| TABELA 1.1  | Limites de diâmetros (d) das partículas do solo.....  | 6   |
| TABELA 3.1  | Funções da porta 5.....   | 74  |
| TABELA 3.2  | Funções dos pinos da porta P1.....  | 76  |
| TABELA 4.1  | Avaliação do Erro do conversor A/D.....   | 122 |
| TABELA 4.2  | Avaliação do estudo do erro da medida de resistência do solo à penetração de raízes, de 0 kg a 1 kg.....  | 126 |
| TABELA 4.3  | Avaliação do estudo do erro da medida de resistência do solo à penetração de raízes, de 1 kg a 2 kg.....  | 128 |
| TABELA 4.4  | Avaliação do estudo do erro da medida de resistência do solo à penetração de raízes, de 2 kg a 3 kg.....  | 129 |
| TABELA 4.5  | Avaliação do estudo do erro da medida de resistência do solo à penetração de raízes, de 3 kg a 4 kg.....  | 131 |
| TABELA 4.6  | Avaliação do estudo do erro da medida de resistência do solo à penetração de raízes, de 4 kg a 5 kg.....  | 133 |
| TABELA 4.7  | Valores coletados em ensaio de uma amostra de solo (LVd2) (Embrapa Pecuária Sudeste, latitude s21°58'24,8916", longitude o47°50'55,194", altitude 903,75 m) pelo sistema de medida de resistência do solo à penetração raízes. X e Y são coordenadas do ponto de coleta e Z é a profundidade da microsonda no perfil de solo..... | 138 |
| TABELA 4.8  | Coordenadas para geração de mapas de RSPRxPosiçãoxProfundidade.....   | 142 |
| TABELA 4.9  | Variação do valor da força de penetração, tomando como exemplo três coordenadas.....  | 143 |
| TABELA 4.10 | Ensaio de campo – Coordenadas para medida de RSPR.....  | 151 |
| TABELA 4.11 | Dados reais coletados em campo, posição (75,195) e (255,105).....   | 152 |
| TABELA 4.12 | Seqüência de mapas bidimensionais das medidas de resistência do solo à penetração de raízes para os   |     |

---

|   |     |
|---|-----|
| dados coletados em campo, no intervalo de $Z=0,0$ a $Z=29,0$ , medidas em milímetros..... | 155 |
| TABELA 4.13 Densidade em função da profundidade do solo de medida.....                    | 157 |

**LISTA DE ABREVIATURAS**

|                   |  |
|-------------------|--|
| SICS              | Sociedade Internacional de Ciência do Solo   |
| DAEUA             | Departamento de Agricultura dos Estados Unidos   |
| ASAE              | Sociedade Americana de Engenharia Agrícola - American society of Agricultural Engineers  |
| SSI               | Integração em pequena escala – <i>Small Scale Integration</i>  |
| MSI               | Integração em média escala – <i>Medium Scale Integration</i>   |
| LSI               | Integração em larga escala – <i>Large Scale Integration</i>  |
| I/O               | Entrada/Saída - <i>Input/output</i>  |
| A/D               | Analógico – digital  |
| Watchdog          | Contador, temporizador para alarme   |
| TTL               | Lógica Transistor Transistor – <i>Transistor Transistor Logic</i>  |
| RAM               | Memória de acesso aleatório - <i>Random Access Memory</i>  |
| EMBRAPA           | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  |
| ISO.OSI           | Organização de normas internacionais/organização de sistema de interconexão aberto - <i>International Standard Organization's Open System Interconnect</i> |
| DSP               | Processador de sinais digitais – <i>Digital Signal Processor</i>   |
| 2D                | Duas dimensões   |
| 3D                | Três dimensões   |
| RISC              | Computador de conjunto de instruções reduzidas – <i>Reduced instruction set computer</i>   |
| MIPS              | Milhões de instruções por segundo  |
| SBC               | Computadores de placa única - <i>Single board computer</i>   |
| ROM               | Memória de somente leitura - <i>Read only memory</i>   |
| PC                | Computadores pessoais - <i>Personal computer</i>   |
| EPROM             | Memória de apenas leitura programável e apagável – <i>Eraseble programable read only memory</i>  |
| P&D               | Pesquisa e desenvolvimento   |
| RSP               | Resistência do solo à penetração   |
| RP                | Resistência de penetração do cone do penetrômetro  |
| cotag( $\alpha$ ) | Cotangente do ângulo   |



---

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| CPU                            | Unidade central de processamento                                      |
| $\overline{\text{RST}}$        | Reset negado  |
| CI                             | Circuito integrado  |
| Vref                           | Tensão de referência  |
| Agnd                           | Terra analógico   |
| $\overline{\text{WR}}$         | Escrita negado, controle de escrita em memória digital                |
| $\overline{\text{RD}}$         | Leitura negado, controle de leitura em memória digital                |
| RXD                            | Pino de recepção de comunicação serial                                |
| TXD                            | Pino de transmissão de comunicação serial                             |
| ALE                            | Habilita trava de endereço  |
| PSEN                           | Habilita guarda de programa   |
| UV EPROM                       | Memória de apenas leitura programável e apagável por luz ultravioleta |
| CMOS                           | Metal oxido semiconductor de simetria complementar                    |
| Vdc                            | Tensão contínua   |
| LTDA.                          | Limitada  |
| DC-DC                          | Conversão de tensão ou corrente contínua para contínua                |
| WIN32                          | Windows 32 bits   |
| ANSI                           | American National Standards Institute                                 |
| ODBC                           | Open data base connectivity   |
| dist                           | Distância   |
| dir                            | Direção   |
| ADDAT                          | Registrador de estoque do dado convertido pelo conversor A/D          |
| Min                            | Mínimo  |
| Inc                            | Incrementar   |
| Max                            | Máximo  |
| rpm                            | Rotações por minuto   |
| IBM-PC                         | Computador pessoal da IBM   |
| COMx                           | Porta de comunicação serial, x=1,2,3 e 4                              |
| RSPR                           | Resistência do solo à penetração de raízes                            |
| LVd2                           | Latosolo vermelho-amarelo distrófico (textura argilosa)               |
| cmol                           | cátion x mol  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido de ferro  |

|      |  |
|------|--|
| TRe3 | Terra roxa estruturada eutrófica latossólica com latossolo roxo distrófico |
| LVd4 | Latossolo vermelho-amarelo distrófico (textura média)                      |

**LISTA DE SÍMBOLOS**

|                   |  |
|-------------------|--|
| M                 | - material original de formação do solo, rocha                                     |
| T                 | - tempo de formação do solo, milhares de anos                                      |
| C                 | - clima para formação do solo  |
| t                 | - tipo de topografia para formação do solo   |
| O                 | - tipos de organismos vivos para formação do solo                                  |
| Fe                | - elemento químico Ferro   |
| Al                | - elemento químico Alumínio  |
| Ca                | - elemento químico Cálcio  |
| CO <sub>2</sub>   | - elemento químico Dióxido de Carbono  |
| d                 | - diâmetro de uma partícula de solo  |
| mm                | - milímetro – 1m/1000  |
| $\rho$            | - densidade do solo [kg.cm <sup>-3</sup> ]   |
| $\mu_m$           | - umidade do solo calculada a base de massa [kg.kg <sup>-1</sup> ]                 |
| $\theta$          | - umidade do solo calculada a base de volume [m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> ]    |
| $\alpha_p$        | - porosidade do solo [m <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ]                           |
| °C                | - graus Celsius  |
| Kg                | - Quilo grama  |
| cm <sup>-3</sup>  | - centímetros cúbicos [1/cm <sup>3</sup> ]   |
| mm                | - milímetros [1m/1000]   |
| Vdc               | - tensão contínua [Volts]  |
| min <sup>-1</sup> | - minutos, 1/min [1/60 de hora]  |
| cm <sup>2</sup>   | - centímetro quadrado  |
| cm                | - centímetros [1m/100]   |
| kgf               | - quilograma força   |
| %                 | - porcentagem  |
| MPa               | - Mega Pascal, 10 <sup>6</sup> Pascal [1 MPa = 1.019.716.213 kg.cm <sup>-2</sup> ] |
| cm <sup>3</sup>   | - centímetros cúbicos  |
| dm <sup>-3</sup>  | - decímetro cúbico, 1/dm <sup>3</sup> [1 dm <sup>3</sup> = 1000 cm <sup>3</sup> ]  |
| $\mu$ s           | - micro segundos, 10 <sup>-6</sup> segundos  |
| R <sup>2</sup>    | - coeficiente de correlação  |
| D                 | - profundidade do cone no solo [m]   |

---

|            |   |
|------------|---|
| Rc         | - raio da base do cone do penetrômetro [m]                        |
| r          | - raio interno do cone, entre a ponta e a base [m]                |
| dr         | - raio infinitesimal de um círculo a uma certa altura do cone [m] |
| dl         | - altura infinitesimal do cone [m]                                |
| L          | - comprimento da aresta do cone [m]                               |
| hc         | - altura do cone do penetrômetro [m]                              |
| Ff         | - força de fricção na parede do cone [N]                          |
| Fn         | - força normal na parede do cone [N]                              |
| $\alpha$   | - semi-ângulo do cone do penetrômetro [graus]                     |
| $\sigma_n$ | - tensão normal [N]   |
| $\mu$      | - coeficiente de fricção [adimensional]                           |
| <i>f</i>   | - força friccional  |
| $c_a$      | - força de aderência tangencial [N]                               |
| $h_a$      | - altura da haste do penetrômetro [m]                             |
| $m^{-3}$   | - $1/m^3$ , metro cúbicos   |
| M          | - Mega, $10^6$ unidades   |
| N          | - Newton, unidade de força  |
| $m^{-2}$   | - $1/m^2$ , metro quadrado  |
| X          | - coordenada cartesiana, eixo do X                                |
| Y          | - coordenada cartesiana, eixo do Y                                |
| Z          | - coordenada cartesiana, eixo do Z                                |
| Hz         | - Hertz   |
| MHz        | - mega Hertz, $10^6$ Hertz  |
| F          | - Farad, unidade de capacitância                                  |
| pF         | - pico Farad, $10^{-12}$ Farad                                    |
| $\mu$ F    | - micro Farad, $10^{-6}$ Farad                                    |
| Kbit       | - quilo bit, $10^3$ bit   |
| g          | - grama   |
| A          | - Ampère  |
| mA         | - mili Ampère, $10^{-3}$ Ampère                                   |
| V          | - Volts   |
| W          | - Watts   |
| mVdc       | - mili Volts dc, $10^{-3}$ Volts dc                               |

---

|            |   |
|------------|---|
| ms         | - mili segundos, $10^{-3}$ segundos         |
| dmm        | - deci milímetros 1mm/10                    |
| $\Omega$   | - Ohm, unidade de resistência elétrica      |
| M $\Omega$ | - mega Ohm, $10^6$ Ohm                      |
| G $\Omega$ | - giga Ohm, $10^{12}$ Ohm                   |
| pA         | - pico Ampère, $10^{-12}$ Ampère            |
| Ev         | - erro verdadeiro                           |
| Er         | - erro relativo                             |
| E%         | - erro percentual                           |
| pH         | - potencial hidrogeniônico                  |
| Ah         | - Ampère hora                               |
| keV        | - quilo elétron Volts, $10^3$ elétron Volts |

## SUMÁRIO

|   |       |
|---|-------|
| DEDICATÓRIA.....  | I     |
| AGRADECIMENTOS.....   | II    |
| RESUMO.....   | IV    |
| <i>ABSTRACT</i> .....   | V     |
| LISTA DE FIGURAS.....   | VI    |
| LISTA DE TABELAS.....   | XIII  |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....   | XV    |
| LISTA DE SÍMBOLOS.....  | XVIII |
| <br>  |       |
| CAPÍTULO 1 – Compactação de solos e desenvolvimento radicular de plantas.....   | 4     |
| 1.1 – Solos agricultáveis.....  | 4     |
| 1.2 – Compactação de solos.....   | 8     |
| 1.3 – Compactação e a resistência do solo à penetração de raízes.....   | 9     |
| 1.4 – Tipos de penetrômetros, penetrógrafos e micropenetrômetros.....   | 15    |
| 1.5 – Efeito da compactação no crescimento das raízes.....  | 18    |
| 1.6 – Reconhecimento da compactação.....  | 23    |
| <br>  |       |
| CAPÍTULO 2 – Instrumentação baseada em Inteligência nos processos de tomada de decisão do desenvolvimento radicular de plantas..... | 29    |
| 2.1 - Instrumentação baseada em inteligência.....   | 29    |
| 2.1.1 – Vantagens do uso de instrumentação inteligente.....   | 31    |
| 2.1.2 – Implementação de sistema inteligente.....   | 32    |
| 2.1.2.1 – Circuitos integrados expertos.....  | 32    |
| 2.1.2.2 – Microcontroladores.....   | 32    |
| 2.1.2.3 – Computadores de placa única.....  | 36    |
| 2.1.2.4 – Sistemas baseados em microcomputadores tipo PC-compatíveis.....   | 36    |

---

|   |     |
|---|-----|
| 2.1.2.5 – Sistemas de aquisição de dados.....   | 37  |
| 2.1.2.6 – Facilidades de desenvolvimento.....   | 37  |
| 2.2 – Conceito de tomada de decisão.....  | 38  |
| <br>  |     |
| CAPÍTULO 3 – Projeto do instrumento para o mapeamento da<br>resistência do solo à penetração de raízes..... | 41  |
| 3.1 – Modelagem para relacionar a medida da resistência do<br>solo à penetração.....                        | 41  |
| 3.2 – Organização e estrutura do instrumento de medida.....   | 55  |
| 3.3 – Módulo mecânico.....  | 56  |
| 3.4 – Microsonda.....   | 65  |
| 3.5 – Sensor de posição da microsonda.....  | 69  |
| 3.6 – Módulo eletrônico.....  | 69  |
| 3.6.1 – Circuito da placa microprocessada.....  | 71  |
| 3.6.2 – Circuito da placa de potência.....  | 76  |
| 3.6.3 – Circuito de leitura do sinal da célula de carga.....  | 81  |
| 3.7 – Desenvolvimento computacional e interface com o usuário.  | 84  |
| 3.7.1 – Desenvolvimento do programa computacional para o<br>microprocessador 80535.....                     | 84  |
| 3.7.1.1 – Programa PRINCIPAL.C.....   | 87  |
| 3.7.1.2 – Programa ADC.C.....   | 88  |
| 3.7.1.3 – Programa AUTOMÁTICO.C.....  | 89  |
| 3.7.1.4 – Programa MEDIDAS.C.....   | 89  |
| 3.7.1.5 – Programa MOTORES.C.....   | 91  |
| 3.7.2 – Interface com o usuário.....  | 95  |
| 3.8 – Programa computacional para visualização de imagem por<br>camada de penetração.....                   | 105 |
| 3.9 – Visualização volumétrica.....   | 108 |
| 3.9.1 – Interpolação por <i>spline-wavlets</i> .....  | 109 |
| 3.9.2 – Programa computacional de visualização<br>volumétrica.....  | 111 |
| <br>  |     |
| CAPÍTULO 4 – Resultados e conclusões.....   | 115 |

---

|   |     |
|---|-----|
| 4.1 – Calibração do instrumento.....  | 115 |
| 4.2 – Avaliação do conversor A/D do microcontrolador 80535.....   | 117 |
| 4.3 – Avaliação dos valores da medida de força do sistema de<br>medida de resistência do solo à penetração de raízes.....                     | 122 |
| 4.4 - Ensaio de laboratório com amostra de solo coletado em<br>cilindro amostrador.....   | 130 |
| 4.5 - Ensaio de medida em laboratório de uma amostra de bloco<br>de solo não deformado para geração de mapa<br>RSPRxPosiçãoxProfundidade..... | 136 |
| 4.6 - Visualização da base de dados com mapas bidimensionais.   | 140 |
| 4.7 – Visualização volumétrica da resistência do solo à<br>penetração de raízes no ensaio da amostra com bloco de solo<br>não deformado.....  | 143 |
| 4.8 - Medida de resistência do solo à penetração de raízes em<br>ensaio de campo.....   | 146 |
| 4.9 – Avaliação da estrutura mecânica do instrumento em<br>condições de campo.....  | 159 |
| 4.10 – Avaliação do sistema eletrônico em condições de campo..  | 159 |
| 4.11 – Avaliação da interface com o usuário.....  | 160 |
| 4.12 - Conclusões.....  | 161 |
| 4.13 Sugestões para trabalhos futuros.....  | 165 |
| <br>  |     |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 166 |
| APÊNDICE A.....   | 180 |
| APÊNDICE B.....   | 182 |
| APÊNDICE C.....   | 184 |



## **Capítulo 1**

### **Compactação de solos e desenvolvimento radicular de plantas**

Este capítulo aborda fundamentos sobre compactação de solos e sua importância em estudos do desenvolvimento radicular de plantas sob o ponto de vista macroscópico é também abordado neste capítulo uma revisão bibliográfica sobre as principais técnicas instrumentais para medida da compactação de solos votadas à diferentes escalas do desenvolvimento radicular.

#### **1.1 Solos Agricultáveis**

Na linguagem da Engenharia Agrônômica o solo pode ser definido como sendo a camada externa agricultável da superfície terrestre. A sua gênese dá-se com rochas, que, sob ações diversas como processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, através das eras geológicas, resultam em um material poroso de características próprias. Os seguintes fatores são componentes neste processo de gênese, ou seja, o material da rocha original (M); o tempo (T); o clima da região de formação (C); a topografia da região (t) e os organismos vivos (O).

O solo, em função da profundidade vertical, pode ser dividido em 4 partes chamadas de horizontes, conforme ilustrado na figura 1.1, sendo o horizonte A a camada superficial do solo composto em grande parte por

matéria orgânica em decomposição e substâncias húmicas<sup>1</sup>, o horizonte B é onde ficam os elementos químicos provenientes do horizonte A, tal como Fe, Al e Ca (ferro, alumínio e cálcio), o horizonte C é formado pelo material que deu origem ao solo e o horizonte D é a rocha matriz (REICHARDT, 1985).

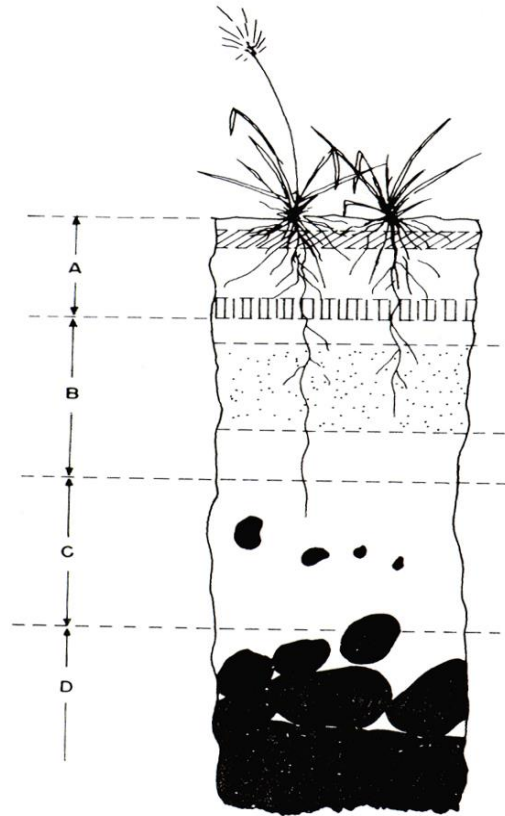


Figura 1.1 : Perfil do solo ilustrando os horizontes de profundidade.

Além das características já mencionadas, o solo é composto de uma parte sólida, líquida e gasosa sendo que a parte sólida é composta de material mineral originado da rocha matriz e a parte orgânica é composta de folhas, frutas, entre outras, que caem na superfície do solo. A parte líquida é composta por uma solução de sais minerais e também de compostos orgânicos. A parte gasosa é constituída de ar com grande porcentagem de CO<sub>2</sub> devido a grande atividade biológica que ocorre no meio

<sup>1</sup> Compostos orgânicos de origem animal e/ou vegetal em vários estágios de decomposição, que não apresentam características de substâncias orgânicas, STEVENSON(1994).

Como resultado da intemperização o solo foi sendo fragmentado em partículas dos mais variados tamanhos, sendo algumas visíveis a olho nu e outras necessitam de equipamentos apropriados. Quanto ao tamanho das partículas, o solo pode ser classificado em três classes, a saber : argila, limo e areia. O tamanho das partículas é definido como o diâmetro da esfera contido no maior comprimento da partícula.

A Tabela 1.1, mostra os limites das classificações segundo a Sociedade Internacional de Ciência do Solo (SICS) e do Departamento de Agricultura do Estados Unidos.

TABELA 1.1: Limites de diâmetros (d) das partículas do solo.

| DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS EM MILÍMETROS. |                    |                    |
|--|--------------------|--------------------|
| SICS                                   | DAEUA              | TIPO DE PARTÍCULA  |
| $d < 0,002$                            | $D < 0,002$        | ARGILA             |
| $0,002 < d < 0,02$                     | $0,002 < d < 0,05$ | LIMO               |
|  | $0,05 < d < 0,1$   | AREIA MUITO FINA   |
| $0,02 < d < 0,2$                       | $0,1 < d < 0,25$   | AREIA FINA         |
|  | $0,25 < d < 0,5$   | AREIA MÉDIA        |
| $0,2 < d < 2,0$                        | $0,5 < d < 1,0$    | AREIA GROSSA       |
|  | $1,0 < d < 2,0$    | AREIA MUITO GROSSA |
| $d > 2,0$                              | $d > 2,0$          | CASCALHO           |

Outro parâmetro bastante importante para a classificação do solo é a sua textura, que referencia à distribuição das partículas do solo que é a dada em função da sua porcentagem em argila, limo e areia.

A separação das partículas, para a medida da textura do solo, geralmente é feita peneirando-se o solo seco em seqüência de várias peneiras com diferentes espaçamentos entre grade, até o diâmetro de 0,05 mm. Para partículas menores é utilizado o método de sedimentação, que consiste em dispersar uma amostra de solo em solução aquosa e medir a velocidade de decantação.

A organização das partículas e agregados definem a estrutura do solo, ou seja, a disposição espacial dos componentes do sistema, uns com relação aos outros.

A estrutura define também a geometria dos espaços porosos, como o arranjo das partículas do solo é geralmente muito complexo para permitir qualquer caracterização geométrica simples, não existe meio prático para medir a estrutura do solo, assim o conceito de estrutura do solo é qualitativo.

Um solo bem agregado, ou estruturado, apresenta uma boa quantidade de poros de tamanho relativamente grande. Dizemos que possui alta macroporosidade, qualidade que afeta a penetração das raízes, circulação de ar, seu manejo do ponto de vista agrícola e a infiltração de água.

O solo possui poros dos mais variados tamanhos e formas, a parte do solo que mais determina seu comportamento físico é a de argila. Esta parte possui a maior área específica (área por unidade de massa) sendo a parte mais ativa em processos físicos e químicos que ocorrem no solo. Partículas de argila absorvem água e são responsáveis pelos processos de expansão e contração quando um solo absorve ou perde água. A areia e o limo tem áreas específicas relativamente pequenas, mas sua importância está na macroporosidade do solo onde predominam os fenômenos de capilaridade, quando o solo acha-se próximo à saturação.

Juntamente com a argila, o limo e a areia formam a matriz sólida do solo, ficando o ar e a água como fatores externos ao solo, que competem pelo preenchimento do espaço poroso.

Alguns parâmetros físicos macroscópicos são de grande importância para o estudo das propriedades do solo, tais como:

1. DENSIDADE DO SOLO ( $\rho$  em  $\text{kg.cm}^{-3}$ ) : É razão entre a massa total do solo seco pelo volume dos sólidos mais o volume de poros, sendo estes dois últimos definidos como volume total do solo,
2. UMIDADE OU TEOR DE ÁGUA NO SOLO: Este parâmetro pode tanto ser expresso à base de massa e ou à base de volume de água. No caso de Massa ( $\mu_m$  em  $\text{kg.kg}^{-1}$ ), é a razão entre a massa de água

pela massa de solo. Para Volume ( $\theta$  em  $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ ), é a razão entre o volume de água pelo volume total do solo.

3. POROSIDADE DO SOLO ( $\alpha_p$  em  $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ ) : Definida como sendo a razão entre o volume de poros pelo volume total do solo.

## 1.2 Compactação de solos

A compactação de solos agrícolas constitui, nos dias atuais, um dos maiores problemas e desafios à prática conservacionista de manejo. Devido a isto, o dilema de produzir intensivamente sem provocar compactação ou danos à estrutura do solo tem sido o tema central de várias discussões.

O aumento da produtividade e da área plantada no País têm sido conseguidos com a utilização de máquinas e implementos agrícolas cada vez maiores, mais potentes e mais pesados. A compactação dos solos devido ao mau uso desses equipamentos tem efeito cumulativo. Portanto, após vários anos de manejo numa determinada área, poderá surgir uma compactação no solos que afetará a dinâmica da água e de nutrientes, além de aumentar a obstrução ao desenvolvimento radicular e provocar uma aeração anormal (LINS E SILVA, 1999).

Entre os efeitos nocivos da compactação ressaltam-se a diminuição da altura das plantas, sintomas de deficiências nutricionais, susceptibilidade a períodos secos de curta duração, formação de camada impermeável, dificultando a infiltração da água e a aeração do solo e dificuldade para desenvolvimento vertical das raízes.

A existência de uma camada compactada, a compreensão do processo de compactação dos solos e a localização de camadas compactadas no perfil do solo são fundamentais para o planejamento da mecanização, sendo ponto determinante na escolha do manejo que melhor conserve o solo e proporcione produtividade economicamente aceitável.

Do ponto de vista prático, existem muitas dificuldades em se caracterizar e quantificar a compactação, de modo que se possa indicar ao agricultor o momento em que ele deve aplicar algum tipo de intervenção no solo. Para esta caracterização e quantificação, tem-se utilizado a técnica da penetrometria com penetrômetros dinâmicos de impacto e estáticos que apresentam velocidade de penetração constante.

A resistência do solo à penetração de raízes depende de diversos parâmetros como a densidade do solo ( $\rho$ ), o teor de umidade ( $\theta$ ), a matéria orgânica, a textura, a estrutura e outros. Entretanto, a densidade do solo e o teor de umidade do solo são os parâmetros mais relevantes que interferem em maior escala na resistência dos solos à penetração de raízes.

A resistência à deformação do solo, à penetração das raízes é freqüentemente inferida pela resistência à deformação do solo avaliada com penetrômetros.

### **1.3 Compactação e a resistência do solo à penetração de raízes**

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

- a) naturais, devido ao impacto das gotas de chuva, umidificação-secagem e tensão interna da água; e,
- b) artificiais, devidas às forças aplicadas ao solo por animais, máquinas agrícolas ou outros meios.

Geralmente as forças artificiais são de curta duração, pois os animais e os veículos agrícolas sempre estão em movimento. A análise da compactação causada por pneus, rodas e ferramentas não são de simples análise, pois a distribuição das tensões normais e de cisalhamento ocorre de forma não uniforme. A resistência do solo à penetração, medida por um penetrômetro com

cone, por exemplo, não depende exclusivamente da densidade do solo, pois a umidade tem efeitos significativos nos resultados.

A resistência do solo à penetração de raízes é um indicador indireto da compactação do solo, o que não é obtido por medição física direta sob qualquer condição do solo. Um solo está agronomicamente compactado quando a proporção do volume total de poros para o volume do solo é inadequado ao desenvolvimento de uma cultura ou manejo eficiente do campo. A compactação do solo pode ser avaliada em relação à porosidade, à densidade do solo e à resistência do solo à penetração de raízes. O melhor método direto para se determinar a compactação do solo é através do conhecimento da densidade do solo (relação entre o peso do solo seco a 105 - 110<sup>o</sup> C até peso constante e o volume total, expressa em Kg cm<sup>-3</sup>). A porosidade é o termo mais significativo para se usar na discussão da compactação de solos, pois esta fornece uma descrição direta da proporção de volume do solo disponível para a água e ar, necessários às raízes das plantas (MANTOVANI, 1987).

Segundo Balastreire, o solo exibe resistência à compressão volumétrica e à deformação linear de corpos estruturais. Em ambos os casos, a resistência de um determinado solo à penetração de raízes, a um dado teor de umidade, geralmente cresce com o aumento da compactação ou da sua densidade (BALASTREIRE, 1987).

Geralmente, os solos a uma certa densidade, mostram menor resistência à penetração quando sob um alto teor de umidade. Entretanto, o aumento característico da resistência do solo à penetração de raízes, com o aumento correlativo da compactação, é encontrado tanto com alto como com baixo teor de umidade. Outro fator que influencia a relação entre a resistência do solo à penetração de raízes e a compactação é a distribuição do tamanho de partículas no solo. Solos de textura fina (argilosa), principalmente após uma secagem parcial, mostram, a qualquer teor de umidade, um grande crescimento na coesão, com um aumento na resistência do solo à penetração, enquanto solos com textura grosseira (arenosos), a resistência do solo à

---

penetração de raízes aumenta com qualquer teor de umidade, com um crescimento correspondente na compactação. Solos de textura fina freqüentemente têm uma resposta semelhante, mas ocasionalmente não há modificação nas características de atrito com aumento na compactação.

Silva e colaboradores concluíram que em umidades mais elevadas do solo, há uma pequena variação da resistência do solo à penetração respondendo por uma faixa maior de variação da densidade do solo. Para umidades menores, há uma maior variação da resistência do solo à penetração de raízes respondendo por uma faixa menor de variação da densidade do solo (LINS E SILVA *et al.*, (1995).

O aumento da resistência (dureza) e da compactação do solo, com a conseqüente diminuição da condutividade hidráulica, são condições ideais para os propósitos da construção civil (MCKEYS, 1989). Estes efeitos são opostos aos desejados em solos agrícolas, pois um aumento da resistência do solo à penetração de raízes implica em se aumentar a energia necessária para o preparo deste, dificultando o desenvolvimento radicular das plantas. A redução da condutividade hidráulica do solo leva a uma redução da capacidade de drenagem interna o que prejudica o sistema radicular das plantas por falta de aeração. Apesar de todas as considerações, a determinação da densidade ótima do solo para a máxima produção agrícola é complexa, pois depende da combinação solo, planta e clima. A compactação ideal é aquela que permite o máximo de conservação de umidade nas raízes das plantas nos períodos secos. Entretanto, deve viabilizar uma drenagem mínima o suficiente para permitir a presença de oxigênio nas raízes durante os períodos úmidos.

Para Rolston e colaboradores, a variação da força nas crostas superficiais, podem trazer influências significativas nas propriedades físicas, no controle dos processos de infiltração, difusão de gases, evaporação e germinação das sementes, além de se verificar que mudanças nas condições de campo, como fendas, organismos vivos, coberturas com plantas e resíduos também provocam variações nas medidas, podendo haver aumento ou



decréscimo da força conforme as características do solo (ROLSTON *et al.*, 1991).

Segundo Foluronso e colaboradores, há uma hipótese que as culturas podem ser fortemente influenciadas pela força da crosta e pela infiltração, pois os acúmulos pelo impacto de energia das gotas de água seja por chuva, ou por métodos de irrigação, acarretam em problemas de erosão e germinação. Neste contexto tem-se a importância da utilização de um penetrômetro, que é um mecanismo essencial para se obter medidas precisas de força, relacionando-se com as características do solo. Este autor também verificou que um micropenetrômetro mostrou-se capaz de detectar em diferentes micro-escalas na resistência da crosta às imediatas conseqüências na fixação da taxa de infiltração de água no solo (FOLURONSO *et al.*, 1992).

Para Bradford, o método dinâmico tem limitadas aplicações em ciência do solo (BRADFORD, 1986). Mesmo assim os cientistas de solo têm se preocupado em relacionar a resistência à penetração, avaliada por modelos diferentes de penetrômetros, com desenvolvimento e distribuição radicular, produção de culturas e propriedades físicas. A resistência à deformação do solo à penetração das raízes é freqüentemente inferida pela resistência à deformação do solo avaliada com o penetrômetro. Trabalhos que vêm sendo desenvolvidos, como por exemplo, por Cruvinel, Maciel e seus colaboradores, em escala de micropenetrômetria, focaram a preocupação de estudar o efeito residual de diferentes sistemas de cultivo no desenvolvimento radicular do milho (*Zea mays L.*), (CRUVINEL *et al.*, 1989); (MACIEL JUNIOR *et al.*, 1999), mostrando que o desenvolvimento radicular dessa planta, de alguma maneira não pode ser relacionada aos valores de resistência do solo à penetração. Esta condição é facilmente observada em estudos da dinâmica do crescimento de raízes, em perfis culturais, procurando relaciona-los à estrutura do solo. Trabalhos desenvolvidos mostraram que a relação desenvolvimento radicular/resistência do solo à penetração não é tão estreita, pois observou-se um sistema radicular bem desenvolvido em uma camada de maior resistência do solo à penetração e uma das razões citadas por Bradford é que numa maior estrutura do solo cuja resistência do solo à penetração é alta, existem zonas de

menor resistência que podem estar associadas com poros e planos de fraqueza (BRADFORD, 1980).

Quanto ao uso de micropenetrômetro, este, descrito por Rolston e colaboradores, foi desenvolvido para medir a força na superfície do solo e indiretamente medir características da superfície do solo cultivado, podendo fazer medidas diretamente no campo, como no laboratório, pois é um aparelho portátil e seus dados são transmitidos diretamente para um micro computador, que pode ser facilmente acoplado ao aparelho, além disto, o micropenetrômetro possibilita fazer medidas em poucos milímetros ao longo de um metro de distância. A ponta de prova tem (1.6 mm) de diâmetro, sendo que a profundidade máxima alcançada, pode chegar a 30 mm, variando em torno de 0.1 mm. O aparelho funciona com bateria de 12Vdc, e o movimento horizontal e vertical do micropenetrômetro é feito através do uso de um motor elétrico, trabalhando em média com uma velocidade de penetração de  $8\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , além disto Rolston e colaboradores constataram que equipamento utilizado em áreas compactadas, irrigadas, inundadas, com vegetação natural, etc, comprovou a capacidade em detectar e qualitativamente determinar diferenças na força da superfície do solo influenciando vários fatores. Diferenças devido às administrações práticas seja com a implantação de vários tipos de soluções no solo, qualidade da água de irrigação, e os métodos de irrigação foram refletidos em diferentes resistências do solo à penetração na superfície o qual foi expressado na força máxima ou no trabalho total de penetração.

Grant e colaboradores utilizaram um micropenetrômetro, como o testado por Rolston, para caracterizar a estrutura do solo através de cores (GRANT *et al.*, 1985). Larney e colaboradores desenvolveram um controle para um micro computador portátil, que monitorava constantemente as medidas feitas pelo cone do micropenetrômetro, conseguindo caracterizar os efeitos da força do solo e compactação (LARNEY *et al.*, 1989).

Pesquisas tem sido conduzidas para se entender a influência de densidade e teor de água do solo na resistência do solo à penetração em nível

de laboratório, (MIRREH e KETCHESON, 1972); (AYERS e PERUMPAL, 1982); (AYERS e BOWEN, 1987); (OHU *et al.*, 1988), e em campo, (SIMMONS e CASSEL, 1989); (VAZQUEZ *et al.*, 1991). Taylor e colaboradores mostraram que a penetração radicular diminui com o aumento da densidade para um determinado potencial de água no solo e determinaram que, a uma mesma densidade, a penetração diminui com a diminuição da umidade. A diminuição no conteúdo de água aumenta a resistência do solo, fazendo com que as raízes em expansão experimentem um impedimento mecânico cada vez maior (TAYLOR e GARDENER, 1963).

Em estudos, de laboratório e campo, relações empíricas e teóricas foram obtidas. Dentre os diversos modelos propostos para testar essas relações. Busscher e colaboradores sugeriram algumas equações de potência e exponenciais como sendo as mais adequadas para explicar a dependência da resistência do solo à penetração com densidade do solo e teor de água (BUSSCHER *et al.*, 1997). Entretanto, a maioria desses estudos carece de dados representativos e precisos, pois a resistência do solo à penetração é uma propriedade do solo altamente variável, determinada localmente em medidas de pequena escala. Portanto, dificuldades em relacionar a resistência do solo à penetração com outros parâmetros do solo podem ser atribuídas principalmente à variabilidade espacial, visto que as técnicas disponíveis não possibilitam a determinação dos diferentes atributos do solo (resistência do solo à penetração, densidade do solo, teor de água, matéria orgânica, textura e outros) num mesmo ponto.

Visando minimizar essas dificuldades, têm sido desenvolvidos equipamentos de penetrômetria combinados com sensores de umidade para a determinação simultânea da resistência do solo à penetração e umidade ao longo do perfil dos solos, (YOUNG *et al.*, 1998); (ADAMS *et al.*, 1998); (NEWMAN e HUMMEL, 1999); (VAZ *et al.*, 1998); (VAZ *et al.*, 2001); (VAZ e HOPMANS, 2001). Dessa forma, dados de resistência do solo à penetração obtidos em diferentes condições de umidades poderão ser normalizados para uma umidade padrão, colaborando nos processos de determinação da compactação de solos.

#### 1.4 Tipos de penetrômetros, penetrógrafos e micropenetrômetros

Gill, Vanderberg e Preumpal descreveram um penetrômetro desenvolvido pela Estação Experimental de Waterways em 1948, que utiliza um cone circular de  $30^{\circ}$  com uma área da base de  $1,61\text{cm}^2$ , montado em uma haste graduada de 91,4 cm de comprimento e diâmetro de 0,95 cm. O equipamento desenvolvido é portátil e o esforço para penetrar o cone no solo é medido por uma mola calibrada, cuja deformação aciona um ponteiro em um visor, indicando a força por unidade de área. A leitura deve ser feita a cada instante, observando a profundidade do cone na graduação da haste (GILL e VANDERBERG, 1967); (PERUMPAL, 1987).

Carter e Hendrick em 1967 e 1969, respectivamente, desenvolveram e apresentaram dois penetrógrafos bastante semelhantes, que consistiam de uma haste com cone na sua extremidade, acoplada a uma mola previamente calibrada (CARTER, 1967); (HENDRICK, 1969). A força necessária para deslocar o cone no solo produzia uma deformação proporcional na mola; um sistema mecânico de posicionamento, por intermédio de uma caneta, registrava em um gráfico o deslocamento da mola e a respectiva profundidade do cone, gerando um gráfico com o índice de cone do solo em função de profundidade. Os referidos pesquisadores, na época, salientavam a importância de se obter um registro gráfico deste tipo de dados, reduzindo erros de leitura e exigindo menos homem-hora de trabalho no campo.

Prather e colaboradores projetaram e desenvolveram um penetrógrafo, com força máxima de 90,7Kgf, em faixas de 0 a 22,68 Kgf, 0 a 45,36 Kgf e 0 a 90,72 Kgf, alcançando a profundidade máxima de penetração de (60,96 cm), o cone utilizado de  $30^{\circ}$  com área da base de  $1,61\text{cm}^2$  com peso máximo do equipamento de (4,54 Kgf), registrador X – Y com área útil de desenho de 10,16 x 15,24 centímetros e precisão de  $\pm 2\%$  do fundo de escala de cada faixa (PRATHER *et al.*, 1970). Na construção do equipamento foi utilizada uma

célula de carga e um potenciômetro de precisão de múltiplas voltas, como transdutores de força e posição, respectivamente. Os autores concluíram que todos os objetivos do projeto foram cumpridos, sendo o penetrógrafo muito simples de ser operado por uma única pessoa.

Williford e colaboradores construíram um penetrógrafo para utilização no campo, montado em um trator. O sistema possuía uma estrutura que permitia obter dados em uma profundidade de trabalho de até 101,6cm; os dados de força eram medidos por uma célula de carga e a profundidade do cone obtida a partir de um potenciômetro de precisão de multi-voltas; os sinais analógicos provenientes dos transdutores de força e posição eram grafados em um registrador X – Y. O cone era impulsionado para dentro do solo, com o auxílio de um cilindro hidráulico com curso de 60,96 cm. Após dois anos de uso do equipamento os autores não encontraram qualquer tipo de problema mecânico ou operacional no penetrógrafo, concluindo que com o equipamento desenvolvido o tempo de aquisição de dados de Índice de Cone é de 25% do utilizado por penetrógrafos manuais, o que se deve à facilidade e à simplicidade operacional obtidas nos trabalhos de campo, utilizando-se o penetrógrafo hidráulico (WILLIFORD *et al.*, 1972).

Bengough e colaboradores afirmam que, freqüentemente, mais da metade da resistência do solo à penetração por sondas é constituída pelo atrito solo-metal, que varia entre 40% e 80% da resistência total. Muitas tentativas foram realizadas para eliminar a resistência causada pelo atrito solo-metal, e o penetrômetro rotativo é uma destas tentativas. O equipamento possui o funcionamento igual ao do convencional, porém a haste de penetração gira enquanto penetra no solo; deste modo a rotação reduz a resistência à penetração, porque a resistência de fricção em qualquer ponto da superfície de penetração está agindo em direção oposta ao do vetor velocidade de penetração, de tal forma que quanto mais rápida é a rotação, menor é a componente de resistência de fricção do solo na direção da penetração (BENGOUGH *et al.*, 1991).

Balastreire e Amaral, em 1994, construíram um penetrógrafo eletrônico portátil, com as suas funções controladas por um microprocessador Z80, com o sistema controlando as leituras dos sensores de força e profundidade. Os dados são armazenados até um total de 99 curvas com 200 pontos cada, e posteriormente estes dados são transferidos para um microcomputador, onde são processados e analisados. A análise e discussão dos resultados obtidos os levaram a concluir que o sistema possibilita grande economia de tempo no processamento das informações, elimina a possibilidade de erros no momento da leitura das informações, por intermédio do processo visual (normalmente utilizado nos penetrômetros convencionais), proporciona ao usuário possibilidade de reestruturar os resultados finais em função dos seus objetivos, uma vez que dados originais não são alterados, atende plenamente aos requisitos inicialmente preestabelecidos e representa uma grande evolução tecnológica em relação aos métodos de determinação do índice de cone utilizados, até então, no Brasil (BALASTREIRE e AMARAL, 1994).

Medidas de força da crosta foram feitas utilizando-se o penetrômetro em laboratório por Taylor e Callebaut, e respectivos colaboradores, que desenvolveram um operador elétrico com formato de uma agulha que penetrava e fazia as medidas de força na superfície do solo e avaliava em ordem os fatores que afetavam a germinação das sementes, (TAYLOR *et al.*, 1966); (CALLEBAUT *et al.*, 1985).

Em 1995 Moreira e colaboradores construíram um penetrômetro portátil em que os sinais provenientes do transdutor de força e do transdutor de posição são gravados em um *data logger* de baixo custo, utilizando material de fácil aquisição e com boa precisão, (MOREIRA *et al.*, 1995).

Silva e colaboradores, seguindo as recomendações dimensionais para a construção e utilização de penetrômetros e penetrógrafos da American Society of Agricultural Engineers (ASAE, 1978), desenvolveram um penetrógrafo hidráulico com aquisição eletrônica de dados. O equipamento é montado no engate de três pontos, categoria dois dos tratores agrícolas, e é acionado hidráulicamente para a penetração do cone no solo. Os sinais analógicos dos

transdutores de força e posição são condicionados, transformados em digitais e gravados em um coletor de dados. O equipamento permite regular e ser operado a uma velocidade constante na penetração do cone no solo, eliminando os erros provenientes da variação de velocidade durante a amostragem, fato comum nos penetrógrafos manuais, que não possuem controle de velocidade. O equipamento é de fácil utilização no campo e possui um eficiente controle de velocidade de penetração (LINS E SILVA *et al.*, 1995).

A American Society of Agricultural Engineers mediante a recomendação ASAE R313.1 padronizou o uso do penetrômetro para fins agrícolas considerando as seguintes dimensões para suas construções:

a) cone circular com ângulo sólido de  $30^{\circ}$ , área da seção de  $3,2 \text{ cm}^2$  ou 20,7 mm de diâmetro, haste de penetração com diâmetro de 15,9 mm, recomendado para uso em solos soltos;

b) cone circular com ângulo de  $30^{\circ}$ , área da seção da base de  $1,3 \text{ cm}^2$  ou 12,83 mm de diâmetro, haste de penetração com diâmetro de 9,5 mm, recomendado para uso em solos firmes.

### **1.5 Efeito da compactação no crescimento das raízes**

A raiz ao encontrar um poro, só conseguirá se expandir se for capaz de exercer uma força suficiente para aumentar o poro ou diminuindo seu diâmetro de forma a se ajustar ao diâmetro do poro. Na realidade segundo alguns experimentos a raiz tende a aumentar seu diâmetro forçando a passagem, experimentos como o de Wiersum, em 1957, que cultivou várias plantas em tubos de diferentes diâmetros e solo compactado com a mesma densidade de solo, (WIERSUM, 1957), conforme ilustrado na Figura 1.2.

Neste experimento pôde-se observar que a resposta à penetração da raiz diminui com a diminuição do diâmetro do tubo, devido ao aumento da resistência do meio.

Asady e colaboradores realizaram estudos levando em consideração a razão entre o número de raízes que conseguem atravessar a camada de compactação e o número de raízes que inicialmente penetraram nesta camada, observando que quanto maior é esta razão maior será a produção, ou seja, com melhores condições do espaço poroso do solo permitem as raízes uma maior penetração na camada compactada, permitindo maior absorção de água e nutrientes, e conseqüentemente um aumento na produção (ASADY *et al.*, 1985).

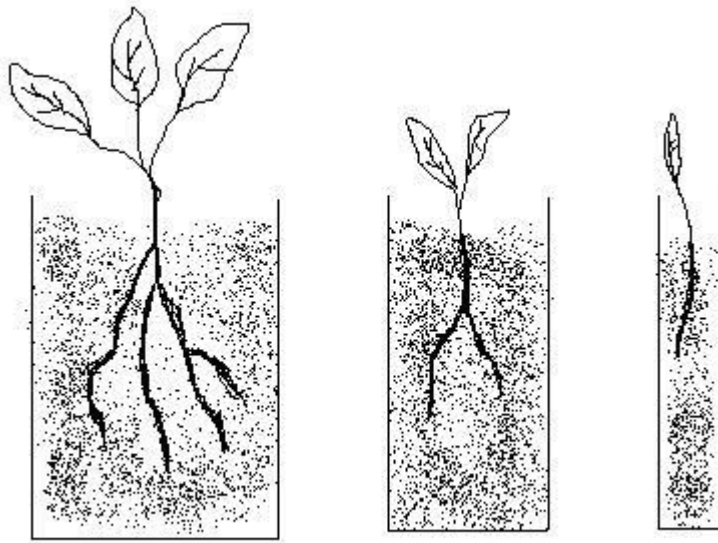


Figura 1.2 : Desenvolvimento radicular de plantas para solos compactados com densidades semelhantes.

O crescimento radicular é bastante influenciado pelas forças externas e internas ao meio, sabe-se que a raiz pode exercer uma pressão de até 0,9 a 11,3 MPa sobre as paredes dos poros, porém, o mais importante é saber quanto o meio exerce de pressão sobre a raiz que pode reduzir o alongamento radicular, Russel e Gross, em 1974, realizaram um estudo aplicando pressões externa a uma plantação de cevada. Aplicando uma pressão de 0,02 MPa, a extensão radicular ficou reduzida a metade e para uma pressão de 0,05MPa, reduziu de um quinto a extensão radicular. Isto pode variar de acordo com a cultura, mas mostra como a pressão do meio externo pode também influenciar no crescimento das raízes (RUSSEL e GROSS, 1974).



Como a compactação provoca diminuição no tamanho dos poros prejudicando a passagem da raiz principal, a planta, então, começa a formar raízes laterais para passar pelos poros. Se a dificuldade de penetração for tanto para a raiz principal como as laterais, toda a raiz ficará definhada, ficando neste caso totalmente coberta por pêlos radiculares, conforme ilustrado na Figura 1.3.

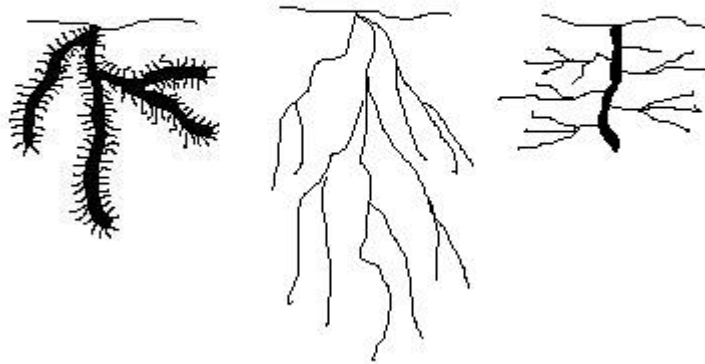


Figura 1.3 : Efeito da pressão na ramificação das raízes, a esquerda, com obstáculo tanto na principal como nas laterais, no centro, sem obstáculos e a direita, obstáculo somente na principal.

A raiz principal ao encontrar uma camada compactada, dificultando sua expansão, começa um desenvolvimento lateral muito denso e raso que, em condições de campo dificilmente sobreviria em situações de seca. Onde podemos ver que em solo de alta resistência, a raiz terá seu crescimento afetado devido compactação e a falta de água e nutrientes.

Em condições de campo, a raiz da planta pode se desenvolver em solos cujo arranjo espacial de partículas sólidas e vazios seja uniforme ou naqueles cuja estrutura sofra descontinuidade.

Para solos com estruturas uniformes, se estes não possuem poros contínuos maiores que o diâmetro da raiz, ela se desenvolverá dependendo da resistência que lhe for imposta.

Desde que haja poros suficientemente grandes, as raízes podem se desenvolver em solos com alta resistência, (AUBERTIN e KARDOS, 1965). A presença dos macroporos permite às raízes atravessarem camadas de solos que seriam normalmente impenetráveis e terem acesso a um bom reservatório de água e nutrientes móveis.

Quando o solo é compactado, o diâmetro dos poros grandes é reduzido, a resistência mecânica aumenta e a aeração pode ficar deficiente, sendo que estes três fatores podem agir de maneiras diferentes para cada situação (BOONE *et al.*, 1985).

O impedimento mecânico não é a única maneira pela qual a umidade influi no crescimento radicular em solos compactados. A concentração de oxigênio também tem efeito no crescimento radicular em níveis baixos de compactação, (HOPKINS e PATRICK, 1970), mas para níveis altos, a concentração do oxigênio tem pouca influência, visto ser a resistência mecânica que praticamente controla o crescimento radicular.

Para solos com descontinuidade estruturais que não apresentam, normalmente, vazios de tamanho e formas uniformes, mas sim, descontinuidade estruturais dentro de seu perfil, constituindo ambientes bem diferentes para o desenvolvimento radicular que podem ser:

- a) rachaduras verticais, onde apresenta-se uma resistência zero ao crescimento causando uma concentração radicular nessa região;
- b) unidades estruturais muito desenvolvidas, que apresentam um padrão de densidade e aeração diferente da massa do solo, ocasionando um crescimento distinto entre as unidades e dentro das unidades;
- c) camadas horizontais altamente endurecidas.

Apesar de várias pesquisas serem direcionadas a compactação, ainda é difícil de se ter uma explicação exata sobre a resposta das plantas em relação a

compactação, nas principais culturas. Sabe-se que uma leve compactação é benéfica para determinadas culturas quando comparado a solo extremamente solto e desagregado, mas para alto níveis de compactação o resultado é prejudicial as plantas, tais como:

- a) germinação e brotação mais lenta;
- b) redução no estande;
- c) menor peso e altura e
- d) menor produção por área

Os efeitos da compactação nas culturas ainda são difíceis de se identificar, mas sabe-se que podem ser atribuídos a uma aeração baixa e a resistência mecânica em solos densos e à baixa disponibilidade de água e nutrientes em solos pouco densos. Nenhuma relação geral pode ser feita entre dependência do crescimento da planta e condições físicas do solo (CAMARGO, 1997).

Além do tamanho e a continuidade do sistema poroso, outros fatores podem ser encontrados em campo, uma ou mais fases como descritas abaixo, que podem afetar o crescimento radicular:

- a) Fase A : solo com sistema amplo de macroporos permitindo fácil penetração radicular e boa permeabilidade ao ar e à água;
- b) Fase B : solo comprimido o suficiente para reduzir o volume dos macroporos e causar uma pequena redução na alongação radicular;
- c) Fase C : o tamanho dos macroporos é bem mais reduzido que na fase B, a resistência do solo aumenta e o fluxo de ar é prejudicado. A alongação é diminuída , assim como a distribuição de raízes finas;
- d) Fase D : o tamanho e a continuidade dos poros são seriamente reduzidos, sendo a alongação radicular diminuída pela metade, comparada a fase A. Neste caso a ramificação tende a se desenvolver nas fraturas existentes;
- e) Fase E : algumas raízes se desenvolve neste solo e quando o faz, faz pelos planos de fraturas. Normalmente se desenvolve uma raiz

grande que é comprimida pelo solo de tal modo que as ramificações não conseguem penetrá-lo, ficando no canal radicular;

- f) Fase F : raras raízes conseguem penetrar o solo nesta fase, as que conseguem não tem alongação e ficam confinadas nos planos de fraturas;
- g) Fase G : não há crescimento de raízes nesta fase.

A compactação pode predispor o solo a algumas injurias devidos a herbicidas, fungicidas ou inseticidas, de longo efeito residual, ocorrendo mais em culturas de rotação, ficando retidas no solo causando problema na próxima cultura. Também pode aumentar a severidade de sintomas de algumas doenças. Quando as condições ambientais previnem a expressão total das doenças, a compactação pode ajudar a diferenciar cultivares resistentes de susceptíveis.

Uma camada compactada é mais persistente quanto maior for a profundidade em que ela se encontra. Dependendo de fatores pedogenéticos do solo (expansão e contração de argilas), fatores climáticos (congelamento e degelo), atividade biológica de microrganismos e sistema de manejo adotado (HAKANSSON e REEDER, 1994).

Para profundidades maiores que 40 cm, a compactação é considerada permanente, apesar de ela ocasionar menores perdas na produção quando comparada a camada compactada nos primeiros 25 cm, mas em condições de veranico, quando as raízes necessitam explorar um maior volume de solo, os prejuízos podem ser grandes caso o solo compactado em subsuperfície impeça o pleno desenvolvimento radicular.

### **1.6 Reconhecimento da compactação**

A presença de compactação em solos pode ser observada pelos sintomas apresentados por plantas, podendo apresentar (CAMARGO, 1997):

- a) emergência lenta da plântula;

- b) plantas com tamanhos variados, sendo de baixa estatura a mais predominante;
- c) plantas de coloração deficientes;
- d) sistema radicular raso e
- e) raízes mal formadas com incidência de pêlos absorventes.

Com relação ao solo podemos ter os seguintes sintomas:

- a) formação de crosta superficial;
- b) fendas nas marcas das rodas do trator;
- c) zonas compactadas de superfície;
- d) empoçamento de água;
- e) erosão excessiva pela água;
- f) aumento da necessidade de potência de máquinas para cultivos e
- g) presença de restos de resíduos não decompostos meses após a incorporação.

Observando-se estes sintomas, tanto na planta como diretamente no solo, pode-se ter uma estimativa da compactação, mas se houver necessidade de medidas quantitativas, esta pode ser avaliada segundo alguns atributos do solo, tais como, porosidade; densidade; infiltração de água, resistência ao penetrômetro e análise de trincheira.

A densidade do solo é a medida quantitativa mais direta da compactação, o método utilizado para sua avaliação é o do anel volumétrico, que é um cilindro de volume conhecido, geralmente  $50 \text{ cm}^3$ , com uma das bordas cortante (KIHTEL, 1979).

O anel volumétrico é introduzido no solo por pancadas ou por pressão, depois retirado e limpadado do excesso de solo, para que o volume de solo coletado seja igual ao volume do anel, em seguida é retirado o solo desse anel e colocado para secagem em estufa, obtendo-se assim a massa de terra seca, sabendo-se o volume a densidade é calculada.

Outros métodos utilizam a técnica de tomografia por raios gama, (CRESTANA, 1985); (CRESTANA *et al.*, 1986); (CRUVINEL, 1987); (VAZ *et al.*, 1989a e 1989b) (CRUVINEL *et al.*, 1990); (VAZ *et al.*, 1992), obtendo melhores resultados por ser mais sensível, precisa, não destrutiva e possibilita a medida de densidade e da umidade do solo em amostras indeformadas.

Bowen determinou, segundo dados experimentais valores críticos de densidade para quantificar a compactação, Ele considera críticos os valores  $1,55 \text{ kg dm}^{-3}$  para solos franco-argilosos a argilosos e  $1,85 \text{ kg dm}^{-3}$  para solos arenosos a franco-arenosos, considera, também, que a partir desses valores ocorre restrições ao desenvolvimento das raízes, quando estiverem na capacidade de campo (BOWEN, 1981).

A redução da condutividade hidráulica é outro problema associado à compactação do solo. A taxa de infiltração de água no solo, que serve como indicação de sua condutividade hidráulica é influenciada por outros fatores do solo, tais como a formação de crostas na superfície que provocam sensível diminuição na quantidade de água que penetra no perfil.

A resistência do solo à inserção de um penetrômetro é um método secundário na avaliação da compactação. É um método fácil e rápido de medição da resistividade à penetração em várias profundidades. É baseado na medida da resistência do solo à penetração de uma haste, após recebimento de um impacto provocado pelo deslocamento vertical de um bloco de ferro colocado na parte superior da haste, ou de um outro sistema, que empurre a haste contra o solo com velocidade constante (STOLF *et al.*, 1983).

Certos cuidados devem ser tomados com o uso das medidas com penetrômetros, tal como:

- a) a resistência do penetrômetro é influenciada pela textura do solo;
- b) a utilidade do penetrômetro na medida da compactação do solo é limitada a medidas feitas para o mesmo solo à mesma umidade;

- c) a maioria dos penetrômetros tem diâmetro maior que as porções das raízes que estão se alongando;
- d) a resistência real exercida pelo solo á penetração radicular é, menor que a resistência medida pelo penetrômetro, uma vez que as raízes procuram os espaços de maior fraqueza durante seu crescimento (PEARSON, 1966);
- e) a ponta das raízes tem uma camada de mucilagem para reduzir o atrito de contato comparado com o penetrômetro;
- f) a raiz se deforma facilmente, enquanto a ponta do penetrômetro é rígida;
- g) cuidado em solos pedregosos, um único fragmento pode invalidar a leitura;
- h) penetrômetros diferentes em solos iguais dão medidas diferentes da resistência do solo.

Com o uso do penetrômetro é possível determinar a profundidade da camada compactada e daí optar pelo implemento mais adequado de descompactação.

Outro instrumento usado para medida de compactação é o penetrógrafo, que difere do penetrômetro por fornecer diretamente em um gráfico a medida de resistência de penetração.

O exame de trincheiras pode ser usado para diagnosticar o perfil de um solo após o cultivo com determinadas culturas, principalmente as perenes e semi-perenes.

O exame de trincheiras permite a inspeção e a mensuração da quantidade de raízes presentes, as raízes podem ser quantificadas por meio de um quadro reticulado afixado ao perfil, através da contagem do número de retículos com presença do sistema radicular. Pode-se empregar uma câmara fotográfica, para se obter fotos do perfil, e depois determinar a presença ou a ausência de raízes com uma máscara reticulada (CRESTANA *et al.*, 1994).

Outra forma de representar a compactação numa trincheira é através das isolinhas de densidade do solo. Após diversas amostragem, pode-se delinear linhas de mesma densidade, que permitem boa visualização da compactação no perfil do solo.

A avaliação de trincheiras permite o estudo mais detalhado do evolução estrutural dos solos. Regiões de perfil com estruturas maciças dificultam a distribuição do sistema radicular, promovendo queda no crescimento das culturas (RALISH *et al.*, 1991).

São estes os principais tópicos considerados na abordagem referente ao estudo de solos, penetrômetro e análise de compactação, cuja medida desempenha papel fundamental na tomada de decisão para a avaliação da resistência mecânica do solo à penetração de raízes.

### **1.7 Relevância do trabalho e contribuições originais**

É apresentado neste trabalho o desenvolvimento de um instrumento para o auxílio à tomada de decisão em processos que envolvem avaliações da resistência do solo à penetração de raízes. Esta pode ser medida tanto em área como em perfil fornecendo em tempo quase real informações sobre a compactação do solo. Os resultados são apresentados sob forma de tabelas, gráficos unidimensionais, mapas bidimensionais e mapas tridimensionais

Diferenciando dos sistemas já apresentados, este atua em uma escala de medida milimétrica, através do uso de uma pequena sonda com sensibilidade para medida de resistência do solo à penetração tanto em campo como em laboratório. Esta informação é importante para o estudo do esforço do desenvolvimento da raiz de plantas, tal como a emergência da planta ou brotamento de uma semente. No desenvolvimento do sistema foi utilizado o enfoque de instrumentação baseada em inteligência para a coleta e processamento dos valores de resistência do solo à penetração em um único ponto ou em uma região, possibilitando a geração de mapas bidimensionais para visualização da resistência do solo à penetração por camada de



penetração. Com as medidas de um região é possível a geração de mapas tridimensionais para visualização volumétrica da região de coleta, que permitirá o estudo no perfil e na variabilidade espacial da resistência do solo à penetração. Os dados coletados são organizados em um banco de dados para uso futuro, como exemplo no estudo da variação temporal da resistência do solo à penetração em escala milimétrica em função dos fatores climáticos e ou de manejo.

O sistema apresenta também uma ferramenta para o estudo do comportamento da resistência do solo à penetração entre duas camadas de medidas, possibilitando a interpolação de uma ou mais camadas entre os espaços internos a estas duas.

Baseado neste conceitos o sistema implementado possibilita ao usuário uma rápida interpretação sobre as informações para uma tomada de decisão na resolução ou prevenção da resistência do solo à penetração.

## **Capítulo 2**

### **Instrumentação baseada em inteligência para processos de tomada de decisão do desenvolvimento radicular de plantas**

O conceito de instrumentação baseada em inteligência e suas facilidades de desenvolvimento e tópicos sobre tomada de decisão são descritos neste capítulo. É também apresentado uma abordagem de como esta metodologia pode ser utilizada na tomada de decisão para o desenvolvimento radicular de plantas.

#### **2.1 Instrumentação baseada em inteligência**

A finalidade no desenvolvimento de instrumentação baseada em inteligência deve-se ao fato deste, por exemplo, executar as tarefas triviais e repetitivas de aquisição; processamento dos resultados brutos de forma autônoma e independente do fenômeno a que foi projetado para analisar, liberando o sistema central para tarefas mais importantes, como da análise de dados e exibição em tempo real. A comunicação entre o computador central e as unidades inteligentes é feita através de um protocolo de transmissão de dados e controle pré-definido (HOWELL, 1990).

Em um sistema típico onde não é aplicado o conceito de instrumentação baseada em inteligência, o computador é usado para gerar um ou mais estímulos que definirão o estado físico do processo que ele está controlando ou analisando. Como exemplo deste estímulos tem-se voltagem, corrente, temperatura e movimento angular e linear, como mostrado na figura 2.1.

O computador, conforme ilustrado na figura 2.1, é responsável pelo controle geral do sistema e pela interpretação de informação de estado e de dados experimentais. Desta forma o computador é usado de forma ineficiente, ficando, geralmente não disponível para outras tarefas desejadas como análise e a interpretação dos dados.

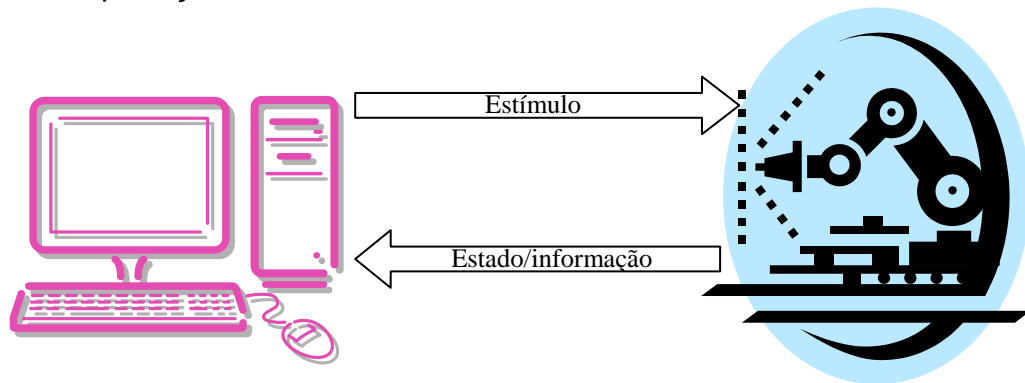


Figura 2.1: Arquitetura convencional de um sistema de aquisição e controle. O computador central tem a responsabilidade exclusiva de gerar todos os estímulos apropriados e interpretar os resultados deste no experimento.

Para liberar o computador central destas tarefas rotineiras, seria necessário a introdução de sistemas entre o computador e o experimento, que realizariam, de modo independente as tarefas de interpretação e controle do experimento, conforme mostra a figura 2.2.

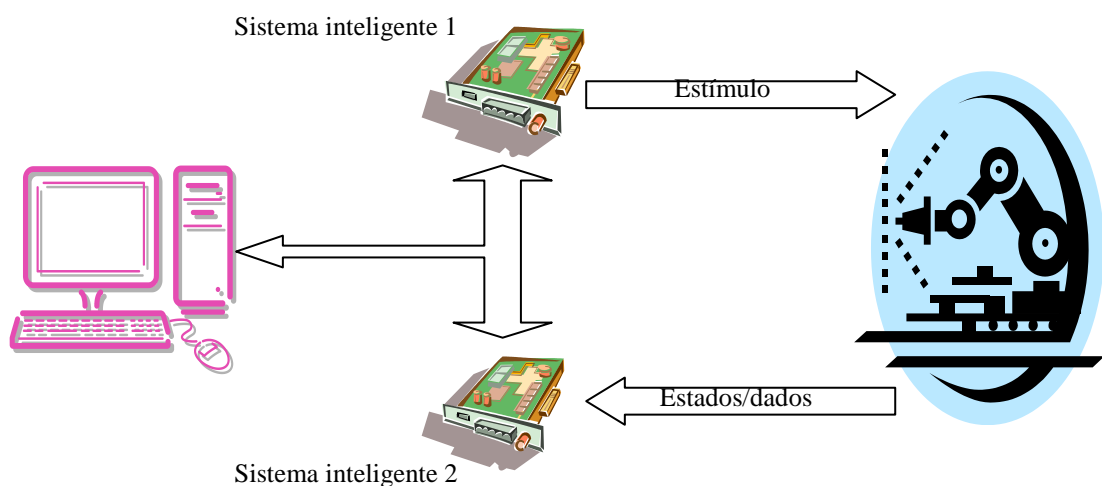


Figura 2.2 : Arquitetura incorporando unidades inteligentes.

Como várias unidades inteligentes podem ser usadas em um único sistema e são associadas a um número limitado de sensores e ou controladores, deve ser levado em conta seu custo e seu desempenho. Outra importância é a facilidade de desenvolvimento do hardware e do software de aplicação residentes nas unidades inteligentes, podendo ser modulares e dedicados a tarefas específicas e repetitivas.

A incorporação de microprocessadores nos instrumentos atuais tem possibilitado uma extensão da capacidade destes instrumentos, gerando expectativas de que o instrumento possa fornecer mais dados que simples leituras, tais como condições de alarmes e diagnósticos de informações.

A calibração automática de sensores, tem-se tornado uma prática em sistemas que usam microcontroladores ou microprocessadores, uma saída ou entrada do instrumento pode ser usada como um ponto de calibração deste. Através desta saída/entrada o sistema microprocessado pode avaliar os níveis de calibração e ajustar o instrumento para o zero e sua escala geral (ATKINSON, 1987).

Os métodos de calibração são diversos e entre eles pode-se classificar os magnéticos, ópticos, ultra-sônico e outros.

Resumindo, um chamado sistema baseado em inteligência deve possuir, se não todas, pelo menos um dos seguintes atributos:

- a) auto linearização;
- b) auto calibração;
- c) auto diagnóstico;
- d) informação de estado;
- e) mostrado local de leitura/estado do instrumento e
- f) capacidade de transmissão remota.

### **2.1.1 Vantagens do uso de instrumentação baseada em inteligência**

O emprego de instrumentação baseada em inteligência, traz vantagens, dentre as quais pode-se destacar:

- Liberação do computador central de tarefas rotineiras e repetitivas para funções mais importantes, tal como, exibição em tempo real da aquisição de dados de muitas fontes e capacidade para executar operações complexas de análise de dados;
- Controle do hardware local com o fornecimento de informação de estado e diagnóstico a respeito do instrumento através de auto-  
checagem;
- Medição e correção automática dos defeitos relativos dos sensores, tal como, offsets; flutuação de temperatura e não linearidades;
- A compilação sumária da aquisição de dados e a aplicação do correto fator de correção, junto com a transmissão destes dados em um formato conveniente (unidades científicas ou de engenharia);
- Reconfiguração dinâmica do instrumento, permitindo a instrumentação se adaptar a novas e diferentes situações;
- Possibilidade de criação de grandes sistemas, com um grande número de unidades inteligentes que possam comunicar-se entre si ou com o computador central. Para isto, pode-se utilizar padrões de comunicação serial populares como o RS232 ou o RS485 que permitem uma distância considerável entre o computador central e as unidades, muito importantes em aplicações industriais e de aquisição de dados em ambientes hostis e ou agropecuários;
- Em aplicações industriais, como verificação independente da operação do instrumento e emissão de condições de alarme, aumentando a confiabilidade e durabilidade da instrumentação.

Entretanto, deve ser levado em consideração a complexidade de instalação dos sistemas inteligentes, pois quanto maior o número destes, as dificuldades começam a surgir tais como as detecções e correções de falhas.

## **2.1.2 Implementação de sistema inteligente**

Uma vez detectado a aplicação, procura-se o melhor método para a implementação dos sistema inteligente, sendo possível usar sistemas de controle digital baseados em tecnologias SSI, MSI, LSI, microcomputadores comerciais, computadores de placa única e microcontroladores. Cada um tem suas respectivas vantagens na aplicação específica e o freqüente compromisso esta no custo, facilidade de implementação, tamanho físico e capacidade em termos de poder de processamento, espaço de memória provisões de I/O e dispositivos de suporte.

### **2.1.2.1 Circuitos integrados expertos**

Alguns circuitos integrados como exemplo o conversor analógico-digital, de fabricação Crystal Semiconductors de código CSC5012 conversor A/D de 12 bits auto-calibração (CIRRUS, 2003), estão sendo produzidos com melhorias que lhes atribuem categoria de sistema inteligente podendo ser configurados; controlados; calibrados e monitorados por um microcontrolador.

### **2.1.2.2 Microcontroladores**

Devido a sua grande capacidade de hardware possível dentro de um único dispositivo, reduzindo custos e dispositivos, tornam os microcontroladores bastante atrativos para implementação de sistemas inteligentes.

Dentro de uma mesma família de microcontroladores, existem dispositivos melhorados, que podem incluir contadores/temporizadores melhorados, I/O paralelas e interfaces digitais de alta velocidades, conversores analógicos-digitais multiplexados associados com amplificadores de amostragem e retenção, temporizadores de 'watchdog' , saídas de pulsos e unidades para mostradores.

---

Possibilitam implementar sistemas complexos de controle com a adição de poucos componentes externos, como um conversor TTL/RS232 para a porta serial permitindo interações do microcontrolador com o sistema central remoto ou aumentando a capacidade de armazenamento de dados com a adição de memórias RAM externas.

O microcontrolador 80535, por exemplo, é baseado na arquitetura do sistema microcontrolador 8051, incorporando algumas modificações, cujas principais características em relação ao 8051 são: 256 bytes de memórias RAM; 6 portas de 8 bits, possibilitando 48 linhas de I/O; 3 temporizadores/contadores de 16 bits, um deles com capacidade de recarga, captura e comparação; porta serial full-duplex, 12 fontes de interrupção com 4 níveis de prioridade, conversor analógico/digital de 8 bits, temporizador watchdog de 16 bits, alimentação para 40 bytes de RAM, caso haja falha de energia; processador booleano, 256 locações endereçáveis de bit; capacidade de endereçamento de espaço de memória de programa de 64K bytes; capacidade de endereçamento de espaço de memória de dados também de 64k bytes e a maioria das instruções são executadas em 1  $\mu$ s.

Inúmeros trabalhos tem sido implementados com o microcontrolador 80535, nas mais diversas áreas, tanto científicas como industriais, devido a sua facilidade de implementação e desenvolvimento.

No trabalho, *Projeto de um sistema inteligente baseado no microcontrolador 80535 para aquisição de dados e controle em ambiente agropecuário* (LOURO,1995), é explorado a potencialidade do uso desse microcontrolador com o objetivo de minimizar a inclusão de circuitos extras como relógios, conversores analógico para digital e multiplexadores analógicos, itens estes, já inclusos na arquitetura do microcontrolador. Neste trabalho abordou-se uma plataforma mínima, para diversas aplicações tanto industriais como didáticas, bem como seu principal objetivo para uso em ambientes agropecuários e agro-industriais.

Coletores de dados, para a aquisição de informações agrícolas, acoplados em máquinas agrícolas, com o intuito de melhorar e reduzir o uso de insumos a níveis necessários, foram desenvolvidos por empresas para esse fim como por exemplo o *Sistema de gerenciamento para pulverização de precisão*, da empresa ENALTA<sup>1</sup>, com tecnologia repassada pela Embrapa Instrumentação Agropecuária, patente MU 7602399-0 19.12.96 (EMBRAPA, 1996).

Os microcontroladores tem sido bastante difundidos em sistemas automotivos e processos de controle industriais e em utilidades domésticas, tem sido empregado em várias áreas de pesquisa, como em agricultura o uso de sensores inteligentes, usando o microcontrolador PIC16C715, Microchip Technology, (MICROCHIP, 2003). Esse microcontrolador tem sido usado na função de observador de sensores de umidade; de temperatura; de velocidade do vento; entre outros, processando e tratando os sinais do sensor, para depois, segundo uma ordem do computador central descarregar esses dados ou informar ao *host*<sup>2</sup> sobre algum problema ou alarme que pudesse ocorrer com um sensor ou um conjunto deles (TORRE NETO, 1997).

No trabalho intitulado *Desenvolvimento de arquitetura inteligente para o monitoramento de silos agrícolas* (BALSANI, 1999), é desenvolvido uma arquitetura e um protocolo de transmissão de dados dedicados ao monitoramento de parâmetros climáticos em silos e secadores de grãos. A arquitetura, neste caso, usa processamento distribuído e instrumentação inteligente baseada em microcontrolador. O protocolo é baseado no padrão de comunicação serial multiponto RS485 e no protocolo ISO/OSI.

Resultados ilustram um sistema que viabiliza medições e modelamento para silos e secadores na avaliação de perdas de grãos durante os processos de transporte e armazenamento.

---

<sup>1</sup> Nome fantasia da empresa BISCASSI & MANZONI LTDA.

<sup>2</sup> Termo usado para designar o computador central ou hospedeiro.



No trabalho, *Medidor de teor de clorofila em plantas baseado em arquitetura microcontrolada* (SANTIS Jr., 2000), é desenvolvido um sistema microprocessado para a avaliação de clorofila em plantas, com aplicações em operações de fertilização e irrigação, cujo manejo de eventos são controlados pelas condições críticas como a disponibilidade de nitrogênio no solo.

Uma aplicação com sistema baseado em inteligência utilizando uma placa DSP, com arquitetura para paralelização dos algoritmos de reconstrução de imagens com técnicas wavelets aplicada em um sistema de minitomografia de raios X e  $\gamma$  dedicados à agricultura foi apresentado em 2001 (PEREIRA, 2001). Neste trabalho foram utilizados dois processadores TMS320C40 e as tarefas de reconstrução 2D e 3D foram distribuídos entre os processadores, utilizando-se a memória cache dos processadores para diminuição das taxas de perdas e aumento da capacidade de processamento e velocidade do sistema.

Fabricantes têm colocado a disposição vários sensores industriais e unidades de condicionamento de sinais baseados em microcontroladores, possibilitando auto-calibragem, auto-escala, linearização, compensação, melhorando a acuracidade e estabilidade do dispositivo.

Há inúmeras vantagens dos microcontroladores sobre os microprocessadores quando em uso em sistemas dedicados, sendo que suas aplicações têm aumentado nos últimos anos com previsões de se continuar. Existem hoje disponíveis microcontroladores com capacidade de 8 ou 32 bits baseados em arquitetura RISC com desempenho de 5 MIPS, também para aplicações avançadas em processamentos de sinais digitais.

### **2.1.2.3 Computadores de placa única**

Sistemas de computadores de placa única, SBC (*single board computers*), são largamente utilizados em aplicações industriais fornecendo sistemas de instrumentação distribuídos e autônomos.

---

Um típico SBC pode possuir unidade central de processamento de 8; 16 ou 32 bits, memórias RAM, ROM, I/O paralelas e serial. Podem conter monitores, *assemblers/disassemblers* e interpretadores de linguagem de alto nível em uma única placa de tamanho pré-definido.

Entretanto, apesar de suas vantagens, os sistemas de computadores de placa única apresentam algumas desvantagens sensíveis, principalmente para aplicações em larga escala, tal qual o alto custo da placa do hardware de suporte, cartões adicionais e fonte de alimentação, são observados.

#### **2.1.2.4 Sistemas baseados em microcomputadores tipo PC-compatíveis**

Apesar de não apresentar muitos atrativos, devido a seu tamanho e custo, os sistemas baseados em microcomputadores PC-compatíveis têm sido utilizados frente aos recentes avanços e facilidades de acesso a este tipo de sistemas.

Suas vantagens são claras, pois um PC, fornece todas as facilidades de hardware, juntamente com um sistema completo de desenvolvimento, que pode incluir teclado, monitor, disco rígido e flexível associados com uma surpreendente variedade de linguagens e padrões.

Estas linguagens padrões podem ser usadas para desenvolver códigos de aplicação, que após a escrita e o depuramento podem ser escritos dentro de uma memória EPROM ou carregados automaticamente a partir de um arquivo do tipo *autoexec.bat*.

As comunicações entre o sistema central com outros sistemas distribuídos é bastante simples, devido aos barramentos seriais disponíveis nos PC, os quais são muito úteis para implementação de grandes sistemas de inteligência distribuídas.

O tamanho físico, atualmente vem sendo contornado pela implementação de um sistema PC em uma única placa, como o exemplo do

---

padrão PC104, (WINSYSTEMS, 2003), conforme o utilizado no desenvolvimento de um método para estudos dinâmicos, *in situ*, da infiltração da água na região não saturada do solo (NAIME, 2001).

#### **2.1.2.5 Sistemas de aquisição de dados**

Sistemas de aquisição de dados, são sistemas de coletas e podem ter algumas configurações diferentes de acordo com as especificações do projeto.

São formados geralmente por amplificadores operacionais/instrumentais, multiplexadores analógicos, circuitos de amostragem e retenção, conversores analógicos-digitais e microcontroladores.

#### **2.1.2.6 Facilidades de desenvolvimento**

Compreende as ferramentas necessárias para o projeto de um sistema inteligente, no caso de hardware seriam as ferramentas necessárias para a modificação e implementação destes, embora já exista um grande número de suporte para isto com vários sistemas já prontos, recai então sobre como programar estes sistemas, com qual linguagem de alto ou baixo nível, como criar, depurar e modificar o referido programa computacional.

Interpretadores de linguagem de alto nível, tal como C, BASIC, entre outras, bem como de *assembler* estão disponíveis para muitos sistemas de única placa e microcontroladores, mas as facilidades para depurar e controlar em tempo real variam consideravelmente e devem ser cuidadosamente avaliados antes de assumir um compromisso com um determinado hardware.

Ao se optar por empregar linguagem de alto nível deve-se levar em conta que o tamanho do código gerado é maior que o tamanho de um código gerado por linguagem de baixo nível como *assembly* por exemplo.

O uso de instrumentação baseada em inteligência, distribuída dentro de um complexo sistema de aquisição de dados e controle pode significar uma

---

grande melhoria no desempenho e forneceria facilidades que dificilmente se alcançaria usando técnicas convencionais.

## **2.2 Conceito de tomada de decisão**

A tomada de decisão nos diversos setores da atividade humana, geralmente contém incertezas. Fatos que decorrem da aleatoriedade associada aos fenômenos e eventos, bem como a complexidade de correlacioná-los.

Essas incertezas geralmente decorrem devido a erros aleatórios cometidos em análise das medições, julgamentos subjetivo, o que pode causar erros sistemáticos e imprimir tendenciosidade, imprecisões lingüísticas quanto ao entendimento e descrição de fenômenos e eventos, variabilidade dos valores no tempo e espaço, aleatoriedade associada a certos fenômenos ou eventos, discordância de opiniões entre especialistas e considerações estipuladas quando da modelagem de sistemas.

Deste modo tem-se que as incertezas imprimem, geram, e implicam em riscos. Riscos são definidos como a probabilidade ou possibilidade da ocorrência de valores para determinados eventos e fenômenos, indesejáveis ou adversos. Assim, em processos como de medição, observações, avaliações e tomada de decisões, podem ser influenciados por várias fontes de incertezas. Isto leva a estabelecer a convivência contínua e inevitável com inúmeros tipos de risco. Riscos podem possuir diferentes conotações, como as de ordem física, estrutural, econômica, social e ambiental (CRUVINEL *et al.*, 2002).

A grande quantidade de informações que devem ser analisadas para então obter uma possível interpretação dos fatos relacionados à variabilidade espacial e temporal que se evidenciam em cada porção da lavoura, tem levado os pesquisadores a procurar novas ferramentas para auxiliá-los na tomada de decisão sobre o que se deve usar e em que período para melhorar a produtividade de uma cultura.

A tomada de decisão pode ser definida como um conjunto de etapas que passam pelo reconhecimento da necessidade de uma decisão, seguido de uma análise do problema, de uma pesquisa de alternativas para resolver o problema, da escolha da alternativa (decisão) e, finalmente, da aplicação da alternativa selecionada para resolver o problema (CASTRO NETO, 2003).

Para apoiar qualquer tomada de decisão, é importante se ter a informação correta no momento em que é necessária e no formato adequado.

É necessário termos uma distinção entre o que são dados, o que é informação e o que é conhecimento. Informação é aquele conjunto de dados que, quando fornecido de forma e no tempo adequado, melhora o conhecimento do usuário que o recebe, ficando ele mais seguro para desenvolver uma determinada atividade ou tomar uma determinada decisão (HAGG *et al.*, 1998).

Para a atividade agrícola em particular, a importância que o recurso informação tem vindo a ganhar deve-se, essencialmente, à complexidade de uma atividade onde a incerteza associada à variabilidade climática, à variabilidade das características espaciais e à diversidade das plantas e animais utilizados, é proporcionalmente maior do que em outros ramos de atividade. Esta complexidade é ainda acrescida por uma forte regulamentação subjacente ao enquadramento político e legal induzido principalmente pela Política Agrícola Comum e pelos Acordos Mundiais de Comércio.

De fato, as empresa ou empreendimentos agrícolas, vivem num processo de sucessivas tomadas de decisão sobre o modo de como agir sobre o ambiente, as plantas e os animais, pelo que têm uma necessidade permanente de recorrer à informação. O emprego de instrumentação adequada e acessível ao produtor tem ajudado nos mais variados tipos de tomada de decisão dentro do ambiente agrícola, especialmente ao nível tático e estratégico, visando melhorias na aplicação adequada de insumos e implementos gerando economia e qualidade no produto final.

O desenvolvimento saudável de raízes de plantas, por exemplo, leva em conta vários fatores sobre solo, ambientais, climáticos, manejo da cultura, entre outros. A necessidade de informação sobre estes itens é de fundamental importância para os especialistas da área,

Como visto, neste trabalho, um dos principais pontos discutidos, foi o da compactação do solo, fator que atua diretamente no desenvolvimento de raízes.

Há necessidade de registro da compactação e de outros fatores para um histórico espacial e temporal que influenciará no futuro do melhor manejo possível.

Nos dias atuais, sistemas inteligentes para tomada de decisão em ambiente agrícola que envolvam o desenvolvimento de sensores, hardware e software integrados, conforme concepção do plano de pesquisa desenvolvido, são requeridos nos ambientes de P&D e campos de produção.

## **Capítulo 3**

### **Projeto do instrumento para o mapeamento da resistência do solo à penetração de raízes**

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do instrumento para o mapeamento da resistência do solo à penetração, seu módulo de gerenciamento com detalhamento da metodologia para a tomada de decisão em problemas à resistência de penetração de solos à penetração de raízes. São apresentados tanto o desenvolvimento do sensor, do sistema mecânico e principalmente o sistema eletrônico e as rotinas para processamento dos sinais e interface com o usuário, como também a modelagem do comportamento do sistema penetrômetro com a microsonda.

#### **3.1 Modelagem da microsonda para medida da resistência do solo à penetração de raízes**

Vazquez em seus experimentos, avaliou características do solo que o qualifica quanto a compactação e as correlaciona com as medidas de densidade volumétrica e resistência à penetração. Seus experimentos foram realizados em uma área cultivada com aveia (*Avena sativa*) e soja (*Glyceline max*), durante oito anos de cultivo (VAZQUEZ *et al.*, 1991).

Os parâmetros por ele analisados foram a resistência do solo à penetração (RSP), densidade volumétrica do solo ( $\rho$ ) e conteúdo de água no solo ( $\theta$ ).

Seus experimentos indicam que a RSP foi afetada no ponto onde se toma a medida (variabilidade espacial), profundidade, como também devido às interações de tratamento tal como por posição, por profundidade, linha por profundidade, posição por profundidade e também envolvendo as três interações, tais como tratamento por posição e por profundidade.

Quanto ao conteúdo de água no solo, houve uma baixa correlação de RSP com  $\theta$ , devido a área do experimento ter sido irrigado em sua capacidade de carga de campo, para minimizar os efeitos de  $\theta$  sobre RSP. Com uma faixa maior de água no solo, observou-se que  $\theta$  afeta fortemente a RSP, conforme relatados por Campbell e Ehlers em 1974, (CAMPBELL *et al.*, 1974; EHLERS *et al.*, 1983).

Outro aspecto observado foi que a medida da RSP foi 10 vezes mais sensível que a medida de  $\rho$  como indicador de compactação do solo, o que coincide com os resultados apresentados em 1977 por Pidgeon e Soane (PIDGEON & SOANE, 1977).

Outros fatores podem influenciar a correlação entre RSP e  $\rho$  incluindo a textura do solo, matéria orgânica e variabilidade de campo. A textura do solo pode também afetar a resistência do solo e a relação solo-umidade. Warnars e Evis encontraram que a relação da RSP com o potencial matricial foi altamente dependente do tamanho dos grãos de areia presente nas amostras analisadas (WARNAARS & EVIS, 1972). Sands e colaboradores, notaram que o incremento de matéria orgânica diminui a RSP para um solo com densidade constante (SANDS *et al.*, 1979). Sob condições de laboratório, em ambientes controlado, altas correlações entre RSP e  $\rho$  podem ser obtidas. Entretanto, as correlações sob condições de campo são difíceis de serem obtidas, conforme reportados nos trabalhos de Cassel; Bander e colaboradores respectivamente, (CASSEL *et al.*, 1979; BAUDER *et al.* 1981).

Vasquez, em seu trabalho em 1991, modelou a RSP apresentando uma equação em função da profundidade, densidade, função das interações entre



profundidade e densidade, densidade em função da quantidade de água, profundidade por unidade por densidade, o quadrado da profundidade e o quadrado da densidade. O coeficiente de correlação para o modelo por ele desenvolvido foi  $R^2 = 0,82$ . A representatividade dos parâmetros em função de RSP ficaram, para a densidade em torno de 24%, a profundidade em torno de 30% e o quadrado da profundidade em torno de 25%, para os demais parâmetros ficaram em torno de 3%. A eq. (1) apresenta com aproximações o modelo descrito por Vasquez e colaboradores (VAZQUEZ *et al.*, 1991):

$$RSP = 4,00 \cdot 10^{-2} + 9,80 \cdot 10^{-2}(D - 2,50) - 1,62 \cdot 10^{-1}(\rho - 1,20) - 2,00 \cdot 10^{-3}D^2 + 6,98\rho^2 + 1,37 \cdot 10^{-1}(D \cdot \rho) + 1,98 \cdot 10^{-1}(\theta \cdot \rho) - 9,20 \cdot 10^{-3}(D \cdot \theta \cdot \rho) \quad (1)$$

onde, RSP é a resistência do solo à penetração de raízes dada em  $[10^3 \text{N.m}^{-2}]$ ,  $\rho$  é a densidade volumétrica do solo dada em  $[10^3 \text{Kg.m}^{-3}]$ , D é a profundidade dada em [m] e  $\theta$  é a umidade do solo dada em  $[\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}]$ .

De forma a encontrar uma equação que considere forças de atrito, aderência, bem como a tensão normal que aparece na parede externa do cone, adicionalmente ao desenvolvimento apresentado por Vazquez em 1991, considerou-se neste trabalho o estudo feito por Bengough, o qual avaliou a resistência do cone do penetrômetro frente a aderência do solo (BENGOUGH, 1992).

A figura 3.1 ilustra o diagrama de um cone de penetrômetro e as forças atuando em um ponto sobre a superfície do mesmo.

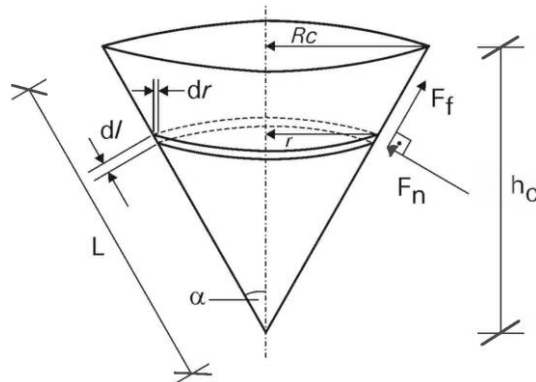


Figura 3.1 - Diagrama de um cone de penetrômetro e as forças atuando em um ponto qualquer sobre sua superfície. As componentes verticais das forças são mostradas a direita ao alto.

Farrell e Greacen, em seus trabalhos, apresentaram uma teoria para prognosticar a resistência do solo a penetração de um cone de metal como uma função da compressibilidade do solo, fricção solo-metal e o semi-ângulo  $\alpha$  (FARRELL & GREACEN, 1966).

A eq. (2) apresenta a resistência do solo à penetração do cone de metal conforme descrito no modelo desenvolvido em 1966 por Farrell e Greacen.

$$RP = \sigma_n [1 + \mu \cdot \cotag(\alpha)] \quad (2)$$

onde, RP é a resistência de penetração no cone dada em  $[10^3 \text{N.m}^{-2}]$ ,  $\sigma_n$  é a tensão normal para a superfície da extremidade da sonda dada em [N],  $\mu$  é um número adimensional que representa o coeficiente de fricção solo-metal e  $\alpha$  é o semi-ângulo da sonda dado em [graus].

Bengough em 1992, também apresentou uma avaliação da resistência de penetração do cone em função do ângulo da ponta do cone junto com a força de adesão sobre a parede do cone, a qual pode ser observada nos gráficos apresentados na figura 3.2. Observa-se que quanto maior o ângulo, menor será a influência da força de atrito na parede do cone do penetrômetro. O inverso acontece para a resistência do solo à penetração para o penetrômetro, a medida que aumenta-se o ângulo, pois quando o ângulo atinge seu valor máximo de  $90^\circ$ , não existe mais uma ponta e sim uma seção de área (BENGOUGH, 1992).

Farrell e Greacen, em seus trabalhos, não publicaram uma derivação completa da eq. (2) nem discutiram suas hipótese em seus documentos. Entretanto, a eq. (2) tem sido largamente citada em trabalhos da área.

Uma destas hipóteses implica que a força friccional  $f$  é diretamente proporcional à uma tensão normal  $\sigma_n$ , ou seja :

$$f = \mu \cdot \sigma_n \quad (3)$$

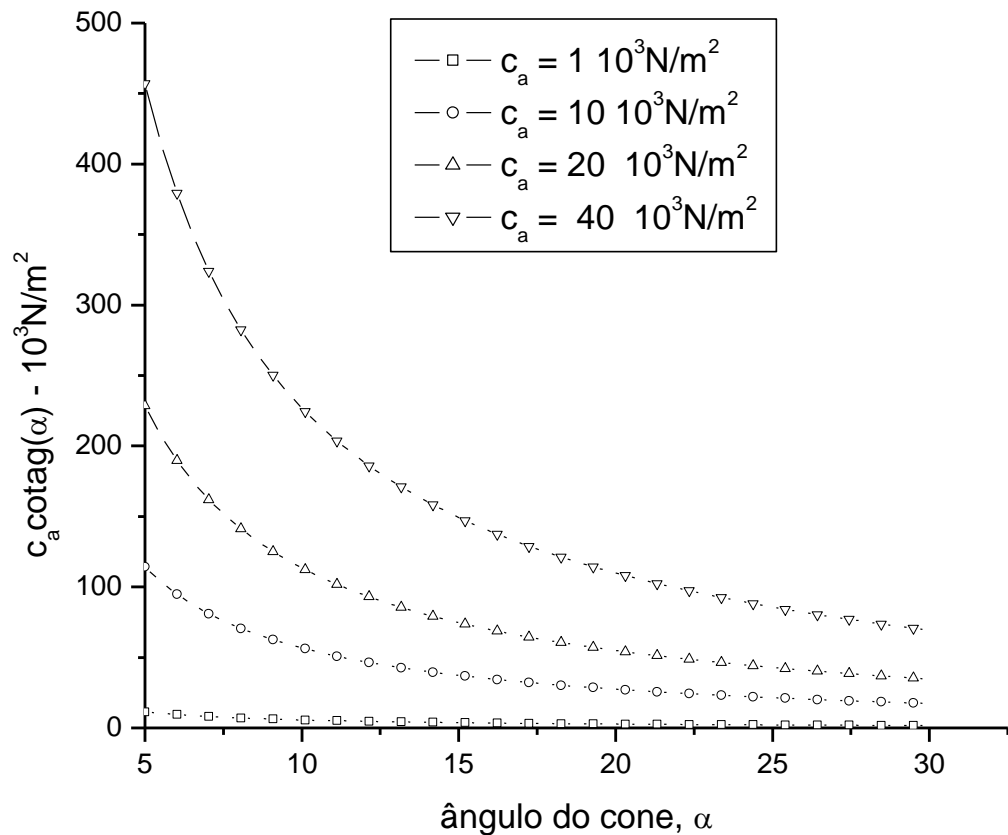


Figura 3.2 - Componente de adesão da resistência do penetrômetro em função do ângulo do cone (BENGOUGH, 1992).

A aderência corresponde à força de atração entre duas superfícies, como por exemplo, solo e metal. A eq. (2) também é válida para solos argilosos e arenosos, contudo, para uma faixa de solos coesivos. Payne, Stafford e Tanner, em seus trabalhos encontraram a seguinte expressão para força friccional (PAYNE, 1956); (STAFFORD & TANNER, 1977 e 1983):

$$f = \mu \cdot \sigma_n + c_a \quad (4)$$

onde  $c_a$  é a aderência tangencial dada em [N].

Para uma aplicação mais generalizada da eq. (2), algumas modificações são portanto necessárias, para se incluir os efeitos de aderência solo-metal. Partindo dessas equações Bengough, em 1992, derivou uma equação para

medida da resistência do solo à penetração de um cone de metal incluindo explicitamente os efeitos da aderência solo-metal.

Segundo os trabalhos de Whiteley e Bengough, o modelo proposto por Farrell e Greacen traz as seguintes limitações (WHITELEY *et al.* 1981; BENGOUGH, 1990):

- A tensão requerida para deformar o solo é distribuída igualmente sobre o cone (consideram o solo completamente homogêneo). A consequência disto é que a resistência do solo à penetração do cone de metal seria independente do diâmetro do mesmo. Em solos reais, a resistência do solo a penetração do cone de metal aumenta com a diminuição do diâmetro do cone, o que não foi considerado.
- O escorregamento ocorre na interface entre solo e metal, isto é, sem formação de corpo de solo na frente da extremidade do cone de metal de altura  $h_c$ . Considerando a extremidade cônica de raio máximo  $R_c$  a componente vertical da força normal atuando sobre um anel de raio  $r$ , de largura  $dl$ , pode ser dada por :

$$dF_n = 2\pi\sigma_n \text{sen}(\alpha)dl \quad (5)$$

assim, a componente vertical da força normal é dada por:

$$\int_0^{F_n} dF_n = 2\pi\sigma_n \text{sen}(\alpha) \int_0^R \frac{r}{\text{sen}(\alpha)} dr$$

$$F_n = \pi R_c^2 \sigma_n \quad (6)$$

da eq. (4), a componente vertical da força de fricção sobre o anel é dada por:

$$dF_f = 2\pi r(\mu\sigma_n + c_a)\cos(\alpha) \cdot dl \quad (7)$$

a componente vertical da força de fricção é dada por:

$$\int_0^{F_f} dF_f = 2\pi(\mu\sigma_n + c_a)\cos(\alpha)\int_0^R \frac{r}{\sin(\alpha)} dr$$

$$F_f = \pi R_c^2 (\mu\sigma_n + c_a) \cot \alpha g(\alpha) \quad (8)$$

Porém, a força de reação da resistência do solo à penetração do cone considerando as forças de atrito ( $F_f$ ) e normal ( $F_n$ ) pode ser dado por:

$$RP = \frac{F_f + F_n}{\pi R_c^2} \quad (9)$$

das eq. (6) e eq. (8) e substituindo na eq. (9), tem-se a resistência do solo à penetração do cone de metal, ou seja:

$$RP = \sigma_n (1 + \mu \cot \alpha g(\alpha)) + c_a \cot \alpha g(\alpha) \quad (10)$$

Portanto, a aderência solo-metal é calculada na eq. (2), adicionando-se o termo ( $c_a \cot \alpha g(\alpha)$ ).

Entretanto, de forma a considerar não somente as componentes mencionadas, mas também as diferenças nos cálculos apresentados pelas eq. (1) e (10), as quais diferem entre si no cálculo que a resistência do solo à penetração sofre em função dos parâmetros do solo, como a umidade ( $\theta$ ), densidade ( $\rho$ ) e profundidade ( $D$ ), tomada em função das alturas do cone de metal e haste do instrumento de medida, buscou-se a resistência mecânica total que o solo oferece à penetração de raízes como uma função que tem adicionada as informações da tensão normal na superfície do solo ( $\sigma_n$ ), atrito ( $\mu$ ), o semi-ângulo da ponta do cone ( $\alpha$ ) e a tensão tangencial de adesão ( $c_a$ ).

A figura 3.3 apresenta esquematicamente uma sonda que envolve haste e cone a uma certa profundidade  $D$  de um solo qualquer com as componentes  $h_a$  e  $h_c$ , respectivamente correspondentes a altura da haste e altura do cone de penetração.

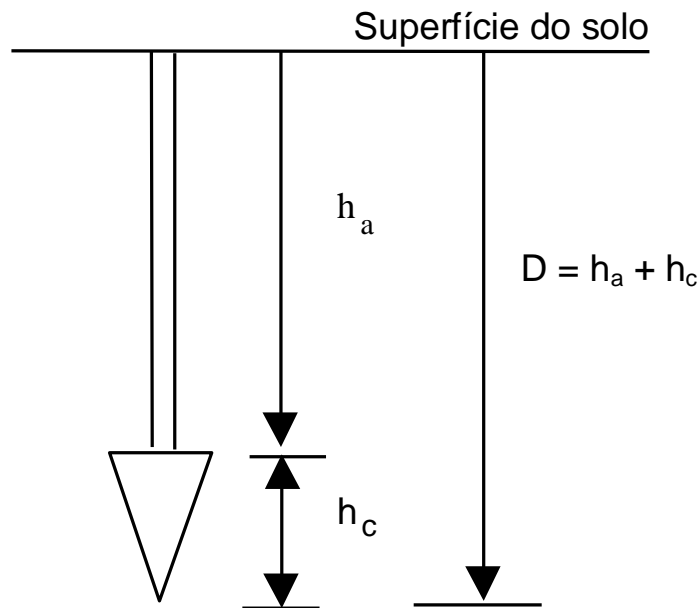


Figura 3.3 - Diagrama representativo da microsonda com suas partes componentes (haste e cone de penetração).

A profundidade total da sonda no solo é a resultante da soma da altura do cone mais o comprimento da haste introduzida no solo, ou seja:

$$D = h_a + h_c \quad (11)$$

onde,  $D$  é a profundidade total do penetrômetro no solo dada em [m],  $h_a$  é a altura da haste dada em [m] e  $h_c$  é a altura do cone dada em [m].

A altura  $h_c$ , conforme ilustrado na figura 3.1, pode ser calculada em função do semi-ângulo ( $\alpha$ ) e do raio  $R_c$  da base do cone, ou seja:

$$h_c = R_c \cot \alpha \quad (12)$$

Voltando a eq. (9), pode-se calcular a  $\cot \alpha$  da seguinte forma:

$$\cot \alpha = \frac{RP - \sigma_n}{(\mu \sigma_n) + c_a} \quad (13)$$

Assim, substituindo  $\cotag(\alpha)$  obtida pela equação (12) na equação (10) chega-se que D pode ser dado por:

$$D = h_a + R_c \left( \frac{RP - \sigma_n}{(\mu \sigma_n) + c_a} \right) \quad (14)$$

Finalmente, substituindo o resultado da eq. (14) na eq. (1), encontra-se a resistência do solo à penetração de raízes (RSP) em função da tensão normal sob o cone de metal da sonda ( $\sigma_n$ ), do atrito ( $\mu$ ), da tensão tangencial de adesão ( $c_a$ ), da resistência do solo à penetração do cone (RP), da densidade do solo ( $\rho$ ) e da umidade do solo ( $\theta$ ), ou seja:

$$RSP = g(\sigma_n, \mu, c_a, RP, \rho, \theta) \quad (15)$$

logo, substituindo os resultados encontrados com a eq. (14) na eq. (1) chega-se a:

$$\begin{aligned} RSP = & 6,98\rho^2 + \left[ -1,62 \cdot 10^{-1} + 1,36 \cdot 10^{-3} \left( h_a + R_c \left( \frac{RP - \sigma_n}{(\mu \cdot \sigma_n) + c_a} \right) \right) \right] \rho \\ & + \left[ 1,98 \cdot 10^{-1} - 9,20 \cdot 10^{-3} \left( h_a + R_c \left( \frac{RP - \sigma_n}{(\mu \cdot \sigma_n) + c_a} \right) \right) \right] (\theta \cdot \rho) \\ & + 9,80 \cdot 10^{-2} \left[ h_a + R_c \left( \frac{RP - \sigma_n}{(\mu \cdot \sigma_n) + c_a} \right) \right] - 2,0 \cdot 10^{-3} \left[ h_a + R_c \left( \frac{RP - \sigma_n}{(\mu \cdot \sigma_n) + c_a} \right) \right]^2 \\ & - 10,44 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (16)$$

Assim, considerando a eq. (16), bem como os parâmetros utilizados no desenvolvimento da microsonda automatizada para medida da resistência do solo à penetração de raízes e substituindo-se os valores de  $h_a$  e  $R_c$  para a dimensão da microsonda, sendo que os valores utilizados foram de 0,0 mm a 30,0 mm para  $h_a$  e 0,8 mm para  $R_c$ , fez-se uma avaliação a priori do comportamento do sistema desenvolvido em um solo com faixa de densidades de  $0,1 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$  e  $1,2 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$  e umidade de 4 % e 11%, conforme resultados representados na figura 3.4.

A figura 3.5 apresenta as variações teóricas da RSP com a umidade do solo em % nas densidades de  $0,1 \times 10^3 \text{kg.m}^{-3}$  e  $1,2 \times 10^3 \text{kg.m}^{-3}$ .

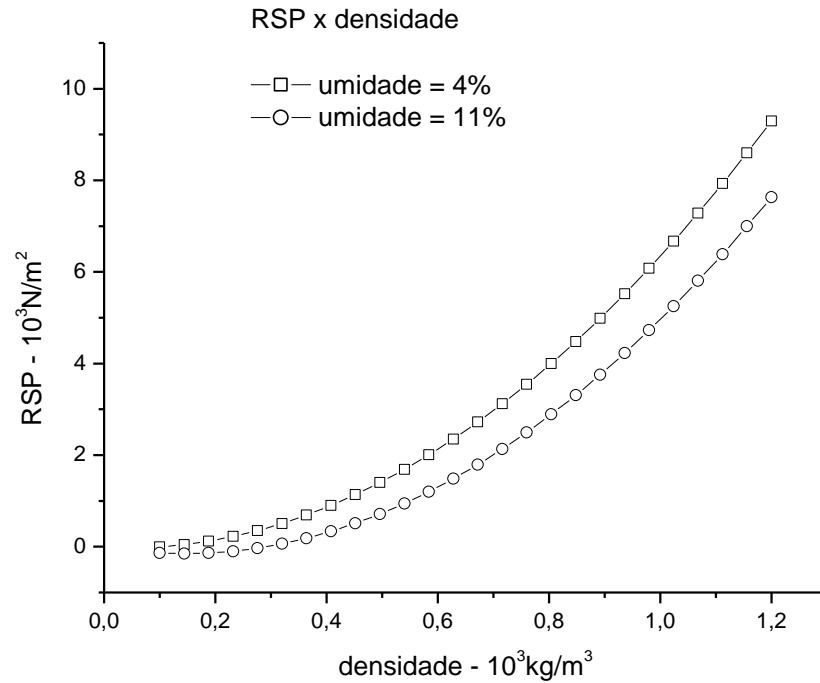


Figura 3.4 - Variação de RSP em função da variação da densidade do solo para umidade de 4% e 11%, profundidade de 0,0168 m.

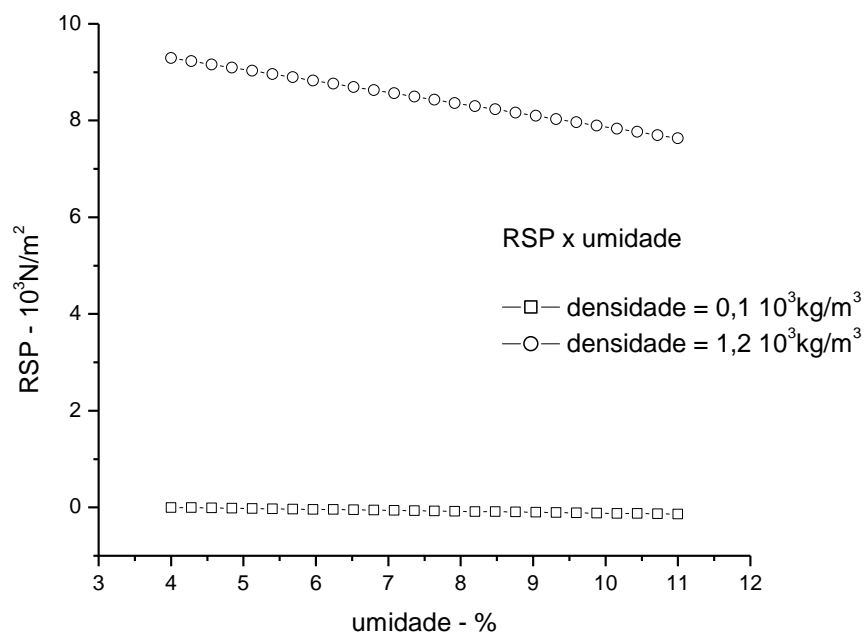


Figura 3.5 - Variação de RSP em função da umidade do solo para densidade igual  $0,1 \times 10^3 \text{kg.m}^{-3}$  e  $1,2 \times 10^3 \text{kg.m}^{-3}$  e profundidade igual a 0,0168 m.



A RSP observada variou, conforme esperado, exponencialmente com a densidade do solo, ou seja, solo de maior densidade implica em maior RSP e de menor densidade menor RSP.

Para um solo mais seco, conforme ilustrado na figura 3.4 (umidade 4%), observou-se o aumento da RSP com o aumento da densidade, com valores ligeiramente maiores de RSP em comparação aos valores para umidade igual a 11%.

Pode ser observado nos gráficos apresentados na figura 3.5, que a RSP para valores pequenos de densidade ( $0,1 \times 10^3 \text{kg m}^{-3}$  simulando um solo menos denso), é praticamente fixa e próxima de zero. Quando se passa para valores maiores de densidade ( $1,2 \times 10^3 \text{kg m}^{-3}$ , para um solo mais ou menos seco com umidade de 4%), a RSP tem valor maior, decrescendo ligeiramente quando atinge o valor de umidade igual 11%.

Outro ponto importante a considerar é que de acordo com a profundidade, para um solo homogêneo com densidade e umidade constante, o valor teórico da RSP é praticamente constante, conforme pode ser observado na figura 3.6.

Em um solo com densidade variável mas com umidade constante, é de se esperar variações dos valores de RSP medidas com a microsonda, o que pode ser observado na figura 3.7, os valores próximos de zero podem ser vistos como buracos devido, por exemplo, a rachaduras ou devido a fauna (formigueiros, buracos de raízes, entre outros) do solo.

Pode-se simular a variação de medida da RSP, ao invés de um único ponto de medida para vários outros pontos, avaliando assim o seu comportamento sob o ponto de vista da variabilidade espacial, conforme representado na figura 3.8.

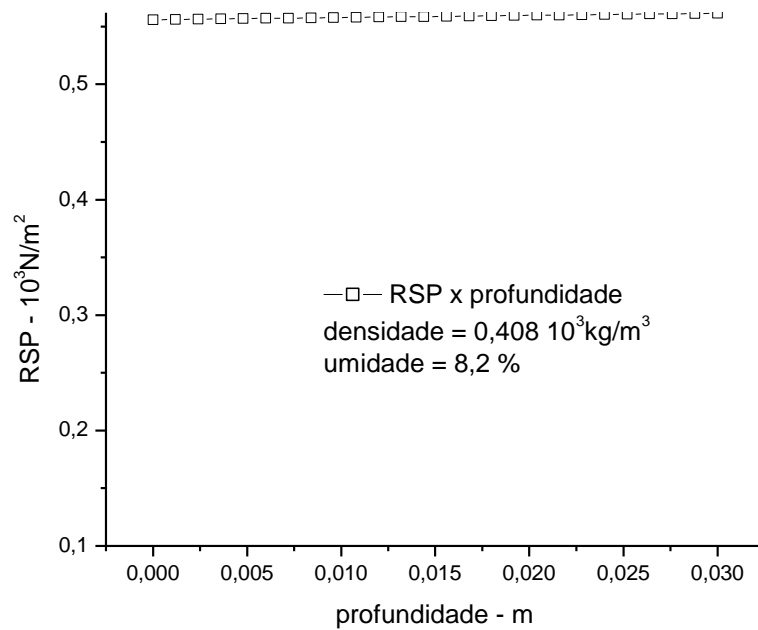


Figura 3.6 - Simulação da variação da medida de RSP em função da profundidade para um solo homogêneo tendo densidade igual a  $0,408 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$  e umidade igual a 8,2%.

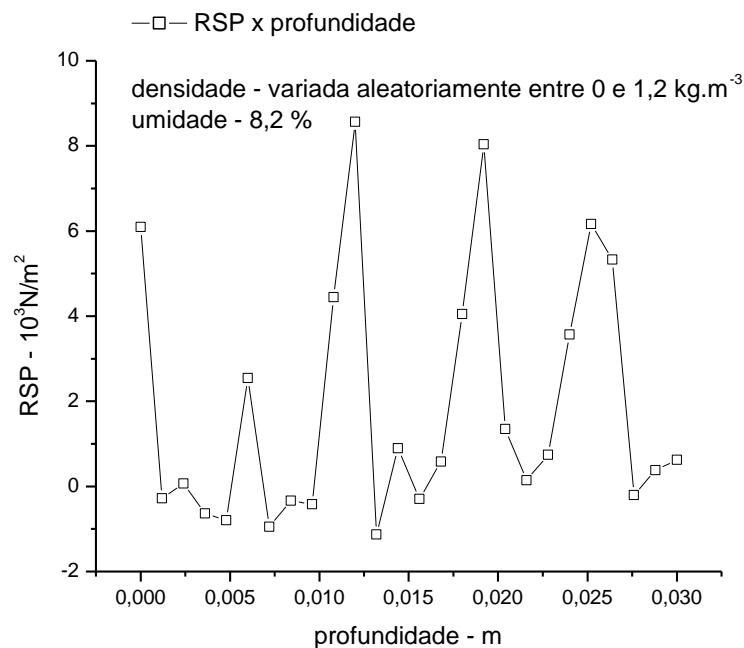


Figura 3.7 - Simulação da variação da medida de RSP em função da profundidade para um solo não homogêneo tendo a densidade variada aleatoriamente entre 0 e  $1,2 \text{ kg m}^{-3}$  e umidade igual a 8,2%.

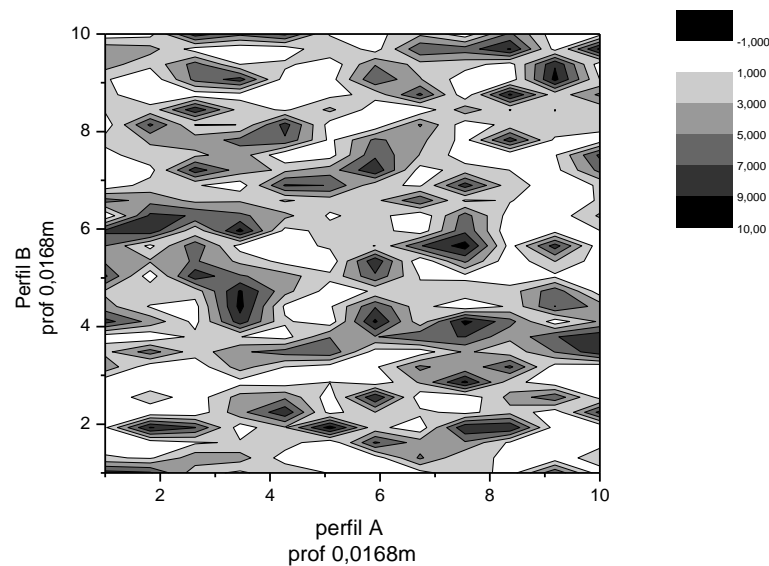


Figura 3.8 - Simulação para avaliação da variação da medida de RSP em função de um perfil de solo, para umidade igual a 4%, profundidade igual a 0,0168 m e densidade variada aleatoriamente entre 0 e 1,2 kg m<sup>-3</sup>, plano bidimensional com valores de RSP normalizado na paleta de padrão de cinzas.

De acordo com a eq. (10), pode-se fazer uma avaliação da resistência de penetração devido a fricção solo-metal na parede do cone em função de seu ângulo interno.

Considerando a eq. (10), o valor inicial de  $c_a$ , com base nos dados da figura 3.2, que é de 0,020 M N m<sup>-2</sup> e a força sobre a base do cone variando de 1 a 26 M N m<sup>-2</sup>, chega-se aos valores de  $\sigma_n$  graficados e apresentados na figura 3.9, a qual corresponde a uma curva de tendência para o comportamento de  $\sigma_n$ .

Assim, aplicando a derivada<sup>1</sup> (realizada ponto a ponto) no conjunto de valores de  $\sigma_n$ , pode-se observar que a resistência do microcone à penetração tende a diminuir com o aumento do ângulo interno do microcone no intervalo entre 25° e 35° inclusive e depois disto tende a aumentar, conforme ilustra a figura 3.10.

$$1 \frac{\partial \sigma_n}{\partial \alpha} = \lim_{\Delta \alpha \rightarrow 0} \frac{f(\alpha + \Delta \alpha) - f(\alpha)}{\Delta \alpha}$$

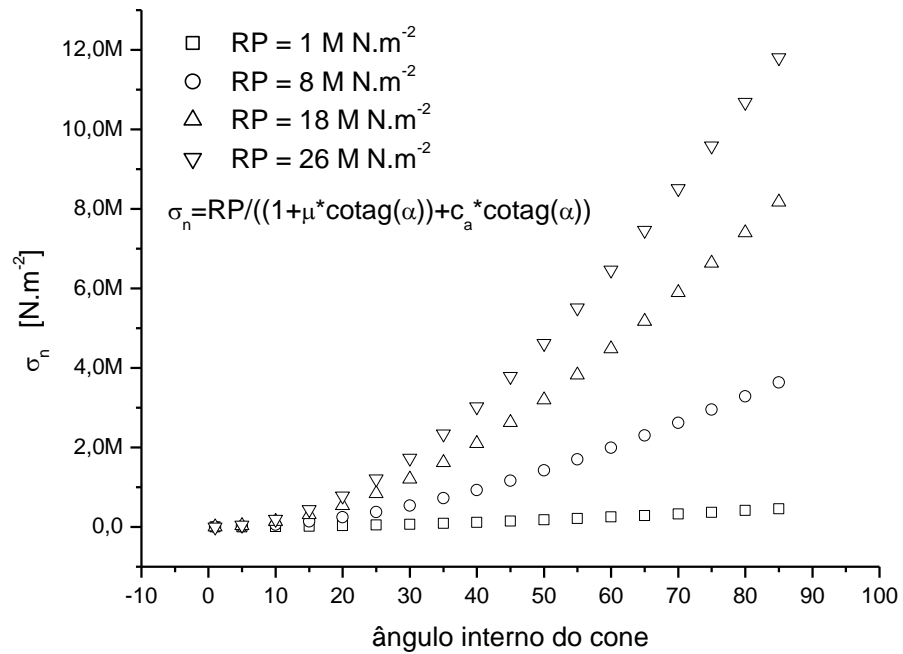


Figura 3.9 : Comportamento da resistência solo-metal da eq. (10) em função do ângulo interno do cone.

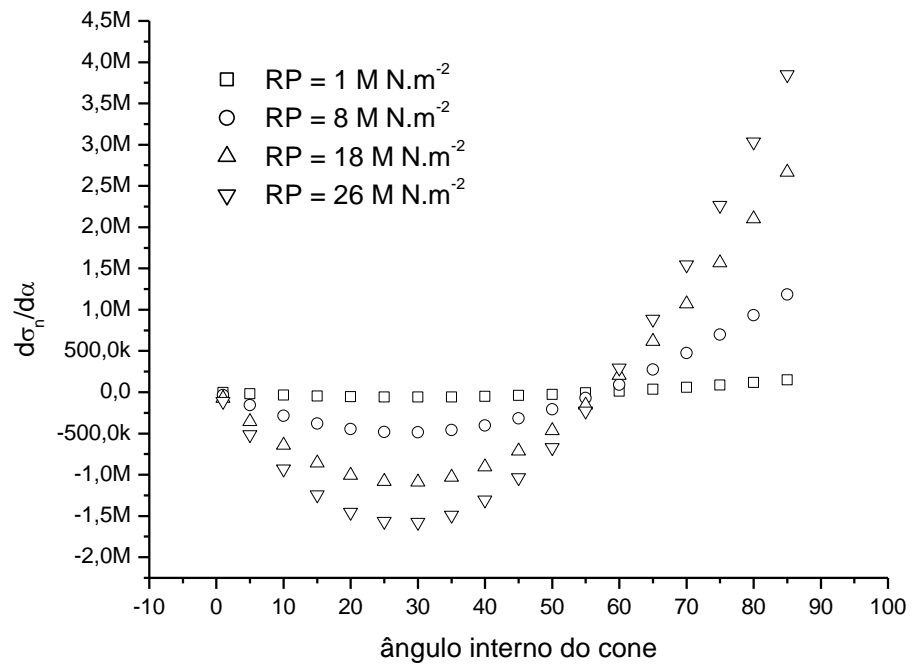


Figura 3.10 : Derivada ponto a ponto dos dados da figura 3.9.

A alta resistência do microcone à penetração para valores menores do ângulo interno está associado a uma alta fricção solo-metal e para valores maiores do ângulo a associação é feita devido a compactação do solo e a alta resistência à frente do microcone com o solo. Assim o melhor ângulo de projeto para a microsonda é da ordem de 30°.

Estas variações na avaliação teórica da RSP, observadas pelas simulações, mostraram o provável comportamento que o sistema deverá encontrar quando executando suas tarefas de medidas reais de RSP em campo.

### **3.2 Organização e estrutura do instrumento de medida**

O sistema desenvolvido é composto por módulo mecânico, módulo automatizado microprocessado, responsável pelo controle de posicionamento da microsonda de medida da resistência do solo à penetração, um computador central responsável pelo gerenciamento geral e interface com o usuário, conforme pode ser observado na figura 3.11.

A interface com o usuário é feita por um programa computacional, desenvolvido para realizar funções, tais como: comunicação entre o sistema de controle e aquisição de dados e o computador central para a realização de determinadas tarefas; recebimento dos dados coletados das medidas de resistência do solo à penetração e organização desses dados em forma de um banco de dados para uso futuro.

A interpretação dos dados é fornecida ao usuário em forma de um relatório composto de tabela e gráfico das medidas em tempo quase real, possibilitando ao usuário auxílio à tomada de decisão

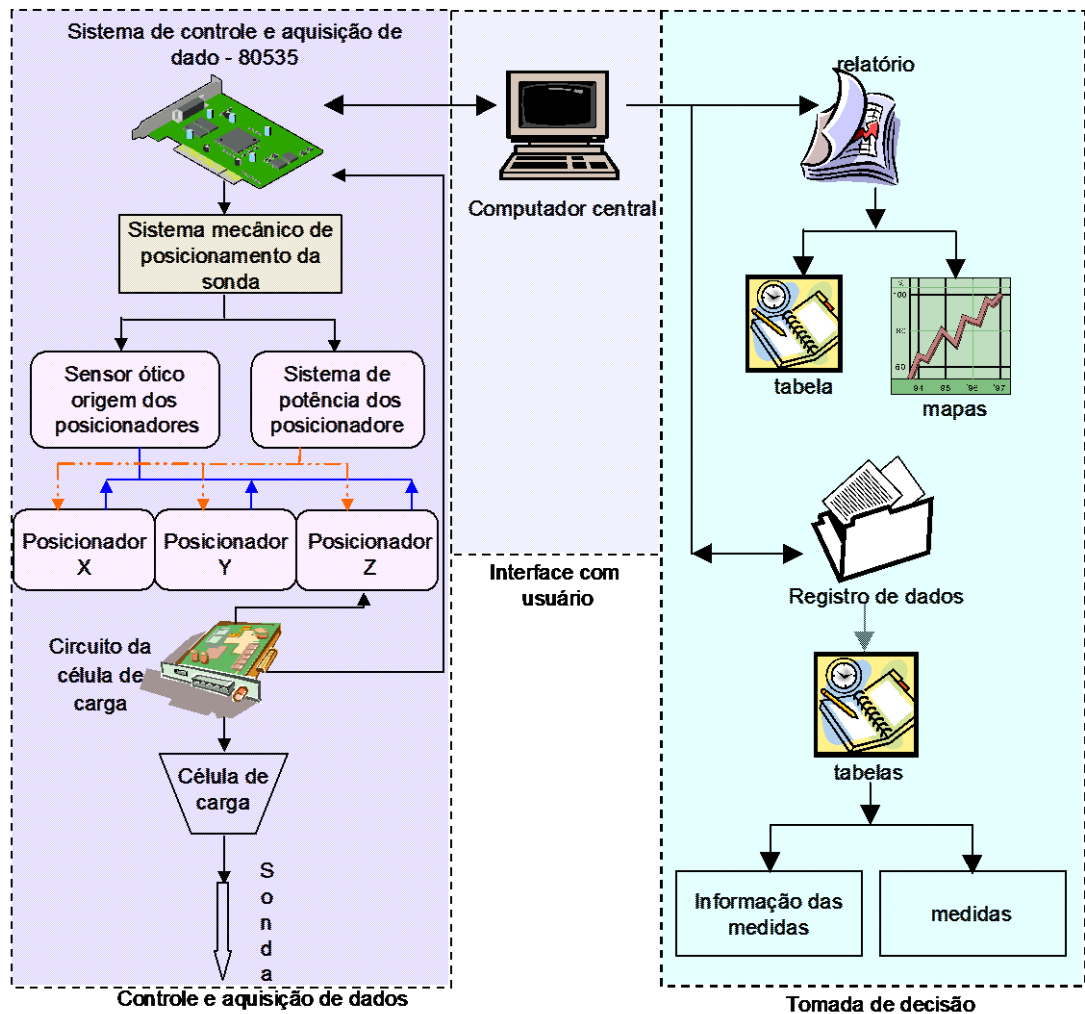


Figura 3.11 : Diagrama de bloco geral do sistema de medida de resistência do solo à penetração de raízes.

### 3.3 Módulo mecânico

O diagrama de blocos do módulo mecânico pode ser observado na figura 3.12, o qual é composto por uma mesa XYZ para localização espacial do sensor de medida de resistência mecânica à penetração no solo. A mesa XYZ é sustentada por fusos e guias de deslocamento localizados em um suporte sobre uma estrutura de apoio. A mesa XYZ, possui dois ajustes de posição um manual para localização do sensor, somente na direção do eixo X, e um automático que a localiza em qualquer coordenada dentro dos limites dos eixos.

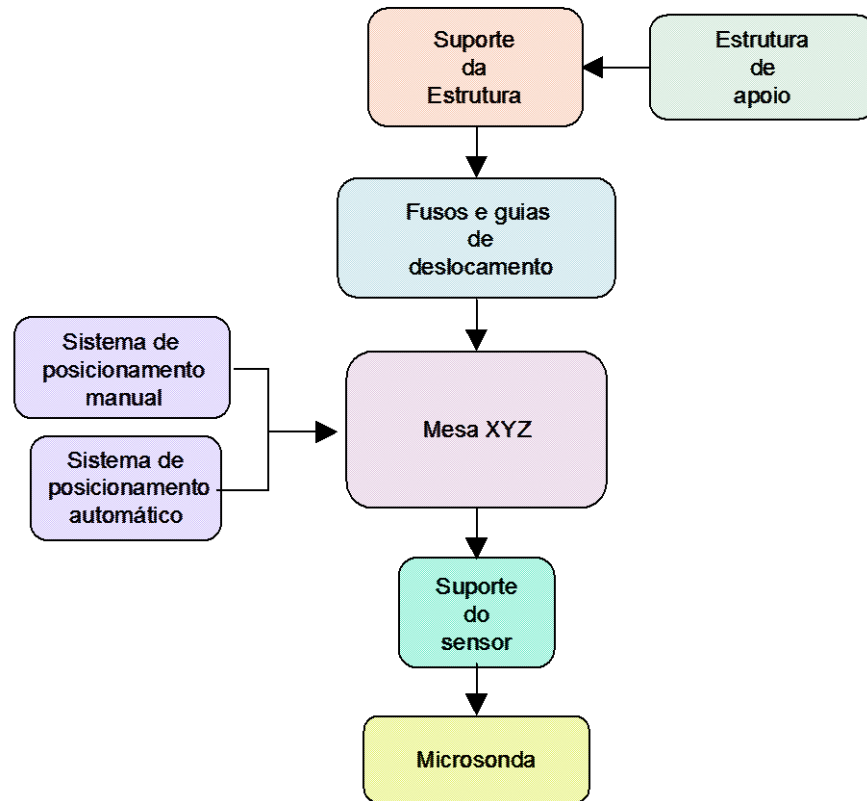


Figura 3.12 : Diagrama em bloco da parte mecânica do sistema de medida da resistência do solo à penetração de raízes.

O suporte da estrutura é feito de alumínio, composta de uma armação retangular vazada, de dimensões 1,13 m por 0,52 m, composta por dois perfilados em forma de U, de dimensões, 1,016 m x 0,127 m x 0,0635 m por 0,109 m de comprimento, conforme ilustrado na figura 3.13. A união destes dois perfilados é feita por duas chapas de tamanho 0,52 m x 0,12 m x 0,02 m, mostrado na figura 3.14. Toda a suspensão é sustentada por três pês ajustáveis, ilustrado na figura 3.15, sendo que dois são localizados em cada extremidade da armação e um centralizado no lado oposto aos dois, para possibilitar o nivelamento de toda a estrutura.

No interior da estrutura de suporte, foi montado de forma transversal uma base, indicada na figura 3.12 como Mesa XYZ, também feita de alumínio, de dimensões 0,50 m x 0,15 m x 0,075 m. É localizada no interior da armação metálica, sustentada por dois eixos retificados de diâmetro igual a 0,02 m, conforme mostrado na figura 3.16.





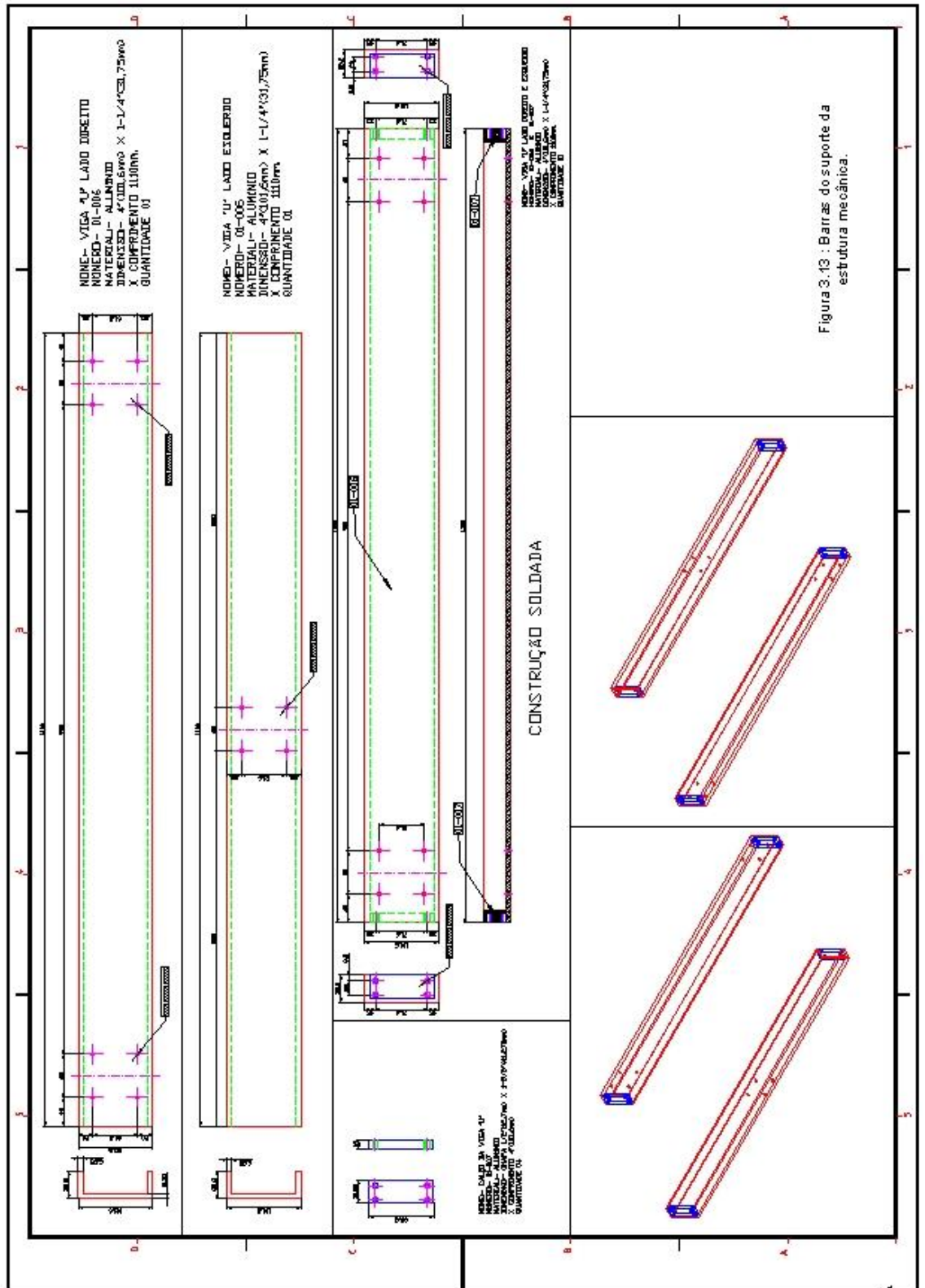


Figura 3.13 : Barras do suporte da estrutura mecânica.

Figura 3.13 : Barras do suporte da estrutura mecânica.

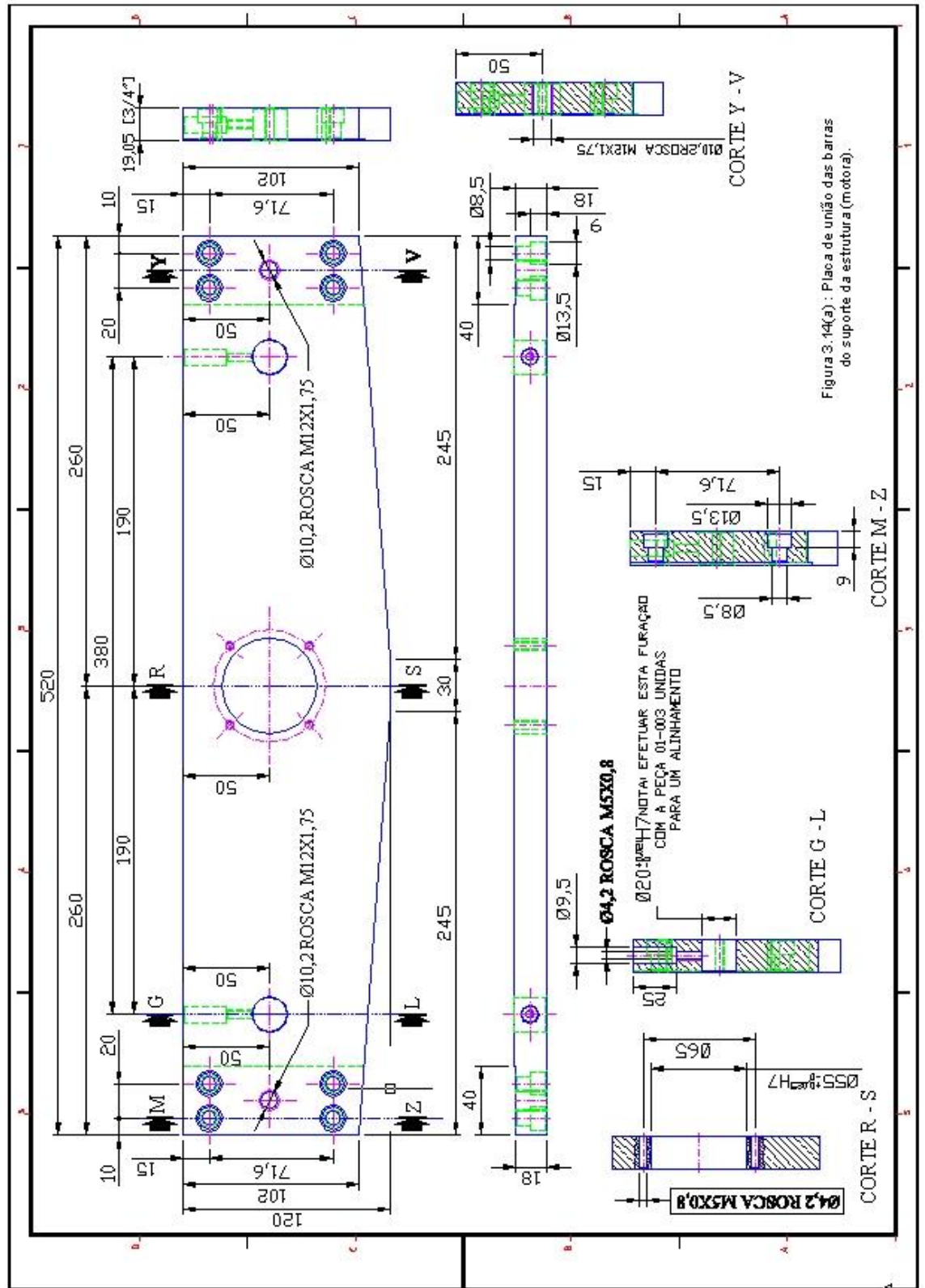


Figura 3.14(a) : Placa de união das barras do suporte da estrutura (motora).

Figura 3.14 : Chapas de união das barras do suporte da estrutura mecânica.



Figura 3.14b : Chapas de união das barras do suporte da estrutura mecânica manual

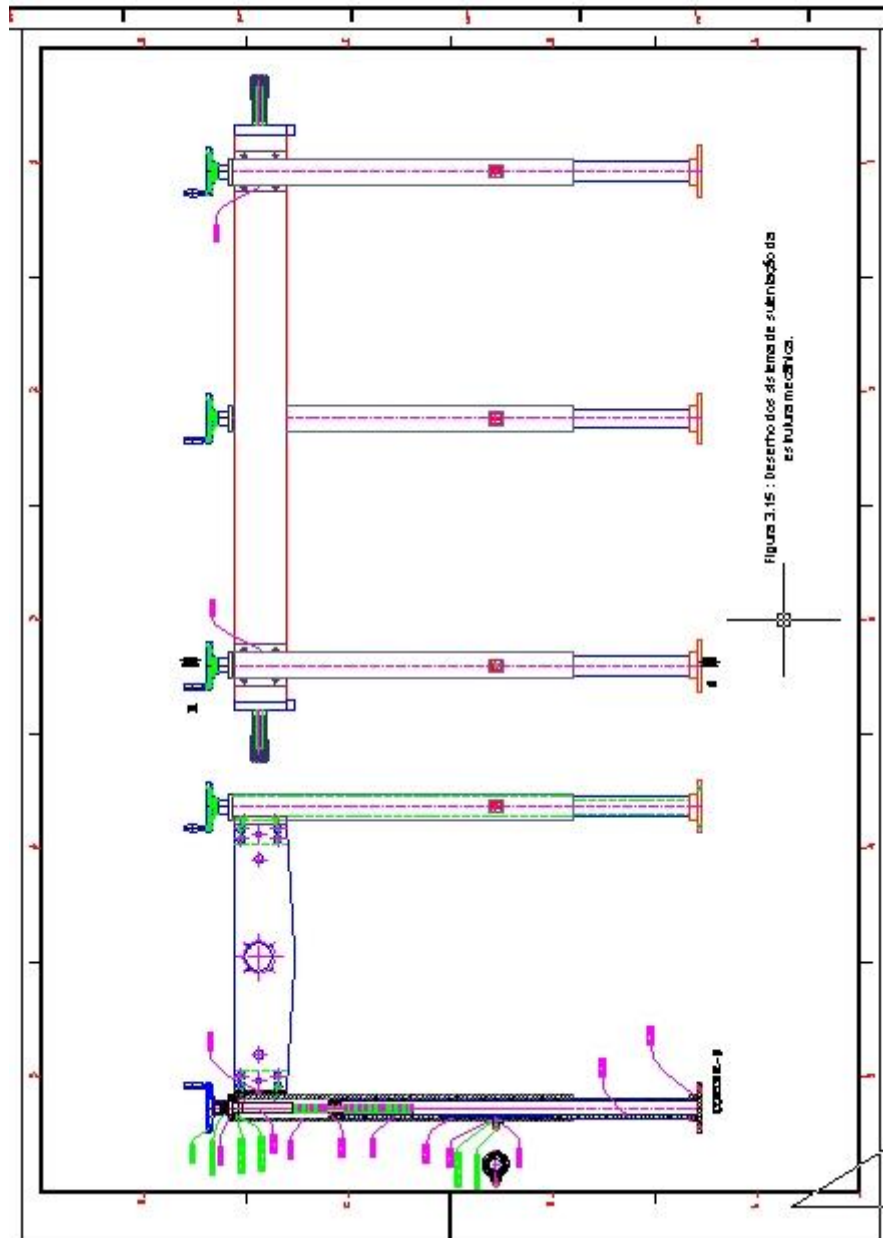


Figura 3.15 : Diagrama dos sistema de sustentação da estrutura mecânica.





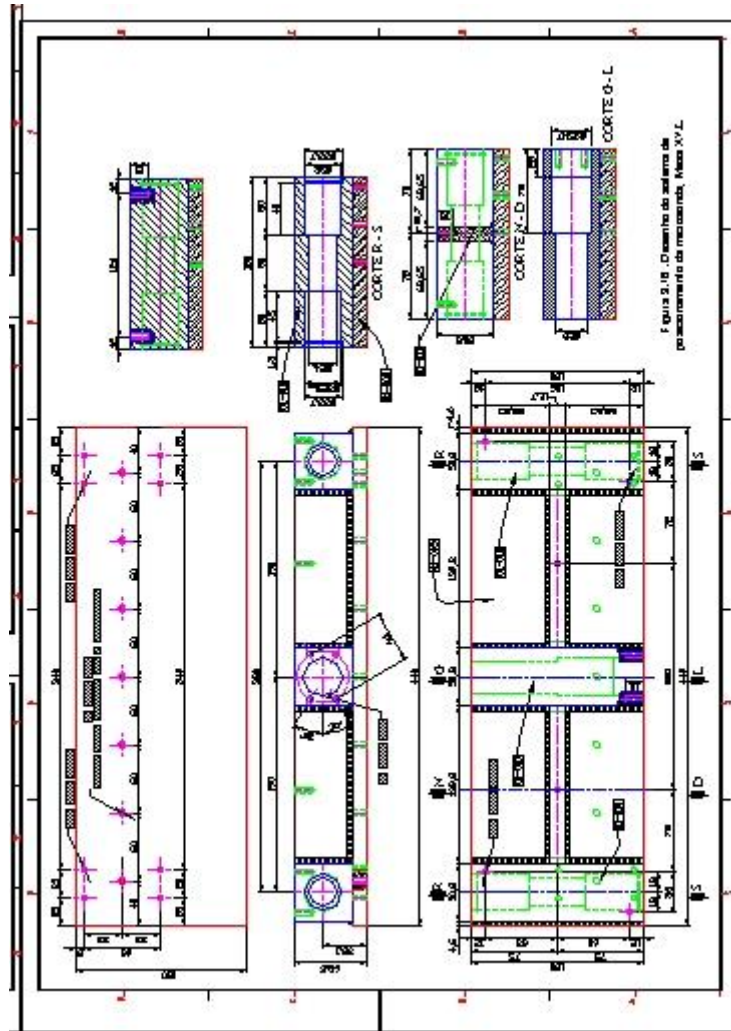


Figura 3.16 : Desenho do sistema de posicionamento da microsonda,  
Mesa XYZ.

O deslizamento do sistema de posicionamento da microsonda sobre os eixos retificados é realizado por meio de dois rolamentos lineares de esfera de 0,02 m de diâmetro.

No centro das chapas de união das barras do suporte da estrutura mecânica do sistema, passando também pelo centro do sistema de posicionamento da microsonda é montado um fuso de esfera laminado de diâmetro igual a 0,018 m e passo de  $8 \times 10^{-3}$  m. O movimento do sistema de posicionamento da microsonda é feito por este fuso através de uma porca de esfera de  $8 \times 10^{-3}$  m, localizada no centro do sistema conforme desenho na figura 3.16.

O movimento do sistema de posicionamento da microsonda, na direção do fuso de esfera, é possível através de um motor de passo localizado em uma das extremidades desse fuso, este movimento é correlacionado com o eixo X com um incremento/decremento de  $40 \mu\text{m}$  por passo do motor.

Na outra extremidade, oposta ao motor, foi colocado um volante para, se for o caso, o posicionamento manual.

Na figura 3.17 é mostrada a montagem da armação metálica com os fusos, guias e o sistema de posicionamento da microsonda.

Na parte inferior do sistema de posicionamento da microsonda, é montado todo o sistema para o deslocamento Y e Z da microsonda, conforme mostra a figura 3.18. O movimento na direção Y é feito sobre um fuso de esfera

laminado de passo  $5 \times 10^{-3}$  m e diâmetro igual a  $14 \times 10^{-3}$  m, cobrindo toda a extensão inferior do sistema de posicionamento. O deslocamento através do fuso é realizado por meio de uma porca de esfera de passo  $5 \times 10^{-3}$  m, fixada em outra base, que sustenta o sistema de deslocamento do eixo Z.

A sustentação do sistema de deslocamento do eixo Y, fica localizado sobre uma guia linear fixada na parte inferior do sistema de posicionamento da microsonda, junto com o correspondente carrinho para essa guia.

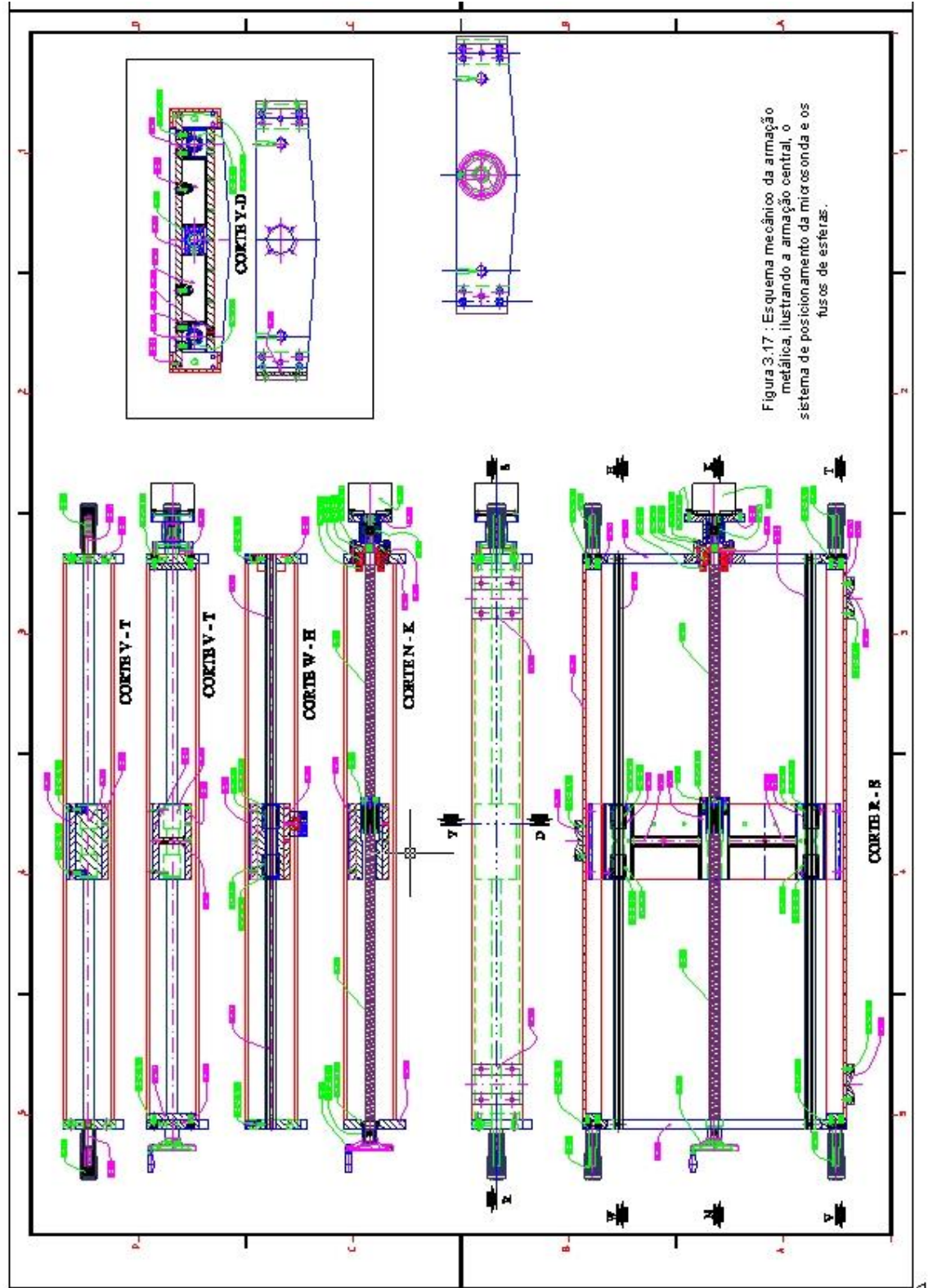


Figura 3.17 : Esquema mecânico da armação metálica, ilustrando a armação central, o sistema de posicionamento da microonda e os fusos de estibas.

---

Figura 3.17 : Diagrama mecânico da armação metálica ilustrando a armação central, a armação de sustentação, o sistema de posicionamento da microsonda e o fuso de esfera.

O movimento na direção do eixo Y é possível por meio de um motor de passo localizado em uma das extremidades do fuso com um incremento/decremento de  $25 \mu\text{m}$  por passo do motor.

Fixado ao carrinho de movimento do eixo Y, esta uma terceira base, que serve para a sustentação de todo o sistema de movimento da microsonda, que pode ser observado na figura 3.18 como o sistema montado na vertical.

O sistema de movimento da microsonda é composto de dois canos de alumínio de diâmetros diferentes, um interno de  $50 \times 10^{-3} \text{ m}$  de diâmetro e outro externo de  $60 \times 10^{-3} \text{ m}$  de diâmetro, de forma que o interno possa se movimentar dentro do externo tipo telescópio.

O movimento é realizado, também, por meio de um fuso de esfera laminado de passo  $5 \times 10^{-3} \text{ m}$  e diâmetro igual a  $14 \times 10^{-3} \text{ m}$ , conectado a uma

porca de esfera de passo  $5 \times 10^{-3}$  m, fixada no cano interno. Na extremidade superior, o fuso é ligado ao eixo de um motor de passo, responsável pela movimentação da microsonda com incremento/decremento de  $25 \mu\text{m}$  por passo do motor.

Na extremidade oposta do motor esta montado o conjunto de medida de força composto por uma célula de carga, a microsonda e circuitos de alimentação e condicionamento do sinal da célula de carga, conforme pode se visto na parte inferior da figura 3.18, e em maior detalhe na figura 3.19.

### 3.4 Microsonda

O desenvolvimento da microsonda foi fundamentada na norma ASAE R313.1 (descrita no capítulo 1) sendo que, devido a escala de trabalho, fez-se uma análise de sua resposta com o ângulo de ponta do cone variando de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Entretanto, como a microsonda atua por passo incremental no perfil de solo a velocidade de penetração não foi considerada. A microsonda não atua de forma contínua, realizando um total de 66 medidas, sendo que as 40 primeiras são com incremento de 0,1 mm e as 20 restantes com incremento de 1 mm, ou seja, a cada medida o sistema para e faz-se a leitura da medida (para a sonda de 30 mm) e realizando também um total de 66 medidas, mas com incremento de 2 mm para a sonda de 130 mm.

Assim, baseado nas modelagens já descritas, a microsonda foi desenvolvida a partir de um bastonete de tungstênio de diâmetro  $1,6 \times 10^{-3}$  m por 0,2 m de comprimento, sendo que para a microsonda de 30 mm foi usado o comprimento de  $57 \times 10^{-3}$  m e para a de 130 mm o comprimento de 150 mm. também foram feitas algumas de aço inoxidável de mesmas dimensões, conforme ilustra a figura 3.20.

Foram construídas dois tipos diferentes de microsondas, sendo a primeira cilíndrica com corpo rebaixado logo acima da ponta e uma outra sem o rebaixo no corpo e os cones, em ambas, são de mesma dimensões ou seja ,

ângulo interno de  $30^\circ$ , altura de  $2,98 \times 10^{-3}$  m e diâmetro de base igual a  $1,6 \times 10^{-3}$  m, conforme ilustrado na figura 3.20.

O detalhe do rebaixo no corpo da microsonda da figura 3.20, foi implementado com a intenção de aliviar o efeito do atrito do corpo da mesma quando esta estivesse em uso.

A microsonda é unida a célula de carga por meio de uma pinça de rosca, conforme ilustrado a direita e acima da figura 3.19.

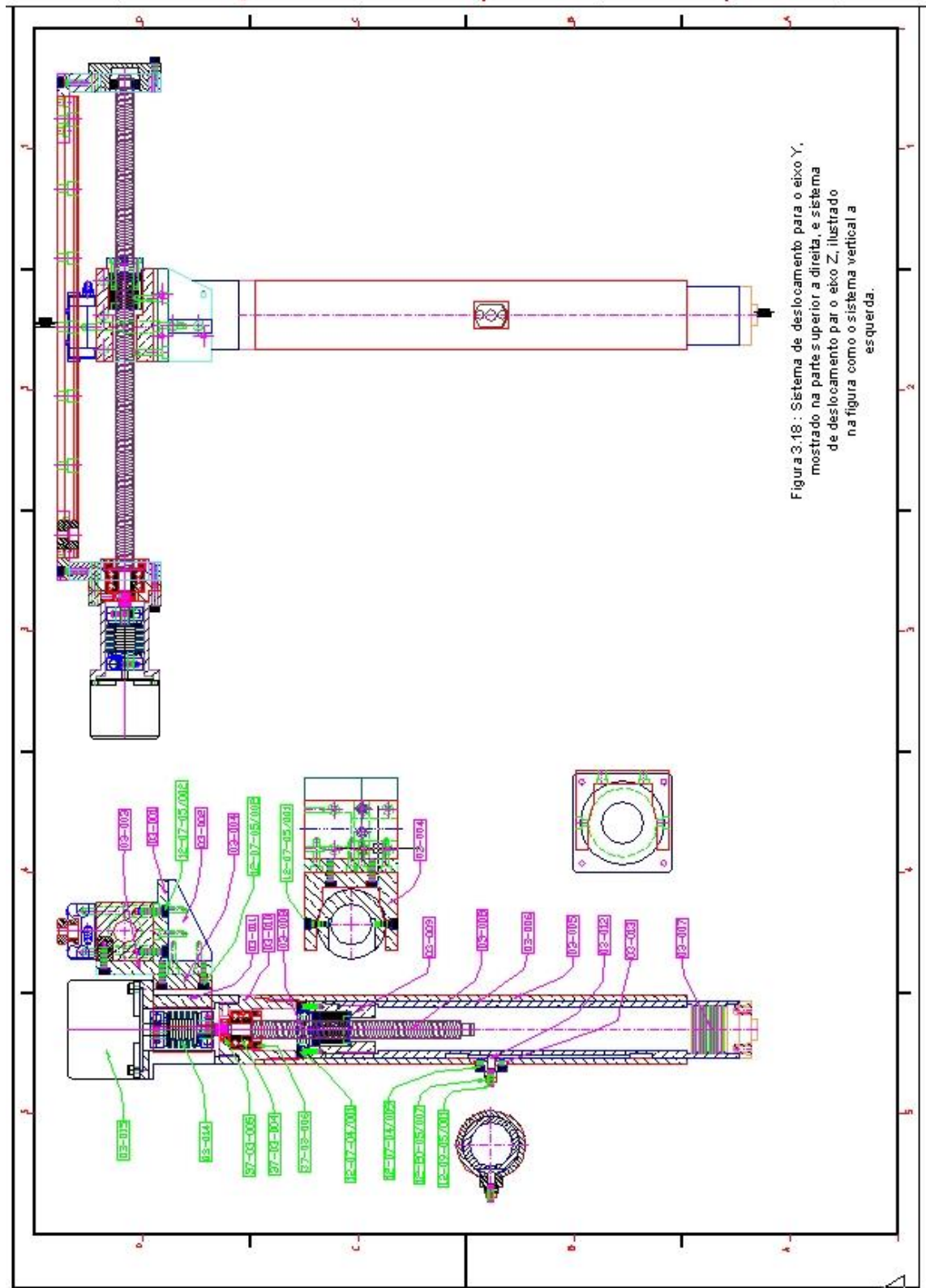


Figura 3.18 : Sistema de deslocamento para o eixo Y, mostrado na parte superior a direita, e sistema de deslocamento para o eixo Z, ilustrado na figura como o sistema vertical a esquerda.

Figura 3.18 : Sistema de deslocamento para o eixo Y, mostrado na parte superior a direita, e sistema de deslocamento para o eixo Z, ilustrado na figura como o sistema vertical a esquerda





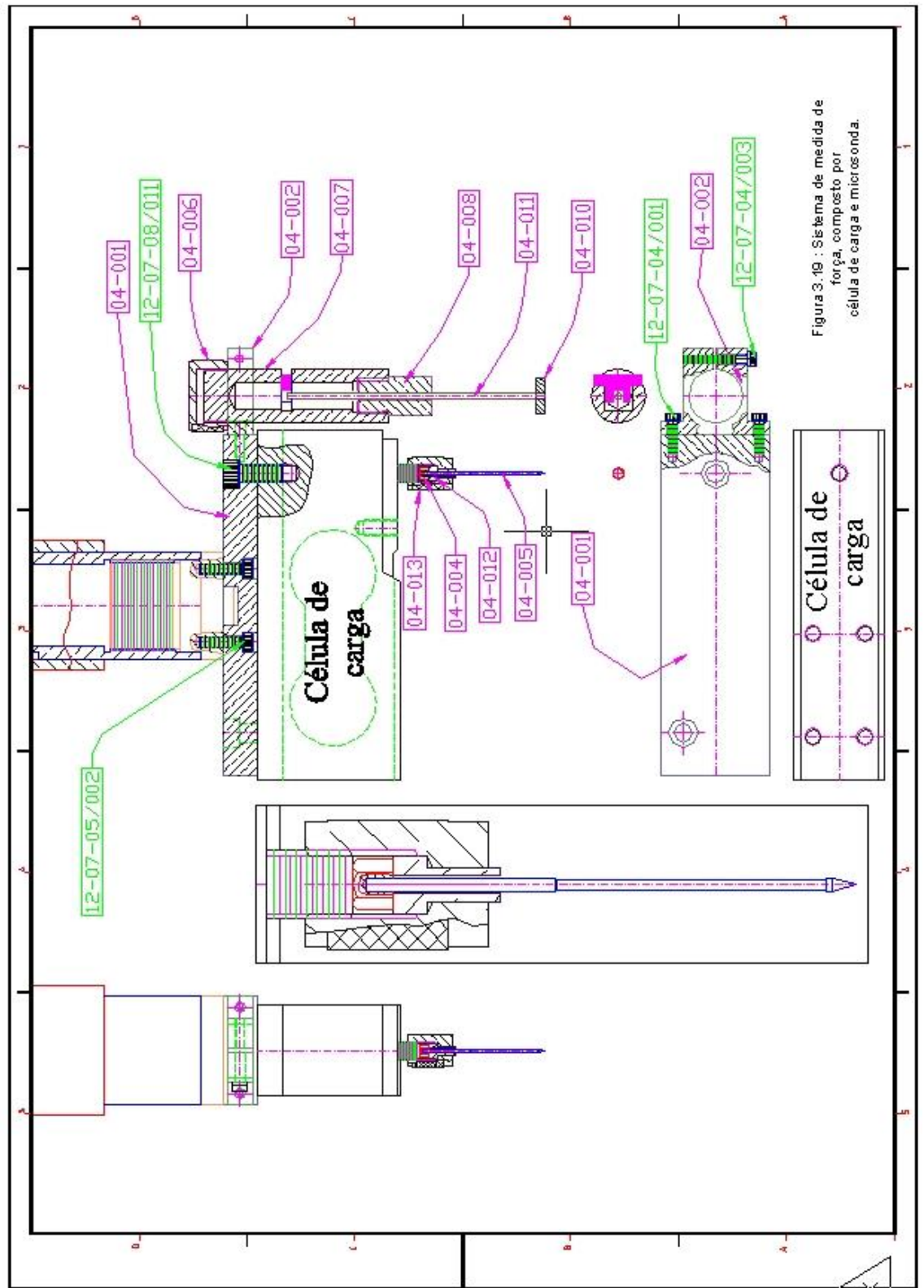


Figura 3.19 : Sistema de medida de força, composto por célula de carga e microonda.

Figura 3.19 : Sistema de medida de força, composto por célula de carga e microsonda

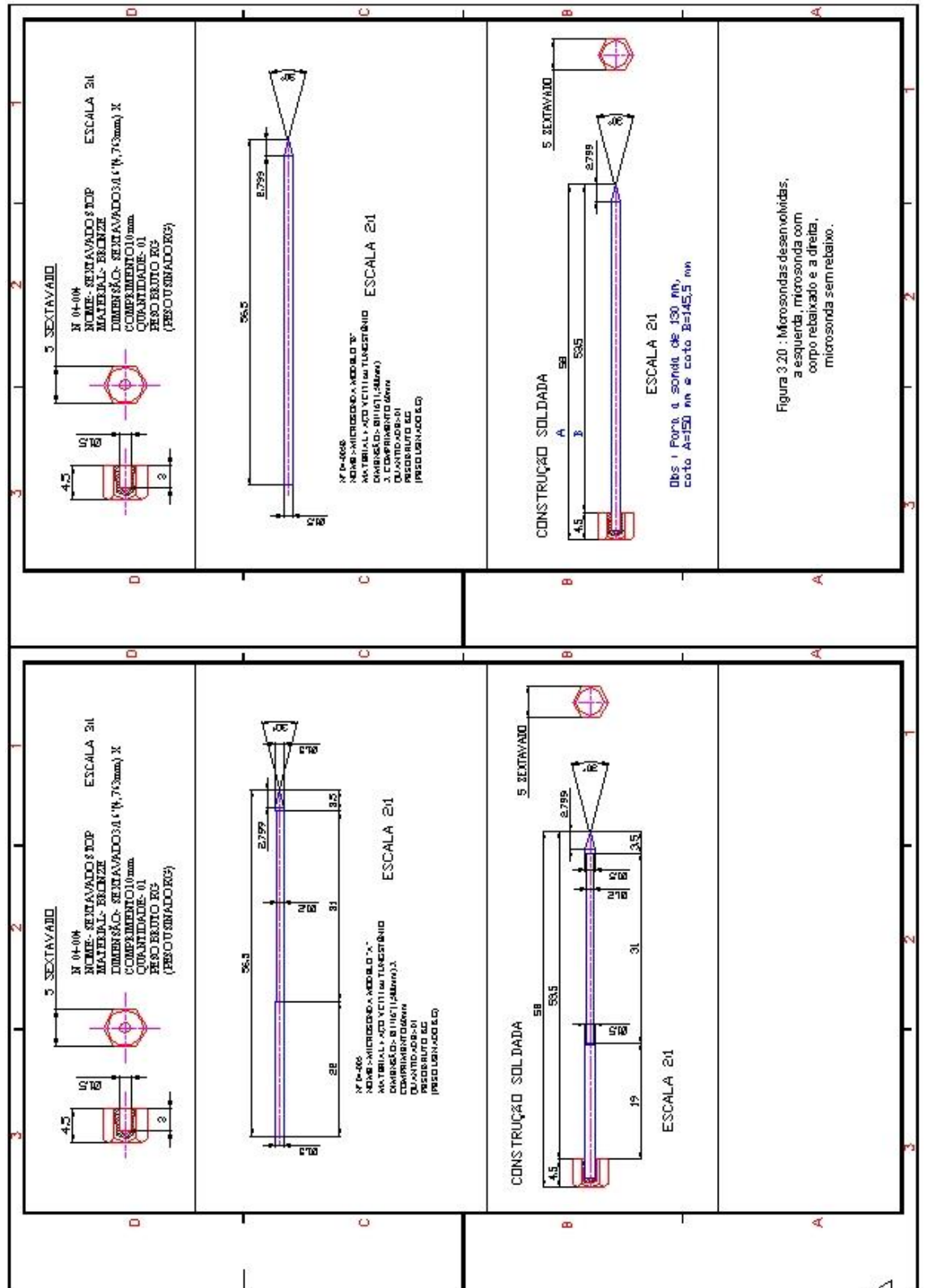


Figura 3.20 : Microsondas desenvolvidas, a esquerda, microsonda com corpo rebavado e a direita, microsonda sem rebaixo.

---

Figura 3.20 : Microsondas desenvolvidas: a esquerda, microsonda com corpo rebaixado e a direita, microsonda sem rebaixo.

### **3.5 Sensor de posição da microsonda**

Ao se fazer uma medida em um ponto no solo, a microsonda deve ser ajustada até encontrar o solo e a partir daí fazer as medidas de força. Para este ajuste foi desenvolvido um sensor de posição da microsonda, representado na figura 3.19 na parte da frente da célula de carga. Sua concepção consiste de uma chave ótica transpassada por um eixo, em cuja extremidade foi montado um pequeno disco que encostará no solo, e está nivelado com a ponta da sonda, de modo que quando ele tocar o solo a ponta da microsonda estará na posição inicial de trabalho. O sinal do sensor ótico é monitorado pela porta P5.4 do microcontrolador 80535.

### **3.6 Módulo eletrônico**

A figura 3.21 ilustra o diagrama em blocos do sistema eletrônico, o qual é composto basicamente de uma unidade central microprocessada com o microcontrolador 80535; uma unidade de circuitos de potência para alimentação e conversão de sinais para os motores de passo e alimentação de tensão em geral; sistemas de posicionamento, compostos pelos motores de passo; célula de carga, circuito condicionador de sinal elétrico da célula de carga e um computador central, responsável pela interface usuário e sistema, os quais serão discutidos e detalhados nos tópicos a seguir.

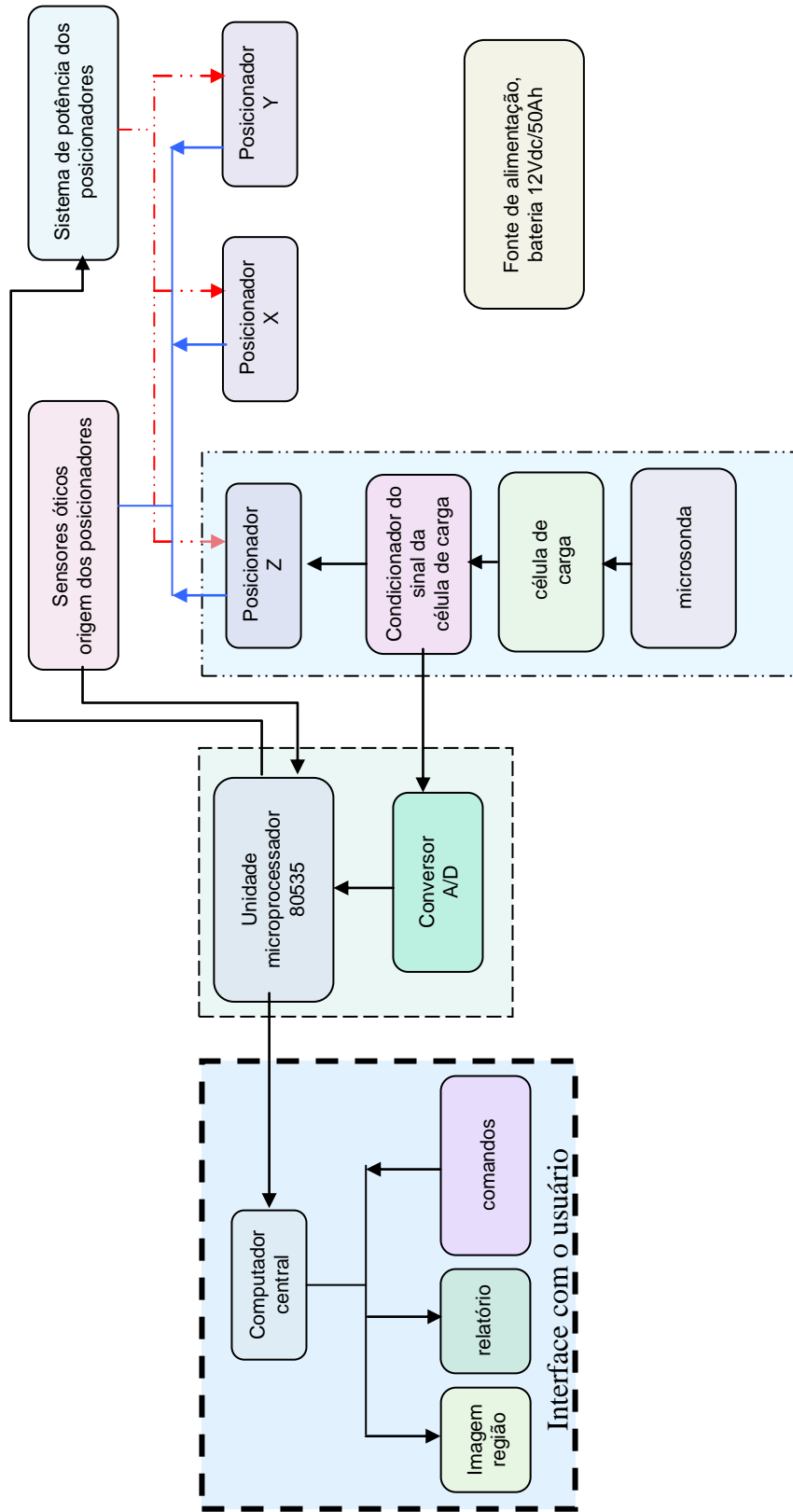


Figura 3.21 : Diagrama em blocos do sistema eletrônico do instrumento de medida da resistência do solo à penetração de raízes .

### 3.6.1 Sistema microcontrolado

A unidade microprocessada foi desenvolvida utilizando-se um microcontrolador 80535, o qual é baseado na arquitetura do microcontrolador 8051 e apresenta vantagens comparativas quanto às suas características, a placa de circuito impresso com a disposição dos componentes eletrônicos é mostrada na figura 3.22, nela pode-se observar a localização das memórias RAMs e EPROM, a direita da figura, e no centro e abaixo o microcontrolador 80535. O diagrama elétrico desta placa pode ser observado na figura 3.23.

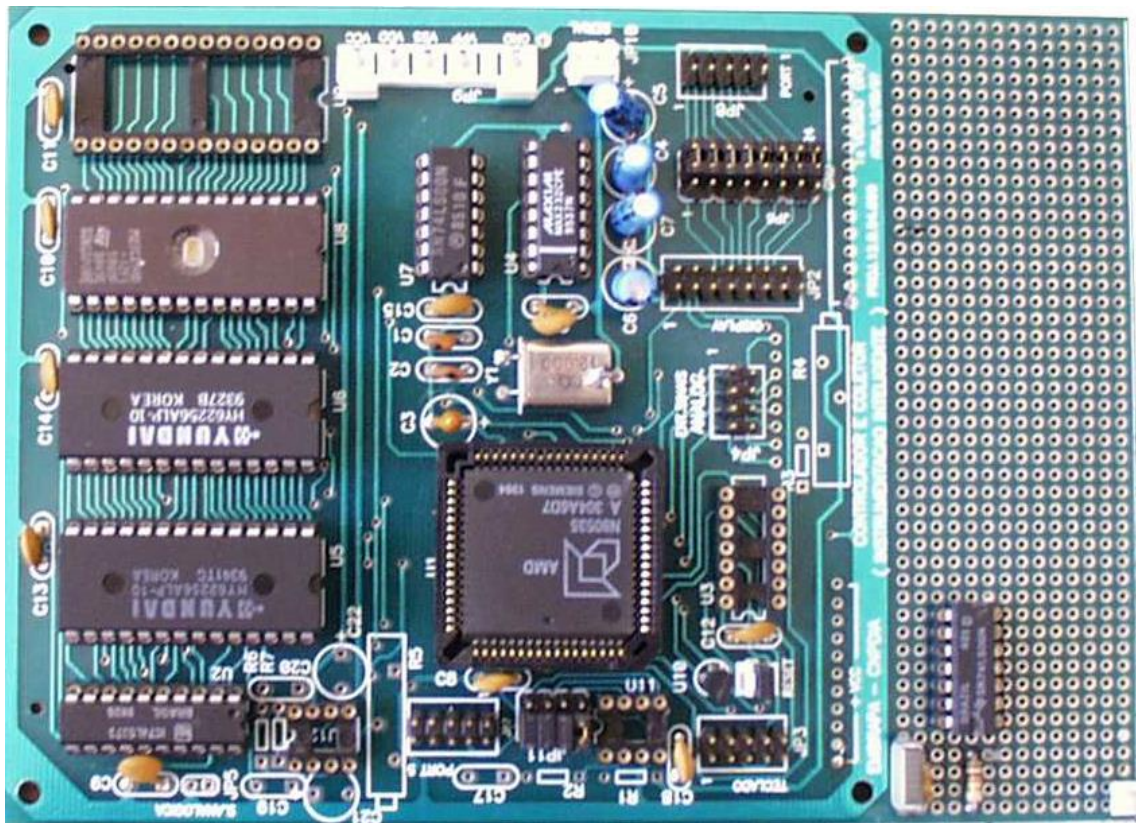


Figura 3.22 : Placa de circuito impresso para o microcontrolador 80535 e periféricos.

A CPU 80535 é representada na figura 3.23 pelo bloco U1. No bloco, ligado aos pinos 40 e 39 está o circuito de oscilador, composto de um cristal de 12MHz e dois capacitores, C1 e C2 de valor 32pF. O oscilador alimenta o gerador de frequência interno, o qual fornece os pulsos internos do *chip* que definem as fases internas, os estados internos e os ciclos de máquina. Logo



abaixo, ligado ao pino 10 ( $\overline{RST}$ ), está o circuito elétrico de *reset*, que é composto de um circuito integrado chamado de VP1003, definido como um supervisor de sistema digital, que realiza a função de *reset* no momento da alimentação de tensão no sistema. Quando o sistema é inicializado através da alimentação de tensão, o CI VP1003 espera até a tensão de alimentação estabilizar e aí coloca a sua saída pino 3 em estado lógico 0 (zero), reiniciando o sistema.

Os pinos de 13 a 20 são as entradas analógicas AN7 a AN0, sendo utilizada a entrada AN0, pino 20, como entrada analógica do sinal proveniente da célula de carga.

O pino 11,  $V_{ref}$ , é ligado diretamente a tensão de alimentação; o pino 12,  $A_{gnd}$ , denominado de terra analógico é ligado ao terra geral da placa e o pino 37,  $V_{bb}$ , conforme sugestão do fabricante, é ligado a um capacitor de tântalo de valor 1 $\mu$ F. A porta P4 (P4.0 a P4.7), pinos 1 a 9, é disponibilizada para uso futuro no controle de um teclado. Parte da porta P5 (P5.0 a P5.7), pinos 60 a 67, é usada para habilitar e desabilitar o motor Z; reconhecimento da posição dos motores X, Y e Z por meio de sensores óticos e como indicadora de posição inicial da microsonda. As respectivas funções de cada pino da porta 5 é mostrada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 : Funções da porta 5.

| Porta 5 | Função                        |
|---------|-------------------------------|
| P5.0    | Hab./Desab. motor Z           |
| P5.1    | Início motor X                |
| P5.2    | Início motor Y                |
| P5.3    | Início motor Z                |
| P5.4    | Posição inicial da microsonda |
| P5.5    | Uso futuro                    |
| P5.7    | Uso futuro                    |
| P5.7    | Uso futuro                    |

Figura 3.23 : Diagrama elétrico da placa microprocessada



A porta de controle P3 (P3.0 a P3.7), pinos 21 a 28, é usada para controle de interrupções e comunicação serial, usando os pinos 27 e 28,  $\overline{WR}$  e  $\overline{RD}$  respectivamente, para controle de escrita e leitura das memórias de programa e de registro de dados e os pinos 21 e 22, RXD e TXD, para a comunicação serial.

Responsável pela maioria dos sinais de controle dos motores X, Y e Z está a Porta P1 (P1.0 a P1.7), pinos 29 a 36, com exceção da porta P1.0 que esta inativa, todas as outras portas são usadas em tarefas específicas, tais como geração de pulsos, seleção, sentido de rotação e habilitar e desabilitar os motores. As funções de cada pino dessa porta é mostrada na tabela 3.2.

Tabela 3.2 : Funções dos pinos da porta P1.

| Pino da Porta P1 | Função   |
|------------------|--|
| P1.0             | Não usada  |
| P1.1             | Seqüência de pulsos para motor X e Y   |
| P1.2             | Sentido de rotação do motor X<br>1 – sentido anti-horário<br>0 – sentido horário |
| P1.3             | Habilitar motor X<br>1 – habilitado<br>0 – desabilitado                          |
| P1.4             | Sentido de rotação do motor Y<br>1 – sentido horário<br>0 – sentido anti-horário |
| P1.5             | Habilitar motor Y<br>1 – habilitado<br>0 – desabilitado                          |

|      |  |
|------|--|
| P1.6 | Seqüência de pulsos para motor Z   |
| P1.7 | Sentido de rotação do motor Z<br>1 – sentido anti-horário<br>0 – sentido horário |

As portas P2 e P0 (P2.0 a p2.7 e P0.0 a P0.7), pinos 41 a 48 e 52 a 59 respectivamente, são usadas para controle do barramento de endereço e de dados, sendo que a porta P2 é usada para mapear os bits de alta ordem e P0 os bits de baixa ordem do barramento de endereço ou seja, P0 para os bits de A0 a A7 e P2 para os bits de A8 a A15.

Além do controle de mapeamento do barramento de endereço a porta P0, multiplexa o barramento de dados em conjunto com os pinos ALE (50), PSEN (49), dependendo dos níveis lógicos presente nos mesmos. Para multiplexar o barramento de dados com o de endereço é usado o circuito integrado 74LS373 (U2), que é constituído de oito flip-flops tipo D com trava e sensível a nível, no caso sensível a subida do sinal digital.

As memórias de programa, U8 e U9, são duas memórias UV EPROMs (27C256) de 256Kbit, organizada de 32.768 por 8 bits. Onde é armazenado o programa residente. A seleção do banco de memória é possível por meio do circuito integrado 74LS00 (U7D), porta Não E, através do pino de endereço A15, da porta P2 (P2.7), do barramento de endereço. As memórias de dados, U5 e U6, são duas memórias RAMs estáticas (62256) de 256Kbit, organizada de 32.768 por 8 bits, onde são armazenados os dados durante a execução do programa residente. A seleção do banco de memória também é feita por meio de U7D.

A comunicação serial é feita por meio do circuito integrado MAX232, bloco U4, apesar do microcontrolador 80535, ter as saídas, pinos 21 e 22, RXD e TXD respectivamente, para realizar a função de comunicação serial, estas operam em nível lógico 0 e 1(0 e 5Vdc), e o padrão para comunicação serial é nível lógico 0 igual a -12Vdc e nível lógico 1 igual a +12Vdc, assim o circuito

integrado MAX232 faz a respectiva conversão dos níveis lógicos 0 a 5 Vdc para -12 a +12Vdc, respectivamente.

A comunicação serial com o computador é feita através de um cabo ligado em um conector DB9 fêmea localizado na parte inferior da caixa de acondicionamento da placa microprocessada e de potência. O conector DB9 é ligado a um cabo de três vias tendo em sua extremidade um conector “*modul*” fêmea de três posições, conforme pode ser visto no diagrama da figura 3.23 no bloco “*conexão para comunicação serial*”.

A conexão via cabo obedece o padrão RS-232 para DB9, ou seja: pino 2 recepção e pino 3 transmissão, e pinos 1 e 5 terra analógico. A comunicação serial neste caso é feita via três fios.

### **3.6.2 Circuito da placa de potência**

A placa com o circuito de potência é representada no diagrama de blocos da figura 3.21. O circuito faz a conversão dos sinais digitais, em nível TTL, da placa microprocessada para os níveis de sinais necessários para alimentar os motores de passo. Contêm, também, algumas fontes de tensão para todo o sistema.

A placa microprocessada comunica-se com a placa de potência via cabo através do conector JP2, ligado diretamente a porta P1 e também através do conector JP7, ligado a porta P5, responsável pelos restantes dos comandos.

O esquema elétrico da placa de potência pode ser observado na figura 3.24. A comunicação desta placa com a placa microprocessada é feita através do conector JP12, ligado diretamente aos circuitos integrados 74HC245, blocos U17 e U18, que são buffers bidirecionais de três-estados, sendo que U17 está direcionado do conector para o restante da placa e U18 recebe os sinais dos acopladores óticos para o conector.

Ao lado dos circuitos U17 e U18, estão desenhados os sensores de posição inicial dos motores, um para cada motor. Estes sensores são chaves óticas compostas, no mesmo invólucro, por um diodo emissor de luz infravermelho e um transistor receptor. Uma pequena chapa de metal cruza o vão entre o fotodiodo e o fototransistor, obstruindo a passagem de luz, com isto, o transistor é levado a zona de corte, fazendo com que a sinal de saída vá ao nível zero de tensão. Através de um programa computacional, estes sinais são monitorados toda vez que é executado um comando de voltar os motores para a posição inicial.

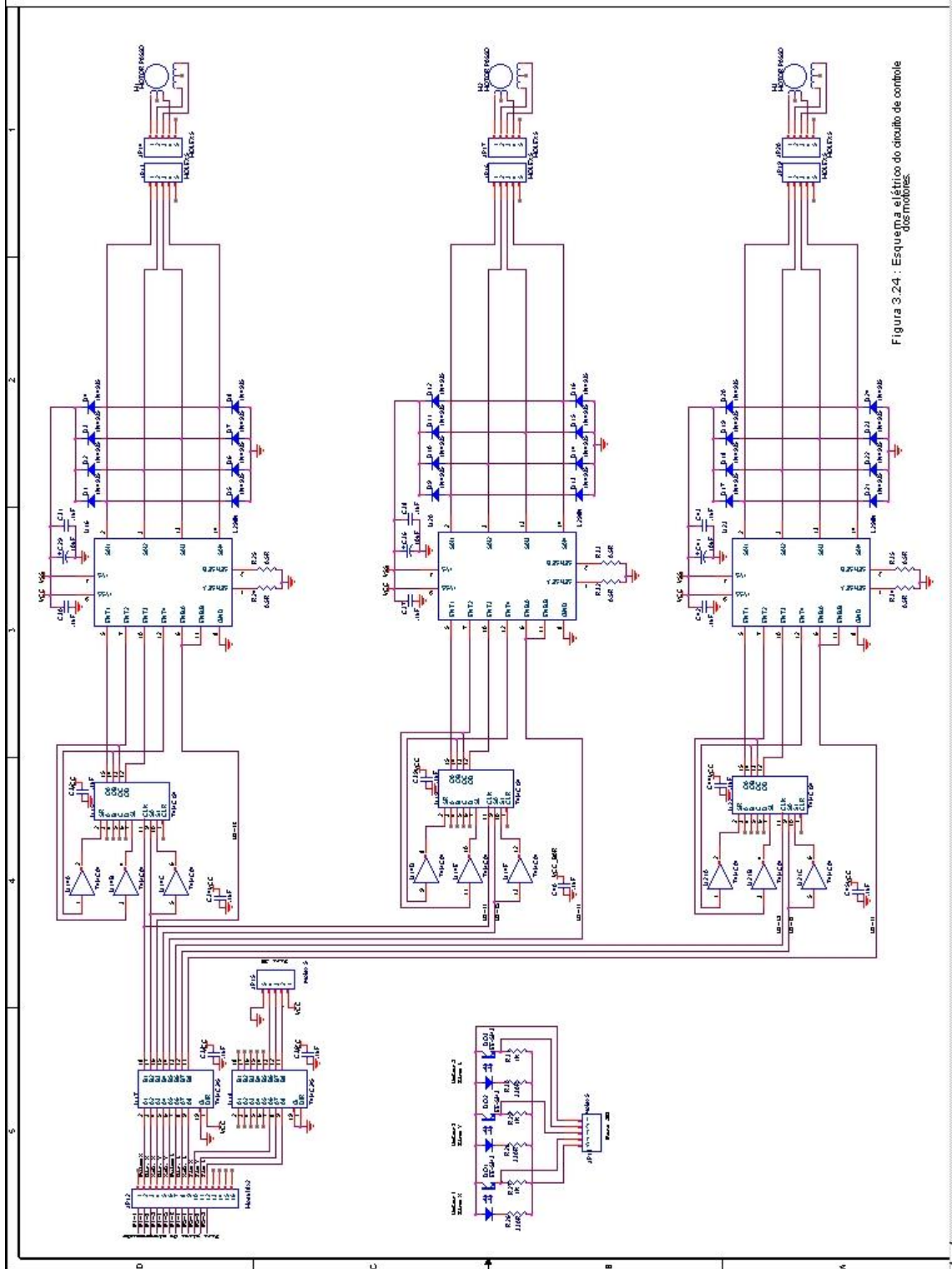


Figura 3.24 : Esquema elétrico do circuito de controle dos motores.



A conversão do trem de pulsos de níveis TTL para um trem de pulso de nível compatível para poder fazer os motores girar é feita por meio do circuito integrado L298N, de fabricação STMicroeletronics (STMicroeletronics, 2003), que é um circuito integrado monolítico de 15 pinos, duplo condutor de ponte completa de alta corrente e tensão projetado para aceitar os níveis padrões TTL e cargas indutivas tais como reles, solenóides, motores de corrente contínua e de passo.

Junto a cada CI L298N esta ligado um circuito integrado 74HC194, que é um registrador de deslocamento universal bi-direcional de 4 bits, responsável pela conversão do sinal de entrada, vindo da porta P1 do microcontrolador 80535, na forma de um trem de pulso serial em um sinal deslocado bit a bit na forma paralela, tanto para a direita como para a esquerda.

Os motores de passo representados na figura 3.24 como M1, M2 e M3 são os motores X, Y e Z, os quais possuem as seguintes características:

i) O MotorX e MotorZ são de fabricação da SYNCRO Eletromecânica LTDA (SYNCRO, 199?), com ângulo de passo de  $1,8^\circ$ , número de passos por volta de 200, precisão de passo  $\pm 5\%$ , peso de 1250g, tensão de alimentação de 2,6Vdc, corrente de 3,1 A e número de fios igual a 6.

(ii) MotorY é de fabricação da SYNCRO Eletromecânica LTDA, com angulo de passo de  $1,8^\circ$ , número de passos por volta de 200, precisão do

---

passo de  $\pm 5\%$ , peso de 500g, tensão de alimentação de 5Vdc, corrente de 1,0 A e número de fios igual a 6.

Todos os deslocamentos X, Y e Z possuem chaves de fim de curso, em ambos os lados, que desligam a alimentação de cada motor, se caso o deslocamento das bases ultrapassar o máximo e o mínimo curso de cada eixo, sendo que, o máximo curso para o eixo X é de 0,820 m, 0,27 m para o eixo Y e 0,20 m para o eixo Z.

Para o posicionamento inicial de cada eixo, ou seja o 0(zero), é feito com sensores óticos tipo fotodiodo e fototransistor, emissor e receptor de luz infravermelho respectivamente. Não é feita a tomada de posição para cada eixo, devido a não haver um decodificador de posição ou sensores de posição para os mesmos.

Na placa de potência, também, está acondicionado o circuito de fontes de tensão para todo o sistema. As fontes de tensão utilizadas são, uma de 5Vdc e uma simétrica de  $\pm 12$ Vdc e a alimentação geral é de 12Vdc fornecida por uma fonte externa ou uma bateria de 12Vdc, tipo bateria de automóvel, para utilização em campo, conforme ilustra a figura 3.25

A alimentação dos motores é fornecida diretamente da entrada geral, devido quando ao acionar um motor este requer uma drenagem de corrente grande, que pode ocasionar oscilações no valor de tensão para o resto do sistema.

O diodo D25 tem a função de evitar que se conecte a tensão de modo invertido, este é ligado a um fusível de proteção de 3 A indo após para os capacitores de filtro, C48 e C49.

A tensão de 5Vdc é obtida por intermédio do circuito integrado LM723 (U26), que é um regulador de tensão, apresentando as seguintes características:

- a) corrente de saída nominal de 150mA, sem a necessidade de uso de transistor;
- b) para corrente de saída de valores maiores, possibilidade de uso de transistores externos;
- c) Tensão de entrada até 40Vdc;
- d) Tensão de saída ajustável de 2Vdc a 37Vdc;
- e) Pode ser usado tanto para fontes lineares como chaveadas.

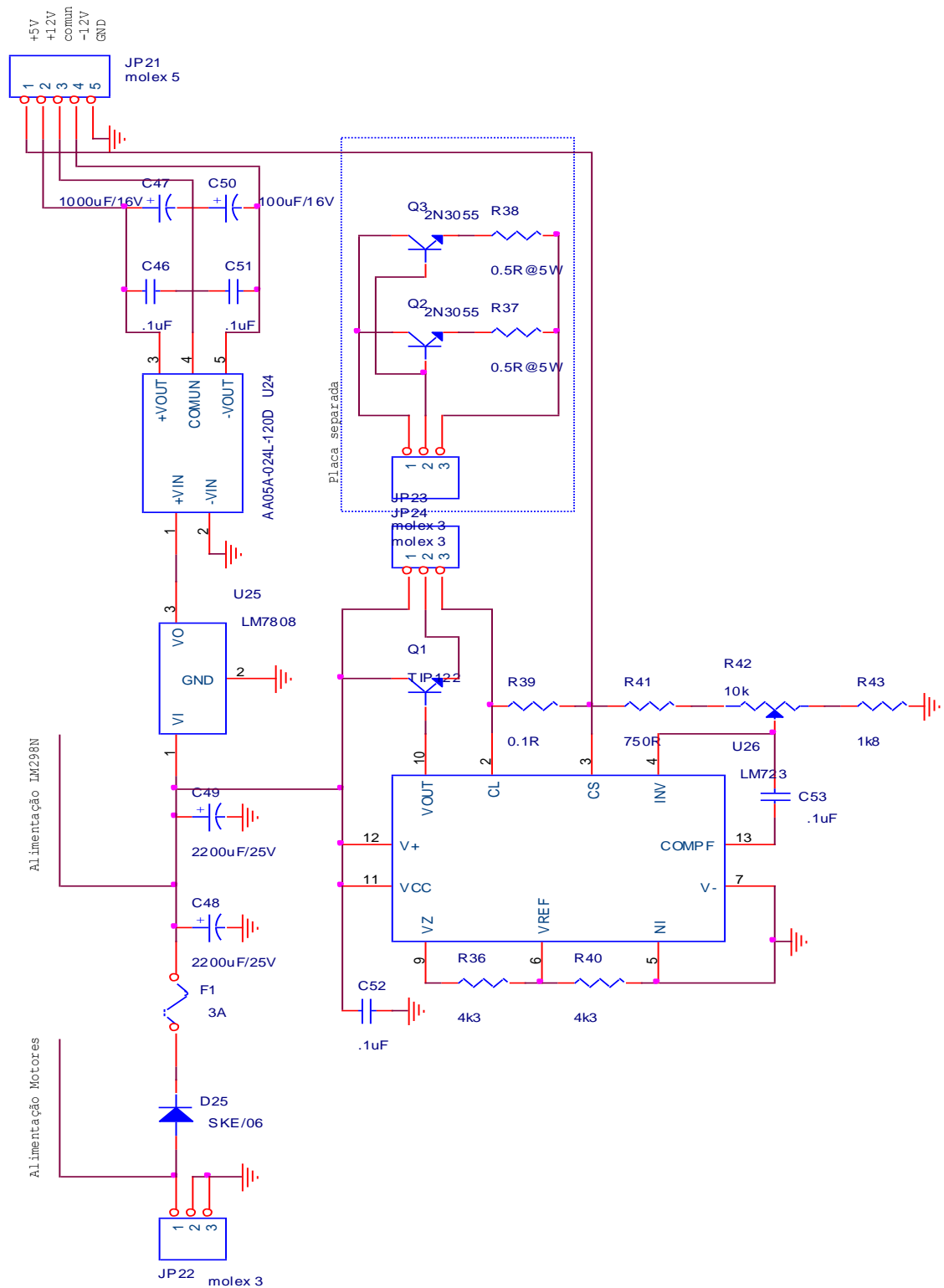


Figura 3.25 : Esquema elétrico das fontes de alimentação : 5 Vdc, +12Vdc e -12Vdc.

Os transistores Q2 e Q3, são utilizados para, se caso necessário, possibilitar ao circuito U26 drenar mais corrente.

As tensões simétricas de  $\pm 12\text{Vdc}$  são obtidas através do circuito U24, que é um conversor DC-DC de 12V, 5W de fabricação ASTEC AMERICA INC, usada para alimentação dos amplificadores operacionais LM725 do circuito de leitura do sinal da célula de carga e alimentação da célula de carga.

### 3.6.3 Circuito de leitura do sinal da célula de carga

Este circuito, conforme esquema mostrado na figura 3.26, é composto por dois amplificadores operacionais LM725 formando dois estágios de amplificação, sendo o primeiro formado pelo circuito U12 em modo diferencial com um ganho de 25 vezes e o segundo estágio formado pelo circuito U13 em modo inversor com ganho de 8 vezes, totalizando um ganho de 200 no conjunto.

Este ganho é devido a converter o sinal da célula de carga que varia de 0 a 24 mVdc, correspondendo a um esforço de 0 a 5 Kg, em um sinal de 0 a 5 Vdc, valor este de tensão aceitável dentro da faixa de conversão do conversor A/D.

A célula de carga utilizada, tem as seguintes características, fabricada pela KRATOS Dinamômetros Ltda., modelo CDN, capacidade de 5kg e sinal de saída nominal de 2,0 mV/V de excitação elétrica.

Na figura 3.27 é mostrado, em qualidade de foto, a montagem completa do sistema desenvolvido e na figura 3.28 é mostrado em detalhe o conjunto de medida de força.

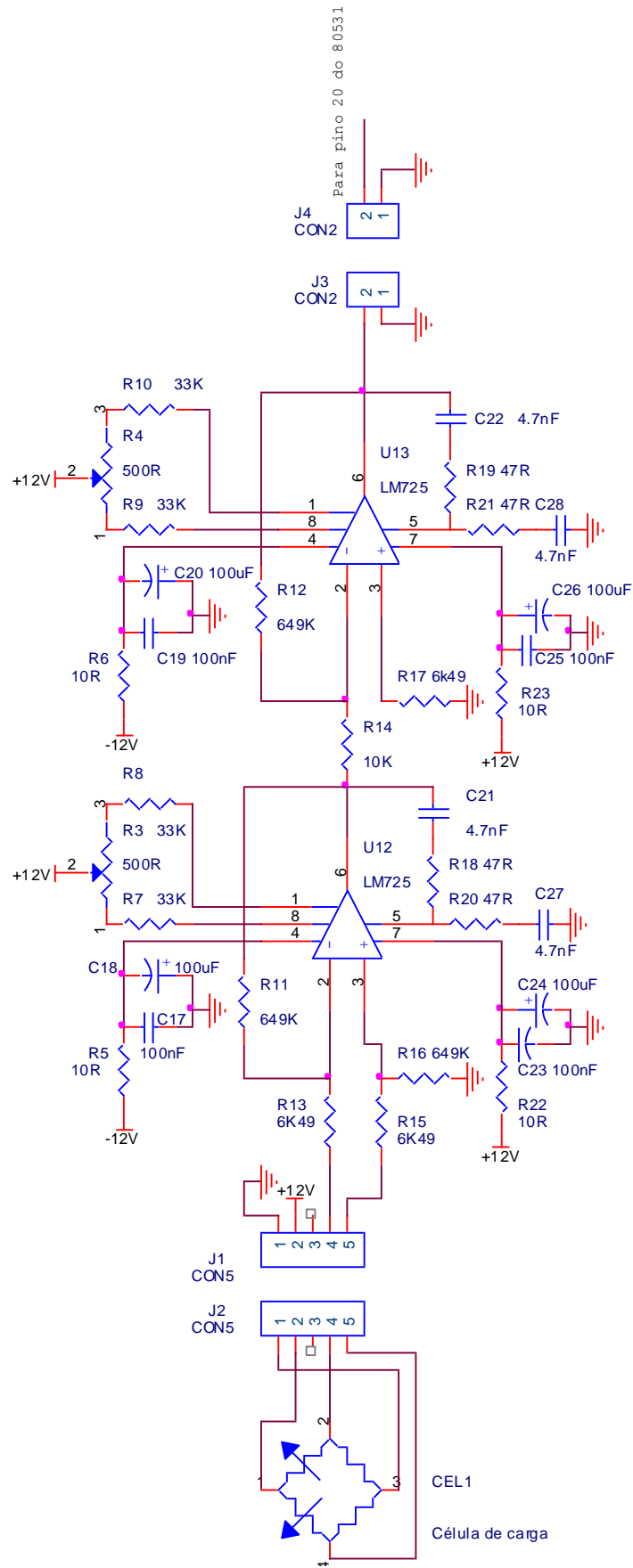


Figura 3.26 : Esquema elétrico do circuito de leitura do sinal da célula de carga.



Figura 3.27 : Foto do instrumento para o mapeamento da resistência do solo à penetração de raízes.



Figura 3.28 : Foto do conjunto de medida de força do instrumento para o mapeamento da resistência do solo à penetração de raízes.

### **3.7 Desenvolvimento computacional e interface com o usuário**

O programa computacional desenvolvido para o sistema é composto de dois subprogramas. Um dos subprograma é residente na memória de programa da CPU 80535 e tem a função de receber os comandos de um computador externo para executar as tarefas de posicionamento da microsonda, aquisição de dados referente a resistência mecânica à penetração e de enviar os dados colhidos de volta para o computador externo. O outro subprograma é para a interface com o usuário, responsável, de acordo com o usuário, pelo envio dos comandos ao microprocessador 80535; recebimento dos dados colhidos por ele e organização e processamento em banco de dados e geração de relatórios referentes as medidas de resistência mecânica do solo à penetração de raízes.

#### **3.7.1 Desenvolvimento do programa computacional para o microprocessador 80535**

O 80535 foi programado de forma a controlar os dispositivos a ele acoplados permitindo assim a execução das ações necessárias as tarefas a qual se destina o instrumento, cujas tarefas são basicamente de posicionar a sonda; realizar leituras na célula de carga e compor com essas ações e operações mais complexas, tais como compor medidas com varias leituras em diferentes profundidades pré-definidas e realizar medidas em uma região composta por pontos eqüidistantes.

Além das ações acima descritas o 80535 foi habilitado também para receber comandos e enviar dados para o aplicativo win32 através de sua interface de comunicação serial.

O aplicativo win32 além de comunicar com o 80535 tem a capacidade de armazenar os dados recebidos criando uma base de dados, da qual é possível extrair informações sobre as medições armazenadas.

Na programação do 80535 foi utilizado o ambiente de desenvolvimento da Rigel Corp. o Reads51 (READS51, 2003) cuja interface pode ser vista na



figura 3.29, o ambiente é dotado de um compilador de linguagem C reduzida com grande parte das funções do padrão ANSI implementadas e apenas com os tipos *inteiro* e *char* permitindo a criação de *arrays* unidimensionais e ponteiros.

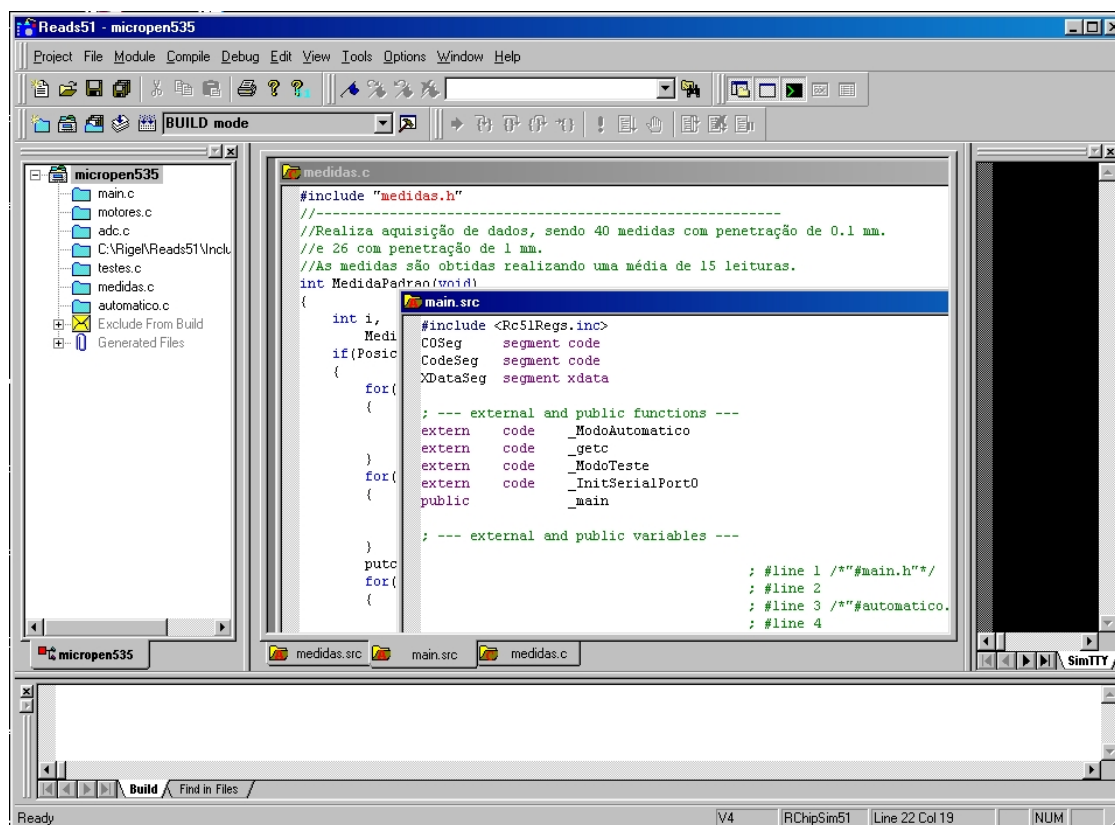


Figura 3.29 : Ambiente de desenvolvimento READS51 utilizado na programação do microcontrolador 80535.

O ambiente de desenvolvimento possui um emulador para microcontroladores da família do 8051 como é o caso do 80535.

O emulador permite a depuração do código facilitando assim o desenvolvimento em plataforma cruzada. O ambiente possui também a capacidade de carregar o código em uma placa de desenvolvimento da Rigel Corp. para que o mesmo seja depurado. Durante a depuração do código, através do uso do emulador, é possível interagir com o programa através de um terminal emulado pelo ambiente.

A estratégia para o desenvolvimento do algoritmo foi a partir da constituição do instrumento de modo que o programa teve sua organização feita de maneira que funções mais simples foram construídas primeiramente servindo de base para as mais complexas, um exemplo disso foi a criação da rotina que implementa um gerador de frequência através do *timer* do 80535, sendo que essa rotina foi utilizada na implementação das rotinas dos motores que precisam de pulsos com certas frequências para determinar a velocidade com que estes funcionam.

As funções básicas foram agrupadas em dois grupos sendo que o primeiro trata dos motores e o segundo da célula de carga. As demais funções fazem uso das funções desses dois grupos, como pode ser observado no diagrama de blocos da figura 3.30. Na programação do aplicativo para win32 foi utilizado o ambiente de desenvolvimento C++ Builder 5 da Borland e implementação da base de dados foi feita utilizando a *Borland Data Base Engine* para geração de tabelas do tipo Paradox.

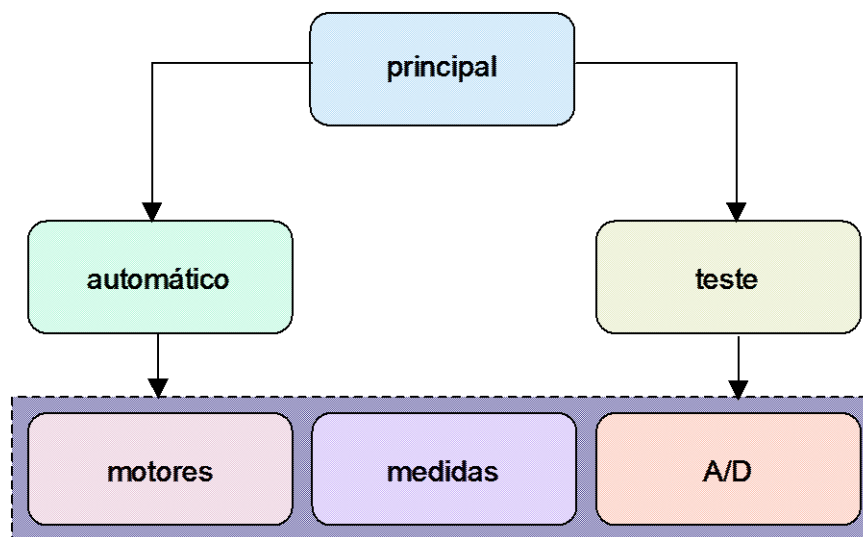


Figura 3.30 : Diagrama de blocos representando a organização das rotinas constituintes da programação.

A implementação desse tipo de base de dados tem a vantagem de dispensar o uso de um sistema gerenciador de banco de dados bem como a compatibilidade com uma grande gama de aplicativos através da interface ODBC.

Para permitir a comunicação entre o computador pessoal e o 80535 foi definido um protocolo constituído por comandos que estão descritos no quadro do apêndice A. Por exemplo, para executar um comando para posicionar a microsonda na posição X= 100 mm e Y= 200 mm deve-se digitar o seguinte comando #xy:dist x:dir x:dist y:dir y:#. Substituindo os correspondentes valores, o sistema o vê da seguinte forma #xy:100:1:200:1:#.

Todo comando é inicializado e finalizado com o carácter '#', seguido depois das letras dos respectivos comandos.

Ao ser finalizada a tarefa, o 80535 retorna os mesmos caracteres que definiram o comando da tarefa a ser executada. Para o exemplo acima o retorno seria #xy#.

Os programas computacionais desenvolvidos para o sistema microcontrolador 80535 são compostos de 6 seções descritas a seguir como:

1. principal.c;
2. adc.c;
3. automático.c;
4. medidas.c;
5. motores.c;
6. testes.c;

### **3.7.1.1 Programa PRINCIPAL.C**

É o programa para iniciar a execução do sistema e tem a finalidade de inicializar algumas variáveis e portas do 80535 necessárias para o funcionamento do sistema de medidas de resistência do solo à penetração de raízes.

Este programa inicializa os pinos P1.1, P1.3, P1.5, P1.6 e P5.0, das correspondentes portas P1 e P5, com nível lógico de valor 0 (zero), para a inicialização dos motores, pois na condição inicial ou de *reset* as portas ficam

em estado lógico 1 fazendo com que os motores fiquem acionados, consumindo corrente elétrica sem necessidade. Também é inicializado por esse programa, os parâmetros da porta serial

O sistema ao ser inicializado aguarda, através desse software, uma ordem do usuário, via comunicação serial vinda do computador central, de entrar no modo teste, com o envio do caractere 'T', ou de entrar no modo automático, com o envio do caractere 'A'.

As rotinas do modo teste se assemelham a das rotinas do modo automático, diferenciando no modo como são enviados os comandos ao sistema microcontrolador 80535. No caso teste, os comandos são enviados caractere por caractere, via comunicação serial, digitado pelo usuário por meio do programa HIPER-TERMINAL, disponível do sistema operacional WINDOWS® e no automático os comandos são enviados diretamente, sem a necessidade de o usuário digitar, através de uma interface desenvolvida para esse fim.

### **3.7.1.2 Programa ADC.C**

Este programa foi desenvolvido para inicializar o conversor A/D, fazer 11 medidas para uma mesma leitura e fazer a média aritmética dessas, para melhor aproximação do sinal convertido, reduzindo os efeitos de oscilações do sinal analógico no momento da leitura. É composto das rotinas GetADC0(void) e ADCMedida(int n).

A rotina GetADC0(void) é uma rotina já incorporada no Reads51, que faz a inicialização do conversor A/D e guarda o dado convertido no registrador ADDAT interno do microcontrolador 80535 e a rotina ADCMedida(int n) foi desenvolvida para fazer a média aritmética das 11 leituras.

O fato de se fazer apenas 11 medidas se deve a algum problema prático do microcontrolador 80535, não foi possível mais que isto, talvez por disponibilidade de espaço de memória interna do mesmo.

### 3.7.1.3 Programa AUTOMÁTICO.C

Este programa tem por finalidade interpretar os comandos recebidos via porta serial e tomar a decisão de executar e ou responder a esses comandos, caso seja necessário.

A implementação deste programa baseia-se na teoria de formação de *máquina de estado*, cuja informação baseia-se no estudo de passo a passo de uma instrução. As interpretações dos comandos são efetuados pela instrução indicada abaixo:

```
switch(estado)
{
  case estado 1:
    {
      função .....
    }
    break; //case estado1
  case estado 2:
    {
      função...
    }
    break;// case estado 2
} // fim switch(estado)
```

Cada estado é representado no programa por uma linha de instrução `case`. O diagrama de bloco da máquina de estado é mostrado na figura 3.31.

### 3.7.1.4 Programa MEDIDAS.C

Este programa tem a função de realizar as medidas de força exercida contra a microsonda em um único ponto ou dentro de uma região pré determinada. É composto de duas rotinas principais sendo elas: `MedidaPadrão()` e `MultiMedidaPadrão(int XMin, int XInc, int XMax, int YMin, int YInc, int YMax)`.

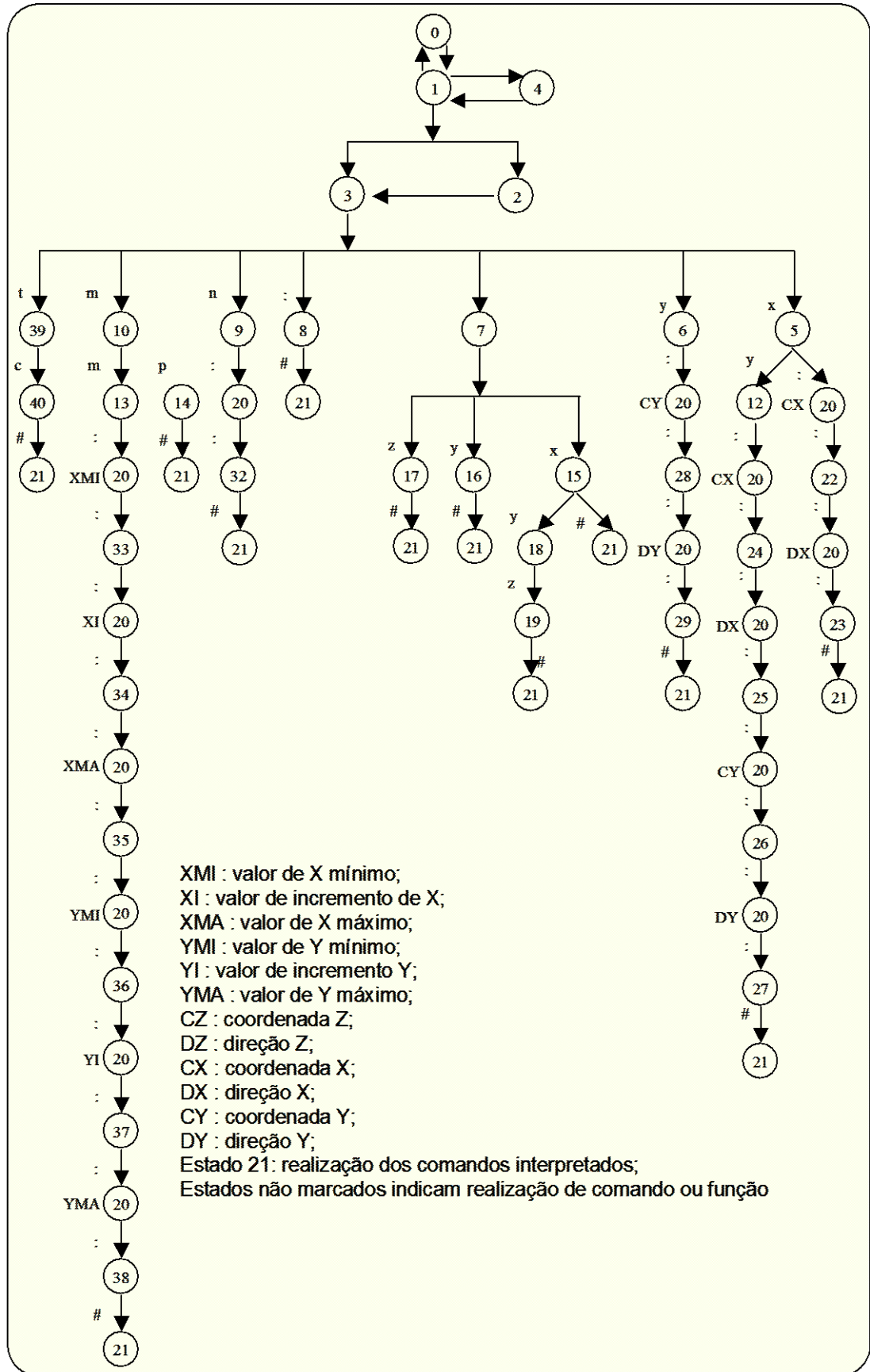


Figura 3.31 : Diagrama de bloco da máquina de estado do programa AUTOMÁTICO.C.

A rotina `MedidaPadrão()` tem a função de fazer 66 medidas em um único ponto, controlar o motor Z, para esse fim, fazendo com que ele avance  $0,1 \cdot 10^{-3}$  m nas primeiras 40 medidas e  $1 \cdot 10^{-3}$  m nas 26 restantes sendo que para cada medida são feitas 11 aquisições e depois é feita uma média aritmética dessas leituras. A cada finalização de aquisição, esta rotina coloca o motor Z em sua posição inicial e envia os dados colhidos, via comunicação serial, para o computador central onde serão guardadas em um banco de dados.

A rotina `MultiMedidaPadrão(int XMin, int XInc, int XMax, int YMin, int YInc, int YMax)` tem a função de realizar as medidas de resistência de penetração do solo dentro de uma região pré-definida, segundo as coordenadas fornecidas para início dos eixos, XMin e YMin e de fim, XMax e YMax, e quanto deve ser incrementado para cada eixo, XInc e Yinc, compreendendo uma região retangular dentro dos limites do sistema.

### 3.7.1.5 Programa MOTORES.C

Este programa tem a finalidade de controlar os motores de passo no que respeito a habilita-los, direcionar o sentido de giro, aceleração e desaceleração, posicionamento da sonda, geração de pulsos e posicionamento automático da microsonda na posição inicial, X=0 e Y=0. É composto pelas seguintes rotinas:

- 1 – `MoveX`(coordenada X em mm, direção de X);
- 2 – `MoveY`(coordenada Y em mm, direção de Y);
- 3 – `Move Z`(coordenada Z em dmm, direção de Z);
- 4 – `PosicionaSonda()`;
- 5 – `ZeroMotor`(código);
- 6 – `MoveXY`(coordenada X em mm, direção de X, coordenada Y em mm, direção de Y);
- 7 – `Time`(valor).

As rotinas `MoveX`, `MoveY` e `MoveZ` são semelhantes, diferenciando-se nas características dos motores e como estes foram montados com seus fusos.

A rotina MoveX inicialmente ajusta algumas variáveis como os períodos e pulsos por milímetros, o período está relacionado com a frequência mínima e máxima que serão injetados os pulsos no motor e os pulsos por milímetros são os pulsos necessários para que o motor faça o fuso deslocar de 1 milímetro.

Os motores não devem ser iniciados com uma frequência muito alta, deve-se começar com uma frequência baixa aumentando gradativamente até a máxima suportável para que não ocorra o efeito de perder o passo e o número de pulsos necessários para que o motor X movimente a microsonda de  $1 \cdot 10^{-3}$  m na direção X é igual a 25.

Inicialmente a rotina leva pino P1.1 da porta P1 para nível lógico zero assegurando que os pulsos para o motor comece em zero, logo após é definido o sentido de rotação do motor, com o pino P1.2 da porta P1, se nível lógico zero, sentido de rotação horário, se nível lógico 1, sentido de rotação anti-horário, na seqüência habilita o motor levando o pino P1.3 a nível lógico 1.

Depois a rotina inicializa as portas de controle sendo P1.1 = 0, para iniciar os pulsos em zero, defini a direção de giro do motor com a porta P1.2, sendo 1 para o sentido anti-horário, desloca a sonda no x positivo e 0 para sentido horário, sonda para a posição 0 do eixo x, e finalmente a porta P3.1 para 1, habilitando o motor.

Em uma linha de programa, é feita a conversão da coordenada de entrada do valor de x que é em milímetros para números de pulsos, multiplicando o valor da coordenada por 25, outra variável é usada para saber se falta muito ou pouco para terminar a contagem dos pulsos e saber a posição no eixo x.

O motor é movimentado no sentido horário ou anti-horário se somente existir pulsos para enviar ao motor, ou seja, se não há deslocamento, não há necessidade de enviar pulsos para o motor. Ao identificar que é necessário enviar pulsos começa a oscilar o pino da porta P1, P1.1, entre 1 e 0, variando a largura de pulso através da rotina *time*, de acordo com o valor de período e



avaliando o quanto resta para terminar por meio do decremento dos pulsos restantes, quando este for igual a zero termina e o motor é parado.

Duas linhas de comando de programação *ip*, tem a finalidade de comparar o valor dos pulsos restantes para realizar o efeito de acelerar ou desacelerar o motor, se é para acelerar, a variável período é decrementada do valor máximo 30 até 4, variando a largura de pulso. Quanto o valor chega a 4 este fica estabilizado até que seja detectado que falte 26 pulsos para terminar, neste ponto, começa o processo de desaceleração do motor indo de 4 a 30 o valor da variável período, na figura 3.32 é ilustrado o processo de aceleração e desaceleração do motor.

A rotina MoveY é semelhante a rotina MoveX, diferenciando em algumas variáveis, tais como o período mínimo tendo valor igual a 5, o pino de porta de sentido de direção, P1.4, e pino de habilitação do motor, P1.5. devido a tamanho do fuso e da diferença do motor Y em relação ao motor X, são necessários 40 pulsos no motor para que este possa movimentar a microsonda de  $1 \cdot 10^{-3}$  m em sua direção.

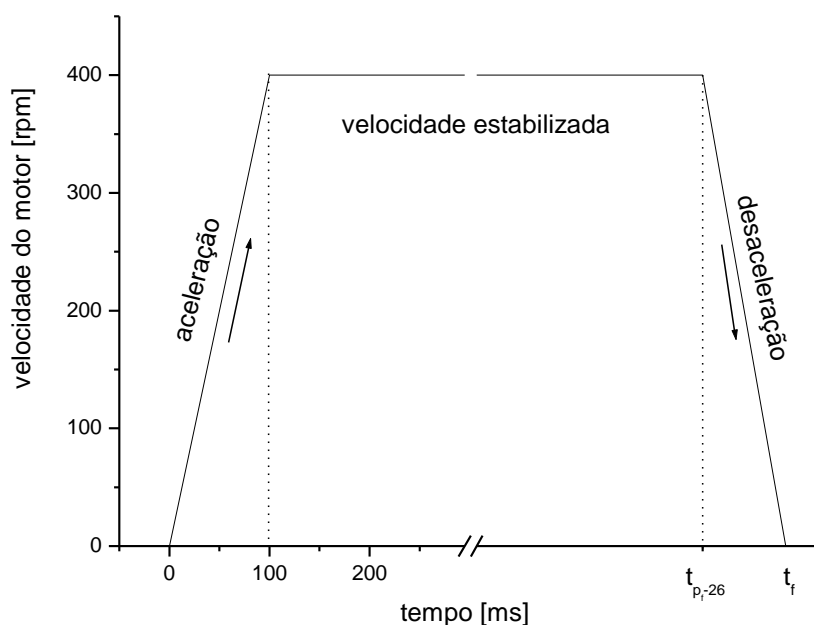


Figura 3.32 : Processo de aceleração e de desaceleração do motor.

A rotina MoveZ também é semelhante a rotina MoveX, diferenciando em algumas variáveis, tais como o período mínimo, que tem valor igual a 5, o pino de porta de sentido de direção, que é o pino P1.7, pino de habilitação do motor é pino P5.0, e para geração de pulsos é usado o pino P1.6. O incremento mínimo de avanço da microsonda neste eixo também é diferenciado dos demais, enquanto nos outros o incremento é de  $1 \cdot 10^{-3}$  m, neste eixo é necessário o avanço de  $0,1 \cdot 10^{-3}$  m para melhor precisão de medida de resistência do solo à penetração, por isso é necessário 4 pulsos no motor para incrementar a microsonda naquele valor.

A rotina PosicionaSonda em nada é diferente da rotina MoveZ, apenas que neste caso, quando solicitada para posicionar a microsonda na posição inicial de leitura, fica constantemente monitorando o pino P5.4 até que este mude seu estado lógico de 0 para 1 indicando que a microsonda tocou em algo. Caso não seja encontrado nada resistente abaixo da microsonda, após o percurso de  $240 \cdot 10^{-3}$  m, é parado o avanço e o sistema é retornado a posição inicial, retransmitindo um mensagem de erro de posição.

A rotina ZeroMotor(codigo), tem por finalidade retornar a sonda para seu início, ou no eixo x, ou no eixo y, ou no eixo z, dependendo do código enviado a esta rotina. Os códigos necessários são os seguintes:

- 1 – para iniciar motor X;
- 2 - para iniciar motor y;
- 3 - para iniciar motor Z;
- 4 – para iniciar motores X e Y simultaneamente;
- 5 – Todos os motores seqüencialmente;
- 6 – Todos os motores com X e Y simultaneamente.

Conforme pode se observar na listagem esta rotina apenas chama as rotinas descritas anteriormente, com a diferença que cada rotina já entra com um valor de coordenada maior que o máximo estabelecido para cada coordenada, isto foi implementado para assegurar que independentemente da posição da microsonda esta seria posicionada na posição inicial de qualquer

maneira, pois cada rotina fica monitorando se as portas de fim de curso foram para nível lógico 1, sendo que para o eixo x é usada a porta P5.1, para o eixo y é usada a porta P5.2 e para o eixo z é usado a porta P5.3.

A rotina *Time(Tempo)*, é utilizada para controlar o tempo que as portas P1.1 e P1.6 ficam em nível lógico alto ou baixo, reproduzindo um trem de pulso de largura variável para rodar o motor de passo. Seu funcionamento baseia-se na utilização de um contador interno do 80535, chamado de *Timer*, que é um contador de 12 bits. Inicialmente os registradores interno do *Timer*, TH0 e TL0, são preenchidos com o valor  $FF_{16}$  ( $255_{10}$ ), depois é inicializado com a limpeza do registrador TF0, que é um *flag* de indicação de sobre contagem e TR1, que é o registrador que ativa o contador do *Timer*. A contagem é seguida de 1 bit de incremento até atingir o valor  $FFFF_{16}$  ( $65535_{10}$ ), no próximo pulso é identificado a sobre contagem que imediatamente é alarmada pela mudança de estado do registrador TF0 do estado lógico 0 para o estado lógico 1, terminada a contagem o *Timer* é desativado pelo registrador TR0, que vai para nível lógico 0. Essa contagem é repetida tantas vezes quanto for o valor da variável 'Tempo' nessa rotina, desse modo consegue-se a variação da duração do nível lógico que se encontra as portas P1.1 e P1.6.

Os valores da variável "Tempo", variando de 4 a 33, foram escolhidos empiricamente pela observação do comportamento dos motores e conferindo a posição de parada, medindo a distância percorrida pela quantidade e frequência dos pulsos. O valor 33 é utilizado para gerar um pulso de duração mais larga, ou seja, para baixas frequências e 4 para pulsos de duração menor e alta frequência.

### 3.7.2 Interface com o usuário

No desenvolvimento da programação para interface com o usuário foi usado o aplicativo para win32 utilizando o ambiente de desenvolvimento C++ *Builder 5* da Borland. A implementação da base de dados foi feita utilizando a *Borland Data Base Engine* para geração de tabelas do tipo *Paradox*. A utilização desse tipo de base de dados tem a vantagem de dispensar o uso de

um sistema gerenciador de banco de dados bem como a compatibilidade com uma grande gama de aplicativos através da interface ODBC.

O aplicativo foi concebido utilizando princípios de orientação a objetos e suas classes foram modeladas de forma a organizarem os códigos em grupos que tratam das funções de Interface (programa principal); Configurações; Dados; Comunicações; Relatórios e Processamento dos dados recebidos.

A organização do aplicativo pode ser vista no diagrama de blocos da figura 3.33, que representa as unidades de código que constituem o aplicativo

Para o aplicativo com o IBM-PC utiliza-se a capacidade dos sistemas win32 de permitir dentro de um mesmo aplicativo a execução de código concorrente, essa prática é conhecida como *Multithread*. A concorrência é utilizada para permitir o monitoramento da porta de comunicação serial para o processamento e armazenamento dos dados recebidos na base de dados.

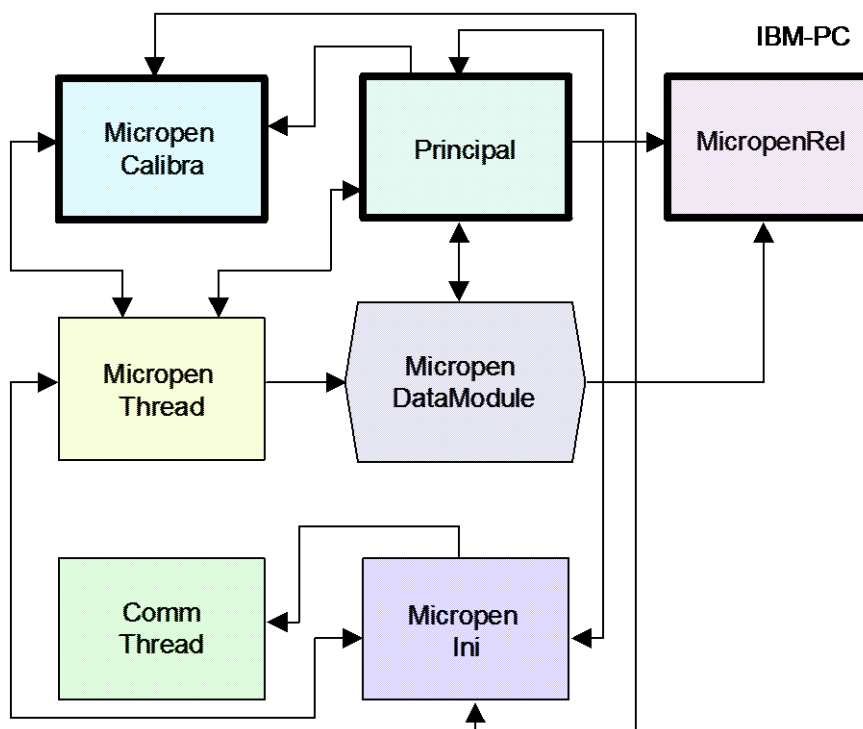


Figura 3.33 : Diagrama de blocos representando as unidades de códigos que constituem o aplicativo para win32.

Com o uso das *threads* foi possível manter a interface do aplicativo livre para a interação do usuário mesmo durante o processo de comunicação com o 80535.

Para permitir a comunicação entre o IBM-PC e o 80535 foi definido um protocolo constituído por comandos, descritos no quadro do apêndice A.

O aplicativo WIN32, conforme pode ser observado na figura 3.34, é composto de uma tela onde foram agrupados as funções e comandos necessários para controle do sistema da microsonda.

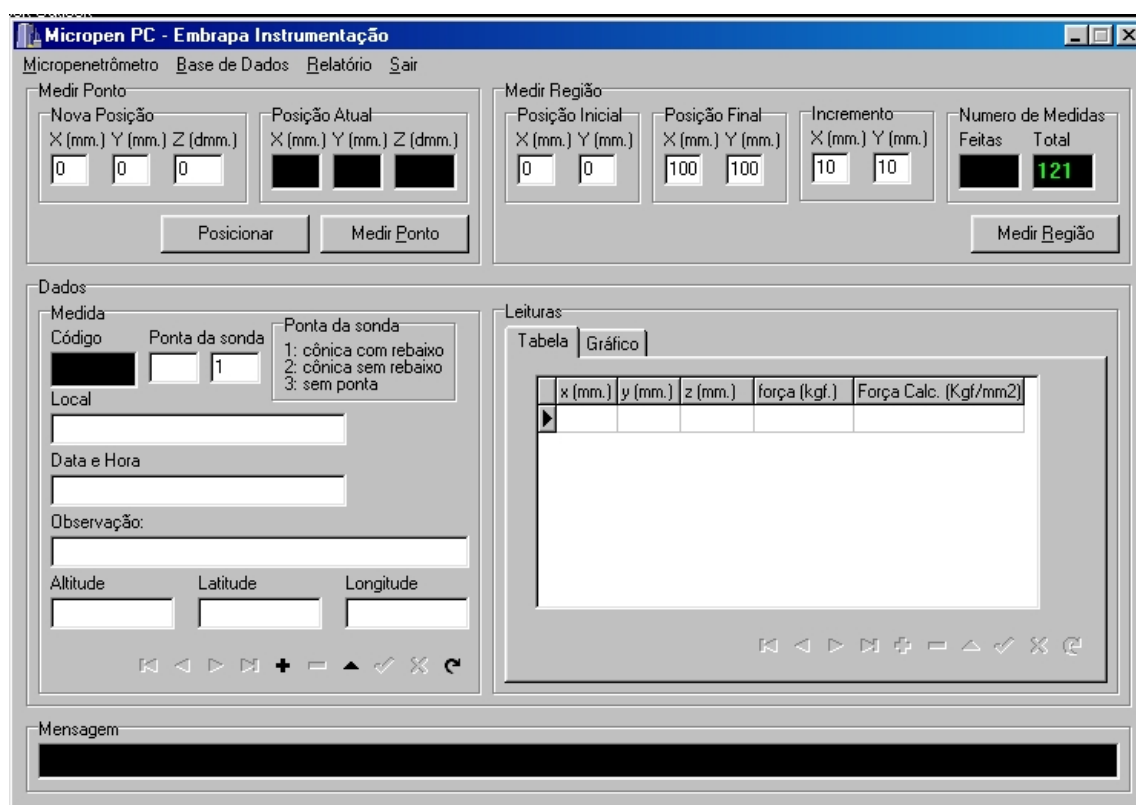


Figura 3.34 : Interface com o usuário do aplicativo win32.

Na parte superior da tela encontra-se uma barra de menu com 4 itens, Micropenetrômetro; Base de Dados; Relatório e Sair.

O item <Micropenetrômetro> é dividido em outros 8 itens, sendo : <Conectar>; <Desconectar>; <Modo Automático>; <Inicializar motores>;

<Posicionar Sonda>; <Selecionar porta>; <Calibrar> e <Interromper Medir Região>, conforme pode ser observado na figura 3.35.

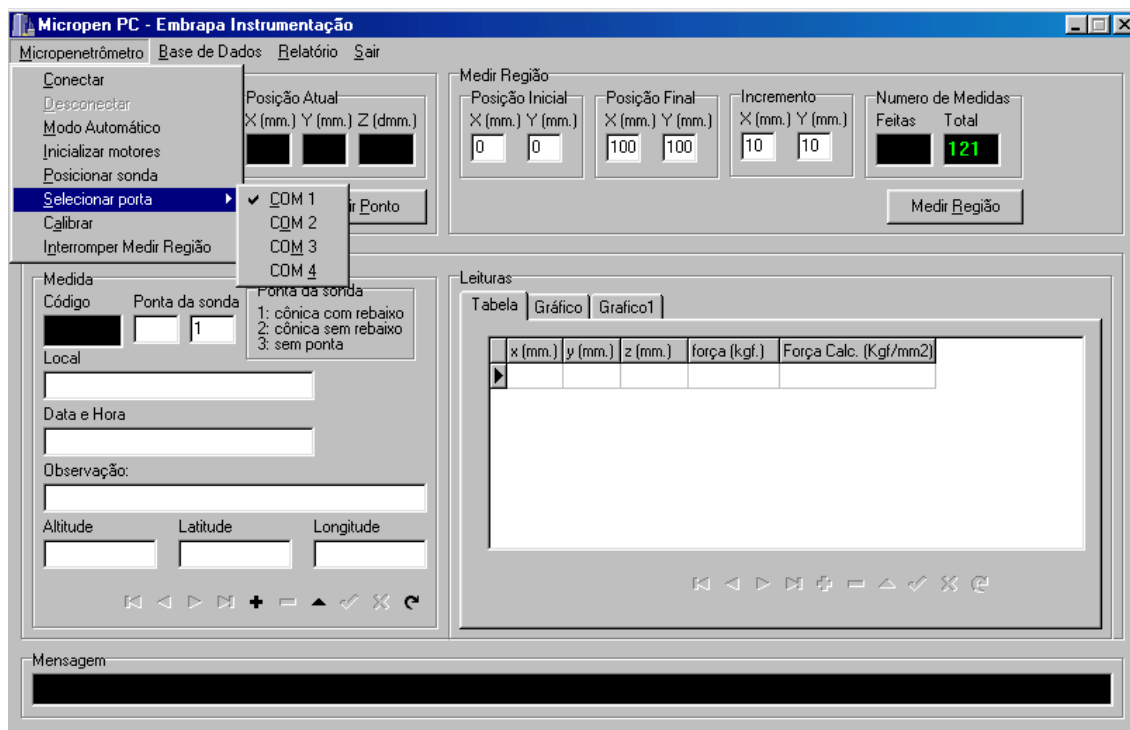


Figura 3.35 : Itens do menu Micropenetrômetro.

O item <Conectar> e <Desconectar>, tem a função de iniciar e ou finalizar a conexão via serial, ativando e ou desativando o programa *MicropenThread\_Unit.cpp*, que é uma *Thread* responsável pela inicialização dos parâmetros de comunicação serial.

Ao ser selecionado o item <Modo Automático>, o aplicativo envia ao sistema micropenetrômetro a seguinte seqüência de caracteres #A#, significando que o sistema deve entrar no modo automático, ao completar a ordem, o micropenetrômetro retorna a mesma seqüência de caracteres ao aplicativo.

Pode ocorrer que os motores não estejam devidamente posicionados, não sabendo ao certo a coordenada de cada um, por isso foi implementado o comando <Inicializar motores>, que automaticamente envia o código #zxyz#, que é interpretado pelo micropenetrômetro como posicionar todos os motores

na posição zero, ou seja, coordenada x, coordenada y e coordenada z iguais a zero.

O item <Posicionar Sonda>, envia o comando #s#, fazendo com que o micropenetrômetro avance o eixo Z até que a sonda encoste em algo, se encostar, retorna o comando #s#, caso contrário, retorna o comando #e#, se isto acontecer é porque o eixo Z avançou até o limite de segurança, ou seja alcançou a marca de 240 mm sem tocar em nada.

Os micros computadores podem vir com várias saídas serial, e as vezes pode ser que algumas já esteja em uso, através do comando <Selecionar porta> é possível selecionar uma porta vaga escolhendo entre as opções a porta serial COM1 ou COM2 ou COM3 e ou COM4.

O item <Calibrar> foi desenvolvido para calibrar o valor lido na célula de carga, este valor é referente ao esforço mecânico da penetração da sonda no solo, convertendo estes valores de tensão elétrica, dentro da faixa de 0 a 5Vdc, aos correspondentes valores em Kg, de 0 a 5 Kg respectivamente.

A conversão desse sinal analógico de tensão em uma palavra binária é feita pelo conversor Analógico/Digital do microcontrolador 80535, dentro da faixa de níveis lógicos de 0 a 255 unidades (00h a FFh, na base hexadecimal).

O comando Calibrar abre uma janela, conforme ilustrada na figura 3.36, que fica expondo a leitura da célula de carga constantemente na parte superior da janela no item *Célula de carga*. As leituras para calibração são feitas a mão e depois desenhadas em gráfico, onde se tira o valor da constante que deverá multiplicar o valor da célula de carga para visualização do valor convertido em kgf.

Uma vez calculado o valor da constante, esta fica armazenada em um arquivo chamado *micropen.ini*, onde são armazenados os dados iniciais de

todo o programa, tal como a porta serial escolhida, COM1, COM2, COM3 ou COM4 e a constante do programa calibrar.

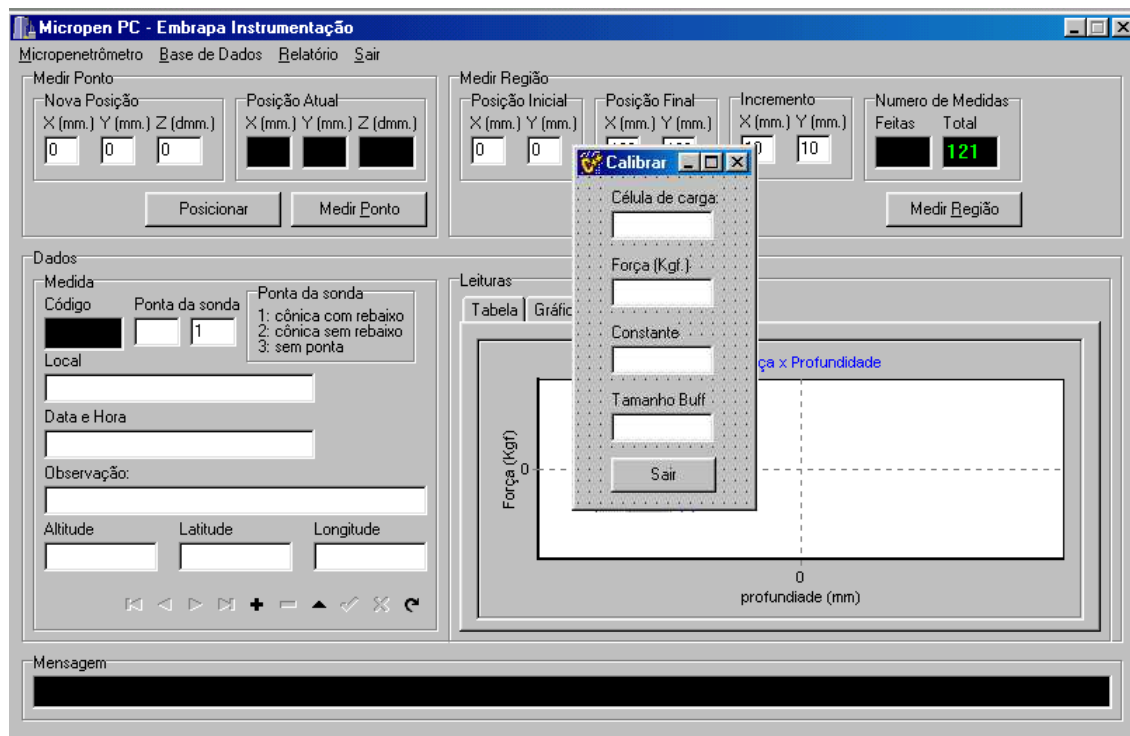


Figura 3.36 : Janela da função calibrar na interface com o usuário.

O comando *<Interromper Medir Região>* tem a função de interromper as medidas quando o sistema esta fazendo a aquisição de dados em uma determinada região especifica. O sistema tem a capacidade de realizar várias medidas automaticamente dentro de uma região demarcada, e caso venha acontecer algum problema, tal como quebrar a microsonda, o comando permite parar totalmente a aquisição dos dados. Os dados colhidos anteriormente a falha ficam armazenados no computador externo.

O menu *<Base de Dados>*, mostrado na figura 3.37, possui apenas um item chamado *<Recriar>*, este menu reinicia todo o banco de dados, apagando o antigo e abrindo um novo. Também na figura 3.37, observa-se o menu *<Relatório>* que é usado para criar um relatório das aquisições feitas em formato de papel A4 tendo as seguintes informações : Local; Data e Hora; Observações e um gráfico da respectiva aquisição. O menu *<Sair>* tem a finalidade de desativar todo o aplicativo.



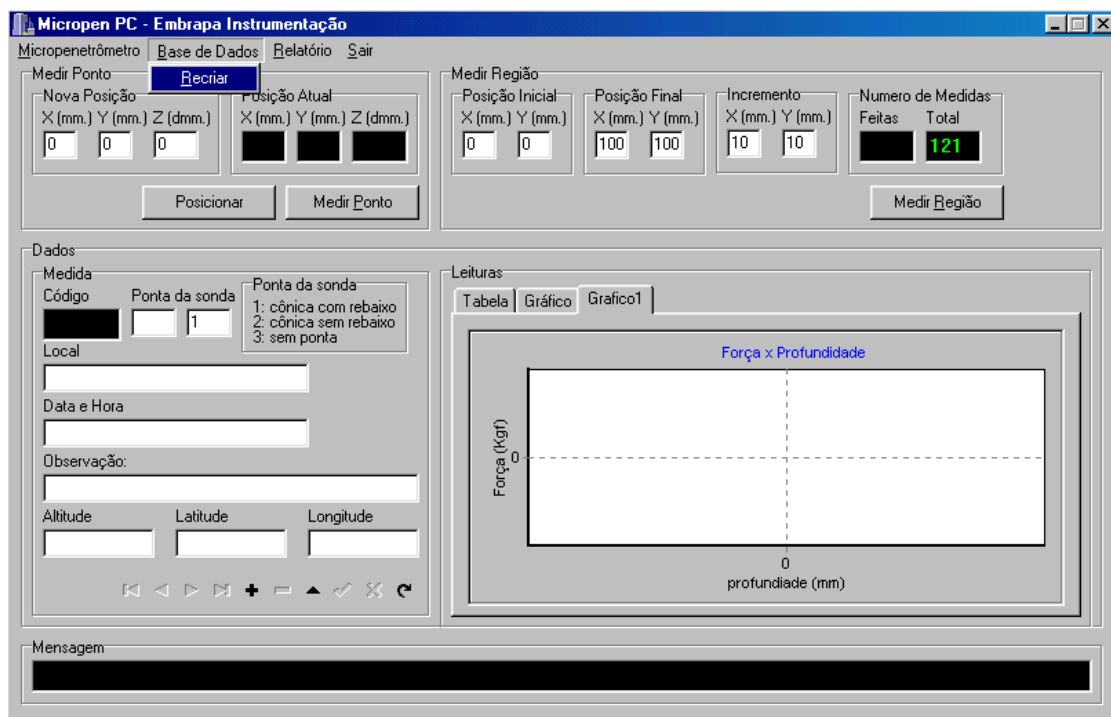


Figura 3.37 : Menu Base de Dados, Relatório e Sair da interface com o usuário.

O painel <Medir Ponto>, ilustrado na figura 3.38, realiza a função de posicionar a microsonda em uma determinada coordenada e fazer uma medida. É composto por outros dois painéis chamados de <Nova Posição> e <Posição Atual> e dois botões chamados de <Posicionar> e <Medir Ponto>.

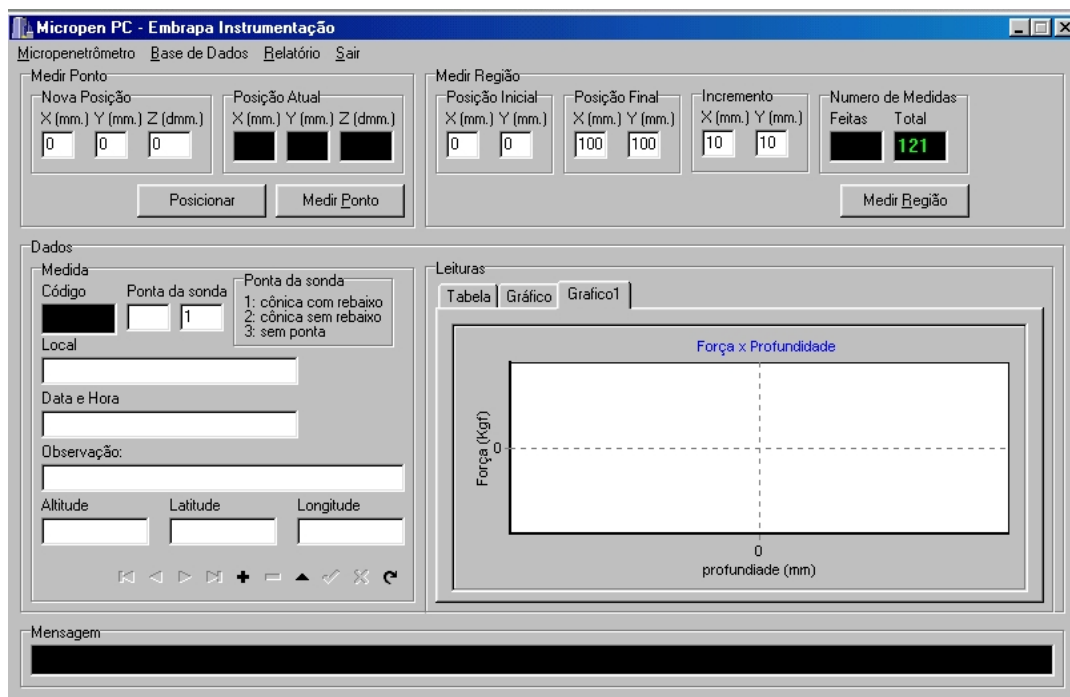


Figura 3.38 : Painel Medir Ponto, ao alto a esquerda na interface com o usuário.

Com o painel <Nova Posição> é possível fornecer as coordenadas X [mm], Y [mm] e Z [dmm] da posição que se quer localizar a microsonda. Uma vez dado as coordenadas aciona-se o botão <Posicionar> e as coordenadas são enviadas para o sistema micropenetrômetro que automaticamente movimenta a microsonda até o ponto desejado. Sempre que a microsonda é posicionada em uma nova coordenada, a sua posição é atualizada no painel <Posição Atual>.

Uma vez posicionada a sonda e se houver a necessidade de fazer uma medida neste local, é possível através do botão <Medir Ponto>, que realizará uma única aquisição de medidas.

Quando houver necessidade de se fazer várias medidas dentro de uma determinada região, é possível o uso do modo automático pela ação do botão <Medir Região>, localizado no painel <Medir Região>, conforme ilustrado na figura 3.39.

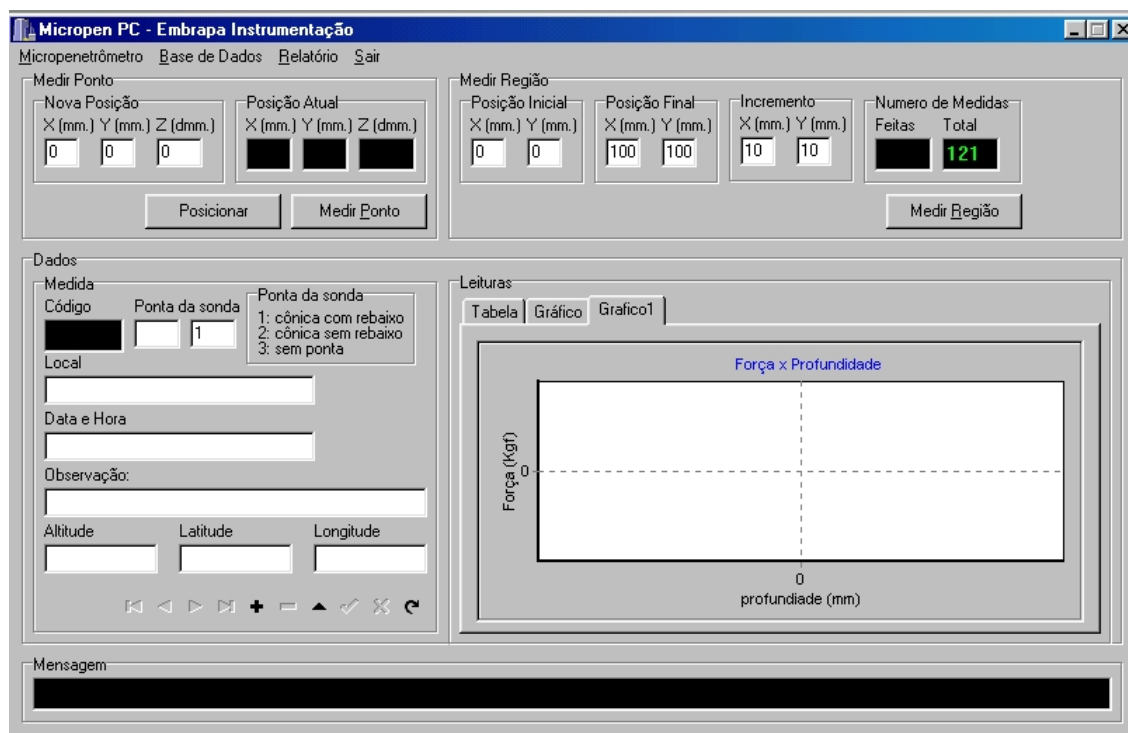


Figura 3.39 : Painel Medir Região, ao alto no centro da interface com o usuário.

Neste painel encontram-se as funções necessárias para a realização de várias medidas dentro de uma região, que são as coordenadas iniciais e finais de X e Y e o incremento que deve ser realizado em cada um dos eixos X e Y.

O painel <Números de Medidas>, ilustrado na figura 3.39 a direita, auxilia o usuário a saber qual o total de medidas a fazer, localizada no painel como <Total> e quantas medidas foram feitas no decorrer do avanço da microsonda, localizada no painel como <Feitas>.

O painel <Dados>, conforme ilustrado na figura 3.40, é utilizada para visualizar e atualizar o banco de dados, sendo dividido entre outros dois painéis <Medida> e <Leituras>.

Quando se faz uma aquisição de dados, o resultado das leituras é impresso automaticamente no painel <Leituras> na folha <Tabela>, e pode ser observado o gráfico relativo a aquisição, também nesse painel na folha <Gráfico>, conforme ilustrado na figura 3.41.

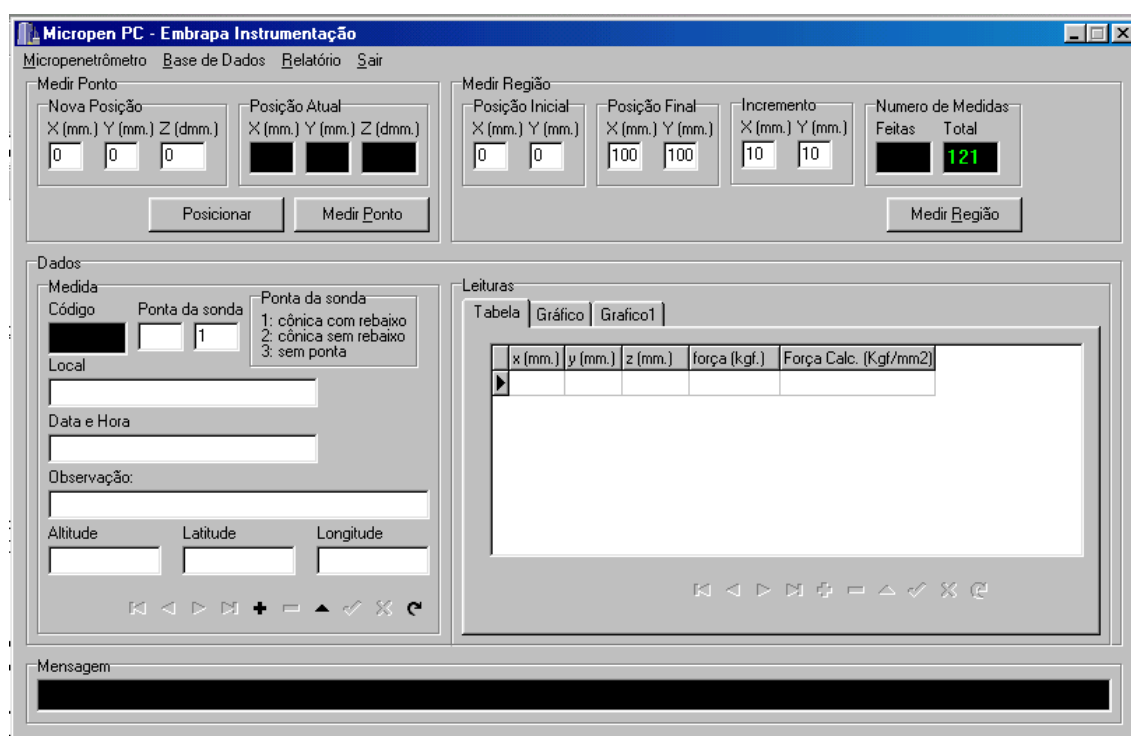


Figura 3.40 : Painel Dados, no canto esquerdo abaixo da interface com o usuário.

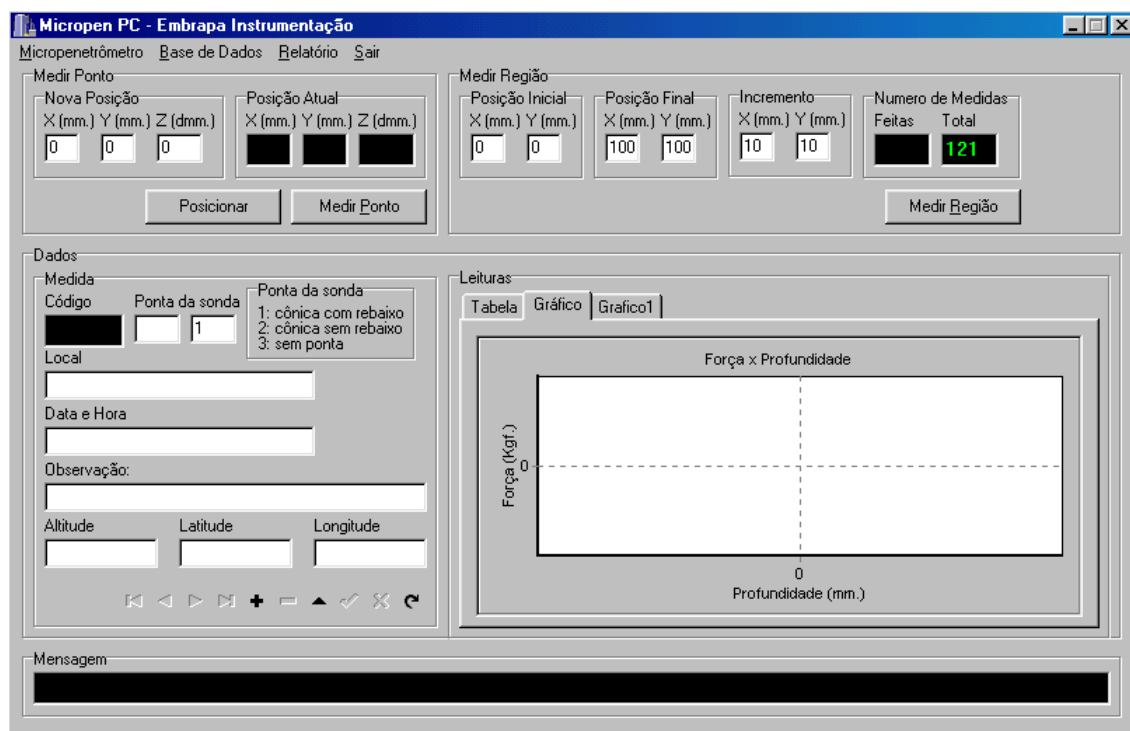


Figura 3.41 : Painel Leituras com as pastas Gráficos e Tabela, centro e abaixo na interface com o usuário.

No painel <Medidas>, somente os itens <Código> e <Data Hora> são atualizados automaticamente a cada nova aquisição. O <Código> é incrementado de um e os outros campos, <Local>, <Observação>, <Altitude>, <Latitude> e <Longitude> são preenchidos pelo usuário. Estes campos servem como orientação ao operador para no futuro saber a quem pertencem os dados gravados.

O item <Ponta da sonda> no painel <Medidas>, foi colocado para se saber que tipo de microsonda esta sendo usada para a medida de força, ao lado do item é especificado os três tipos desenvolvidos para esse instrumento.

Por fim, a barra de mensagem localizada no painel <Mensagem>, conforme ilustrado na figura 3.42, foi implementada para comunicar ao usuário o que o sistema esta fazendo, enviando uma mensagem especifica para cada comando do aplicativo, como exemplo dessas mensagens temos que quando é solicitado a inicialização dos motores, aparece a seguinte mensagem na barra *Solicitando posicionamento dos motores*, permanecendo até completar o

posicionamento. Ao serem posicionados, a seguinte mensagem é posta na barra *Motores posicionados no início*.

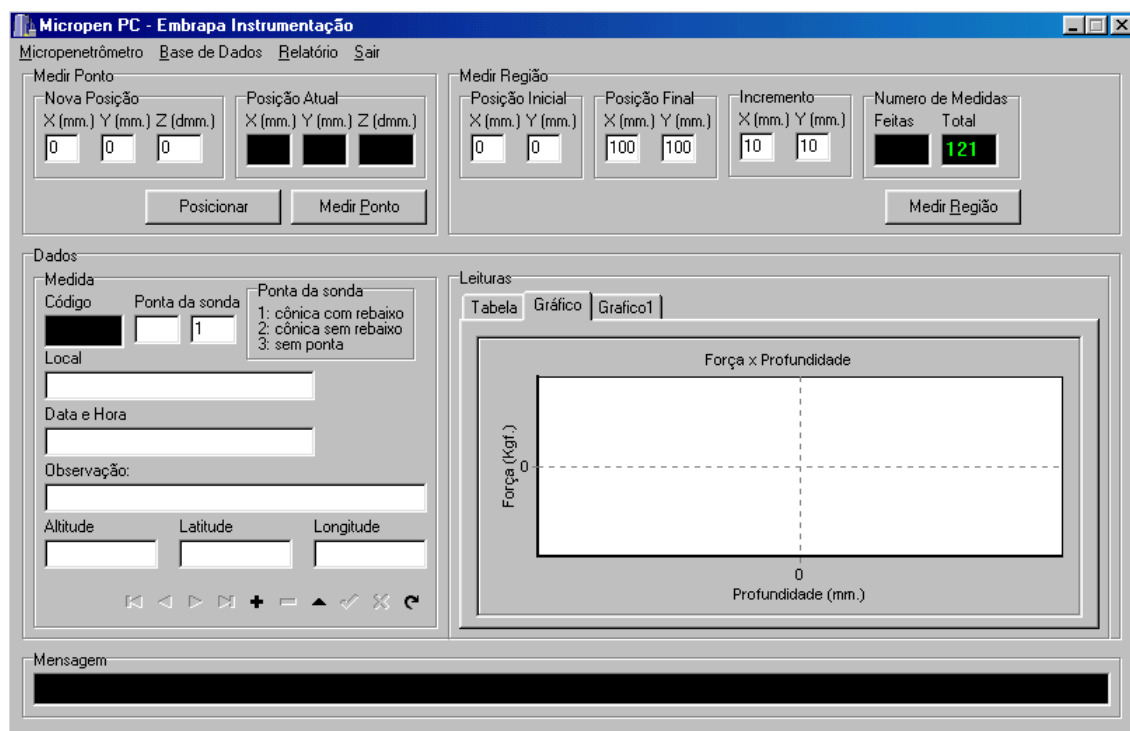


Figura 3.42 : Painel Mensagem e barra para mensagem, canto inferior esquerdo da interface com o usuário.

### 3.8 Programa computacional para visualização de imagem por camada de penetração

Este aplicativo foi desenvolvido para realizar a função de leitura dos dados gravados nas tabelas do banco de dados, criados pelo programa descrito anterior, e converter esses dados em uma imagem bidimensional por camada de penetração, visualizando as diferentes forças de penetração nestas camadas em um padrão de 256 níveis de cinza. A tela principal desse programa pode ser observada na figura 3.43.

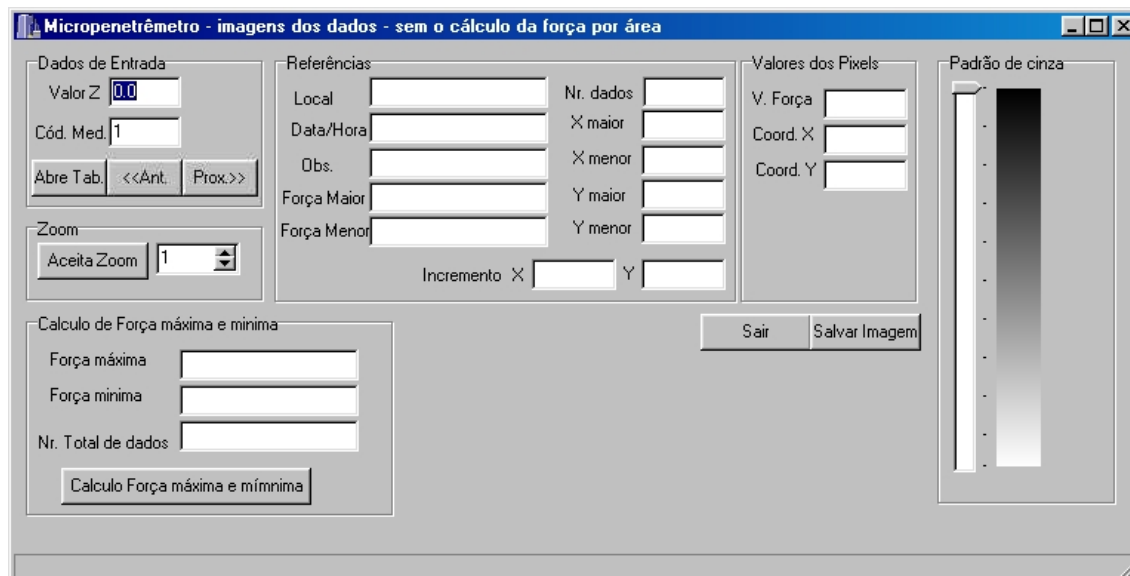


Figura 3.43 : Tela principal do programa de visualização de imagem na interface com o usuário.

No alto a esquerda da figura 3.43, temos o grupo de comando <Dados de Entrada>, composto das caixas de textos <Valor Z> e <Cód. Med.> e de três botões, <Abre Tab.>; “<<Ant.” e “Prox.>>”.

A caixa de texto <Valor Z> é iniciada com o valor 0,0, que significa o topo da crosta do solo onde é ajustada a sonda para começar a aquisição de dados, ou seja a coordenada 0,0 m, (a faixa de valores colocadas varia de 0,0 m a  $29,0 \times 10^{-3}$  m, incrementando de  $0,1 \times 10^{-3}$  m dentro da faixa de 0,0 m a  $4,0 \times 10^{-3}$  m, e de  $1 \times 10^{-3}$  m dentro da faixa de  $4,0 \times 10^{-3}$  m a  $29,0 \times 10^{-3}$  m, esses valores são colocadas manualmente).

A caixa <Cod. Med.>, significa código da medida, é inicializada com o valor 1. Devido que, para um mesmo banco de dados podem ocorrer várias aquisições de dados de força de penetração decorrente de possíveis variabilidades espaciais existentes em um ambiente real.

Os botões de comandos deste grupo significam : <Abre Tab.>, abreviação de Abre Tabela, ao pressionar esse botão é executada uma rotina de programa que localiza e abre o banco de dados segundo os dados fornecidos pelas caixas de textos, com os valores iniciais ou inseridos

manualmente; <<Ant. e Prox.>>, abreviatura de anterior e próximo, incrementa o valor de <Valor Z>, tanto crescente (próximo) como decrescente (anterior).

Quando <Valor Z> atinge o valor  $29,0 \times 10^{-3}$  m, e é incrementado de uma unidade, o aplicativo atualiza automaticamente o valor <Cód. Med.> para o valor da próxima tabela de dados, se existir, caso contrário, o aplicativo indica uma mensagem de erro de não existência dos próximos dados.

O comando de zoom, a imagem inicial é montada pixel a pixel, sendo uma imagem pequena, este comando aumenta o seu tamanho para uma melhor visualização, varia até a capacidade do computador.

O grupo <Cálculo da Força máxima e mínima>, calcula dentro de toda a tabela, para o mesmo código de medida a maior e a menor força registrada e o total de números de dados gravados.

O grupo <Referências>, indica vários dados referentes a imagem a ser visualizada, tais como, o local, data e hora de onde foi feita a coleta; observação (obs.), caso haja alguma; força maior e menor da camada em questão fornecida por <Valor Z>; o número de dados totais e coordenadas iniciais e finais da camada (X e Y maior e menor) e o incremento de deslocamento tanto para X como para Y.

No grupo <Valores dos Pixels>, é mostrado, quando se utiliza o *mouse* na imagem, as correspondentes coordenadas X e Y junto com o respectivo valor da força naquele pixel, que também com a posição do *mouse* indica o nível de cinza do pixel e seu respectivo valor de força.

Os botões <Sair> e <Salvar a imagem>, tem como função, respectivamente, de desligar o programa e salvar a imagem após ser vista e analisada. Ao salvar a imagem, esta é salva em seu tamanho original com extensão .bmp e também em um arquivo texto de extensão .txt, que é a representação da matriz mostrando os dados em valores de força (kgf) com as respectivas referências da camada, conforme ilustrado no apêndice B.

Com os dados fornecidos no grupo <Dados de Entrada>, ou partindo dos valores iniciais, “Valor Z = 0,0” e “Cód. Med. = 1”, e acionando-se o botão <Abre Tab.>, ocorre o processo de procura da referida tabela no banco de dados que são processados para a construção da imagem da camada de <Valor Z>. A imagem é construída em uma outra tela, conforme pode ser visto na figura 3.44.

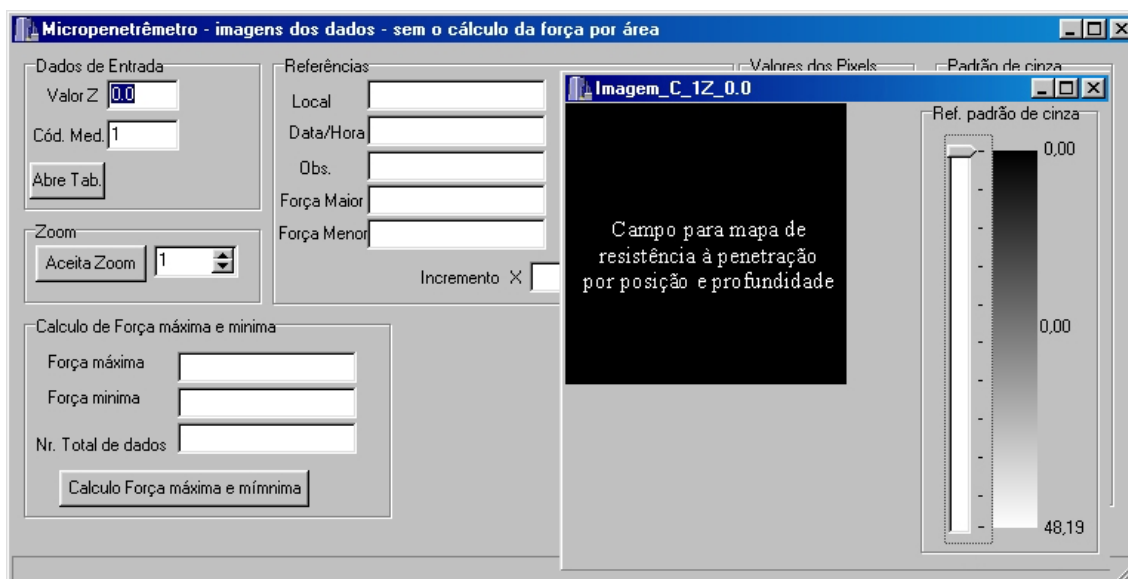


Figura 3.44 : Tela de reconstrução da imagem da camada de valor Z da caixa *Valor Z*, a área reservada para a imagem esta com aumento de 10x na interface com o usuário.

Na barra de títulos da tela é colocado, automaticamente, o nome da imagem referenciada com o código da coleta e da profundidade Z, por exemplo *Imagem\_C\_1Z\_3.0*, que significa imagem da coleta 1 (C\_1) de profundidade Z igual a  $3.0 \times 10^{-3}$  m (Z\_3.0).

### 3.9 Visualização volumétrica.

Conforme explicado anteriormente, as imagens geradas pelo programa computacional fornecem informações bidimensional por camada de penetração da microsonda, fazendo um total de 66 imagens separadas de  $0,1 \times 10^{-3}$  m nas primeiras 40 medidas e de  $1,0 \times 10^{-3}$  m nas 26 restantes.



A possibilidade de agrupar essas imagens umas sobre as outras fornece uma visão tridimensional das camadas subsuperficiais de como a resistência do solo à penetração de raízes se comporta. Para isto foi desenvolvido outro módulo computacional com a finalidade de se agrupar essas imagens bidimensionais em uma forma tridimensional, interpolando uma ou varias camadas entre os espaços de cada camada.

### 3.9.1 Interpolação por *spline-wavelets*

A interpolação consiste em estimar dados intermediários com base nos dados previamente conhecidos e para este processo foi usado na reconstrução tridimensional a técnica de interpolação por *B-Spline-Wavelets*. (GRAPS, 1955; BRADLEY, 1993; DONOHO, 1993; MINATEL, 1997; REVATHY, 2000) Ou mais comumente chamada de *B-Wavelets*

A relação entre a *Wavelet* Haar, representada por  $RSP_H$  e a função *B-Spline* de primeira ordem representada por  $N_1$ , é mostrada na eq. 19.

$$RSP_H(z) = N_1(2z) - N_1(2z - 1) \quad (17)$$

onde  $z$  é a coordenada entre dois mapas a interpolar, e a relação com *B-Spline* de segunda ordem  $N_2$  é dada por:

$$RSP_H(z) = N_2(2z) \quad (18)$$

deste modo, o valor de  $N_m$  pode ser dado pela Equação:

$$N_m(k) = \begin{cases} N_2(k) = \delta_{k,1} & k \in Z \\ N_{n+1}(k) = \frac{k}{n} N_n(k) + \frac{n-k+1}{n} N_n(k-1) & k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (19)$$

obs.  $Z$  conjunto dos números inteiros.

Toma-se agora função *B-Spline*  $L_2$  dada por  $L_2(x) = N_2(x+1)$  onde  $L$  é definida pela eq. 20 na ordem  $m$  e com a seqüência de coeficientes  $c_k$  como:

$$L_m(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k^{(m)} N_m\left(z + \frac{m}{2} - k\right) \quad (20)$$

Uma *Wavelet* básica é definida como:

$$RSP_H(z) = L_2(2z - 1) \quad (21)$$

Seguindo esse desenvolvimento, pode-se conseguir *Wavelets-Splines* de ordens superiores, ou então, pode-se gerar espaços de ordens superiores pela relação:

$$V_{j+1}^{(m)} = V_{2m}^{(m)} \oplus W_j^{(m)}, j \in Z \quad (22)$$

onde  $\oplus$  simboliza uma soma ortogonal,  $V$  pertence a seqüência  $\{V_j^m\}$  gerada pela análise de multiresolução gerada pela *B-Spline* de  $m$ -ésima ordem e  $W$  pertence a  $\{W_j^m\}$  que é a seqüência de espaços *wavelets* ortogonais complementares.

De acordo com o teorema a seguir,

“Seja  $m$  um número inteiro positivo e definindo  $\psi_{1,m}(x) = L_{2m}^{(m)}(2x - 1)$  onde  $L_{2m}$  é a spline fundamental de  $(2m)^{ésima}$  ordem. Então  $\psi_{1,m}$  gera os espaços complementares  $W_j^m, j \in Z$  da seguinte forma:

$$W_j^m = \text{fecho}L^2(\mathfrak{R})\langle 2^{j/2}\psi_{1,m}(2^j x - k) : k \in Z \rangle, j \in Z \quad (23)$$

A interpolação por *B-wavelets* determina os valores intermediários entre uma seqüência de pontos conhecida. Diferentemente da aproximação, a interpolação não apenas desloca a curva gerada sob a influência dos pontos conhecidos, como também faz com que essa curva passe por esses pontos. A figura 3.45 ilustra essa diferença:

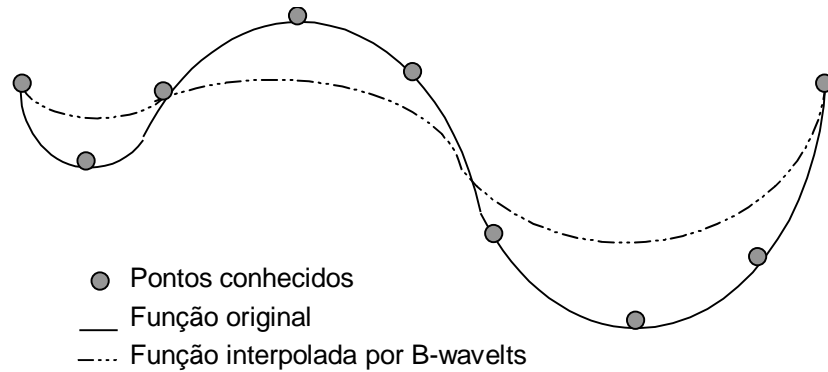


Figura 3.45 : Exemplo de interpolação e aproximação por *B-wavelets*.

Na descrição da interpolação, faz-se uma necessária discussão sobre o método de aproximação, seus problemas e suas soluções computacionais.

Seja  $g$  uma função de aproximação Spline de ordem  $m$  e com passo  $\eta = 2^{-j_0} Z$  dada por:

$$g(\eta) = \sum_{i=0}^N z_i B(N\eta - i) \quad (24)$$

onde  $N$  é o número de pontos conhecidos.

De forma a otimizar o processo de cálculo, implementa-se a função  $B(x)$ , também chamada de função de “*blending*”, da seguinte maneira:

$$B(z) = \begin{cases} \frac{1}{6}(2 + z^3) & -2 \leq z \leq -1 \\ \frac{1}{6}(4 - 6z^2 - 2z^3) & -1 \leq z \leq 0 \\ \frac{1}{6}(4 - 6z^2 + 2z^3) & 0 \leq z \leq 1 \\ \frac{1}{6}(2 - z^3) & 1 \leq z \leq 2 \\ 0 & 2 \leq |z| \end{cases} \quad (25)$$

A implementação direta desta somatória fornece os valores intermediários da aproximação. No entanto, para os pontos inicial e final para  $m=4$ , por exemplo, tem-se os valores :

$$\eta(0) = \frac{2}{3}z_0 + \frac{1}{6}z_1 \neq z_0 \quad (26)$$

e

$$\eta(1) = \frac{2}{3}z_n + \frac{1}{6}z_{N-1} \neq z_N \quad (27)$$

Para solucionar esse problema, nesta implementação, adotou-se o uso dos chamados “*pontos fantasmas*”. Essa técnica consiste em considerar um ou mais valores antes do ponto inicial e depois do final.

Foram adicionados dois pontos fantasmas no início e dois no final da seqüência conhecida. Esses valores foram ajustados de forma dinâmica para que a curva a ser gerada pela função B-wavelet passasse por esses pontos.

Esses pontos tem seus valores obedecendo a regra :  $z_{-1} = 2z_0 - z_1$  e  $z_{-2} = 2z_{-1} - z_0$  para os pontos iniciais e  $z_{N+1} = 2z_N - z_{N-1}$  e  $z_{N+2} = 2z_{N+1} - z_N$  para os pontos finais.

A função mostrada na eq. 24 fica da seguinte forma:

$$g(\eta) = \sum_{i=-2}^{N+2} z_i B(N\eta - i) \quad (28)$$

Para a implementação da interpolação, ao invés da simples aproximação, usa-se uma função muito próxima da função de aproximação. Essa função é dada por :

$$g(\eta) = \sum_{i=0}^N Z_i N_m(N\eta - i) \quad (29)$$

A idéia básica é usar a seqüência de pontos  $Z_i$  no lugar de  $z_i$ . Essa seqüência é dada pela multiplicação das matrizes  $Z = M^{-1}a$ , onde  $Z$  é o vetor (seqüência) a ser encontrado,  $z$  é o vetor de pontos conhecidos com os pontos fantasmas e  $M$  é uma matriz  $N+3 \times N+3$  dada por:

$$M = \begin{bmatrix} -\frac{N}{2} & 0 & \frac{N}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{N}{2} & 0 & \frac{N}{2} \end{bmatrix} \quad (30)$$

### 3.9.2 – Programa computacional de visualização volumétrica

A interface de visualização volumétrica é ilustrada na figura 3.46. Nela há uma área reservada para a visualização da imagem volumétrica, e junto a imagem volumétrica ficam os eixos, que com o movimento do *mouse*, possibilitam visualizar os cortes transversais, coronais e sagitais. Junto a área de visualização volumétrica estão três barras com um cursor que são usados para poder movimentar os eixos X, Y e Z para a visualização dos cortes da imagem em janelas complementares da interface.

Este módulo foi desenvolvido com o objetivo de complementar todos processo de reconstrução apresentando os dados de um forma amigável e que permita ao usuário manipular a exibição das imagens.

Através do aplicativo desenvolvido é possível fazer filtragens no dados através de *thresholds*, visualizando os diferentes coeficientes da atenuação do corpo dentro da faixas escolhida e utilizar o *mouse* para se efetuar rotações e

translações no corpo sobre os eixos X, Y e Z de modo que se possa visualizar o objeto reconstruído de diversos ângulos.

No centro da interface há duas paletas, uma com um espectro colorido e outro com tons de cinza, chamadas de *Espectros Visíveis*. No centro entre as duas faixas tem-se uma outra que é usada para indicar ao usuário a faixa de *threshold* que se pretende analisar na base de dados geradora das imagens. Tanto a faixa colorida como a de tons de cinza variam dentro de uma escala de 0 a 255 níveis.

A interface volumétrica também apresenta um pequeno menu com as indicações *File*, *Option* e *?*. O menu *File* é composto dos comandos de *Open*, *Save*, *Close* e *Exit*. O comando *Open* tem a finalidade de abrir o arquivo que está a imagem, o comando *Close* de fechar a visualização em curso, o comando *Exit* de fechar todo o aplicativo e o comando *Save* tem a função de salvar as imagens após análise, caso o usuário deseje. É possível por este comando salvar uma a uma das imagens mostradas, para isto, esse comando é dividido em outros quatro que são *Visualização*, *Corte Coronal*, *Corte Sagital* e *Corte Transversal*, conforme ilustrado na figura 3.47.

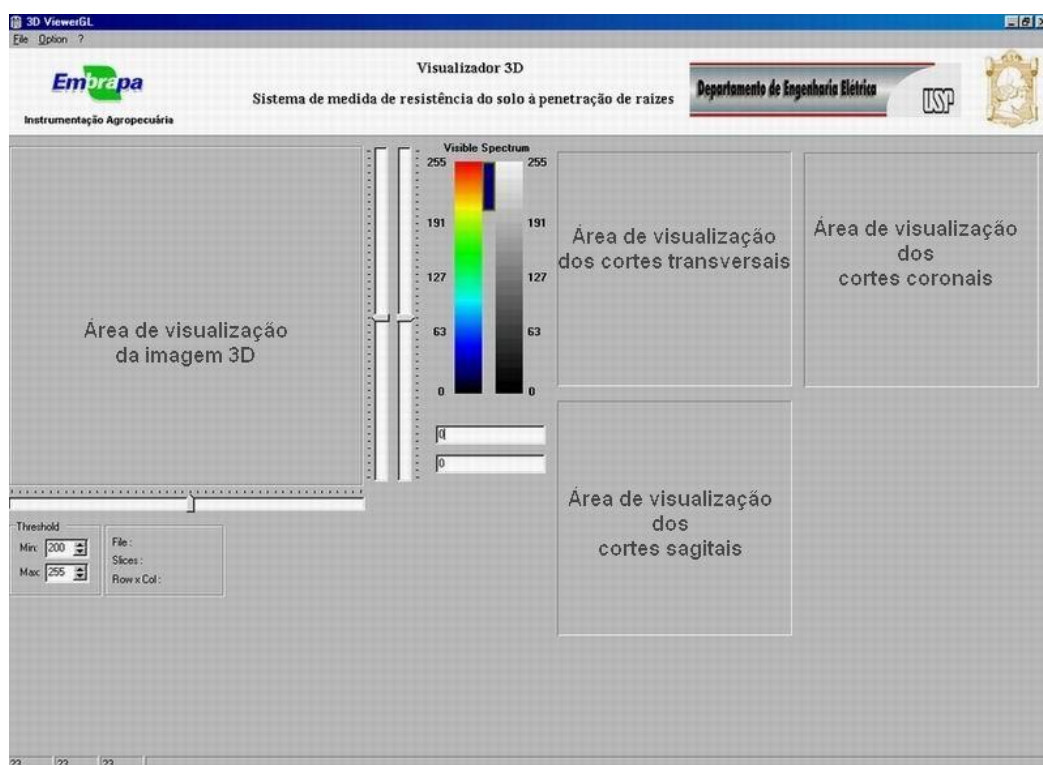


Figura 3.46 : Tela de visualização dos mapas tridimensionais.

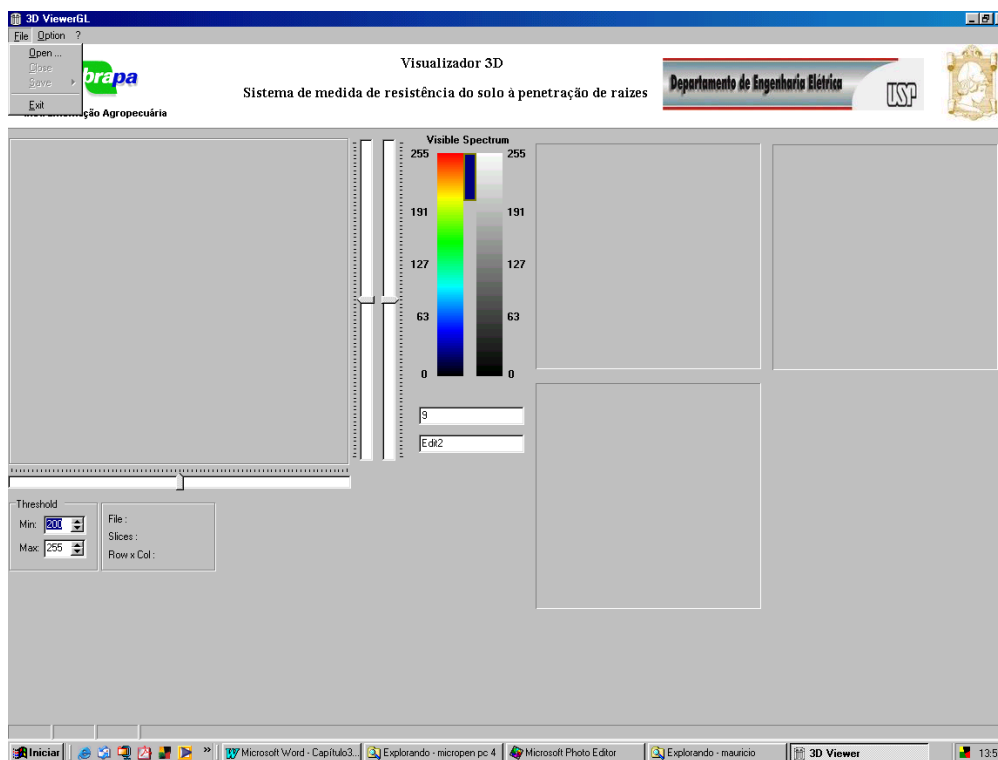


Figura 3.47 : Menu *File* do programa de visualização volumétrica, ao alto a esquerda.

O menu *Option*, tem a finalidade de promover ao usuário opções de escolha quanto ao eixo que deve ser visualizado, ou todos, através dos comandos *Eixos*, *Mostra todos*, *Eixo X*, *Eixo Y* e *Eixo Z*. Viabiliza dois outros comandos chamados de *Pallet* e *Auxiliar Light* que têm a função de, respectivamente, escolher se a imagem será exibida em cores ou em tons de cinza e melhor visualização gráfica com efeito de iluminação virtual, conforme mostrado na figura 3.48.

Na implementação do programa computacional foi utilizado o ambiente de programação do *Borland Builder C++* e a biblioteca gráfica *OpenGL* (WALNUM, 1992; DAVID, 1995; OPENGL, 2001; JEFF, 2001; PEREIRA, 2001, CRUVINEL *et al.*, 2003). Com o uso da biblioteca *OpenGL* a implementação das primitivas de rotação e translação, bem como a disposição tridimensional dos dados no espaço foi simplificada, uma vez que na biblioteca encontram-se diversas funções que implementam os conceitos utilizados na visualização de dados tridimensionais.

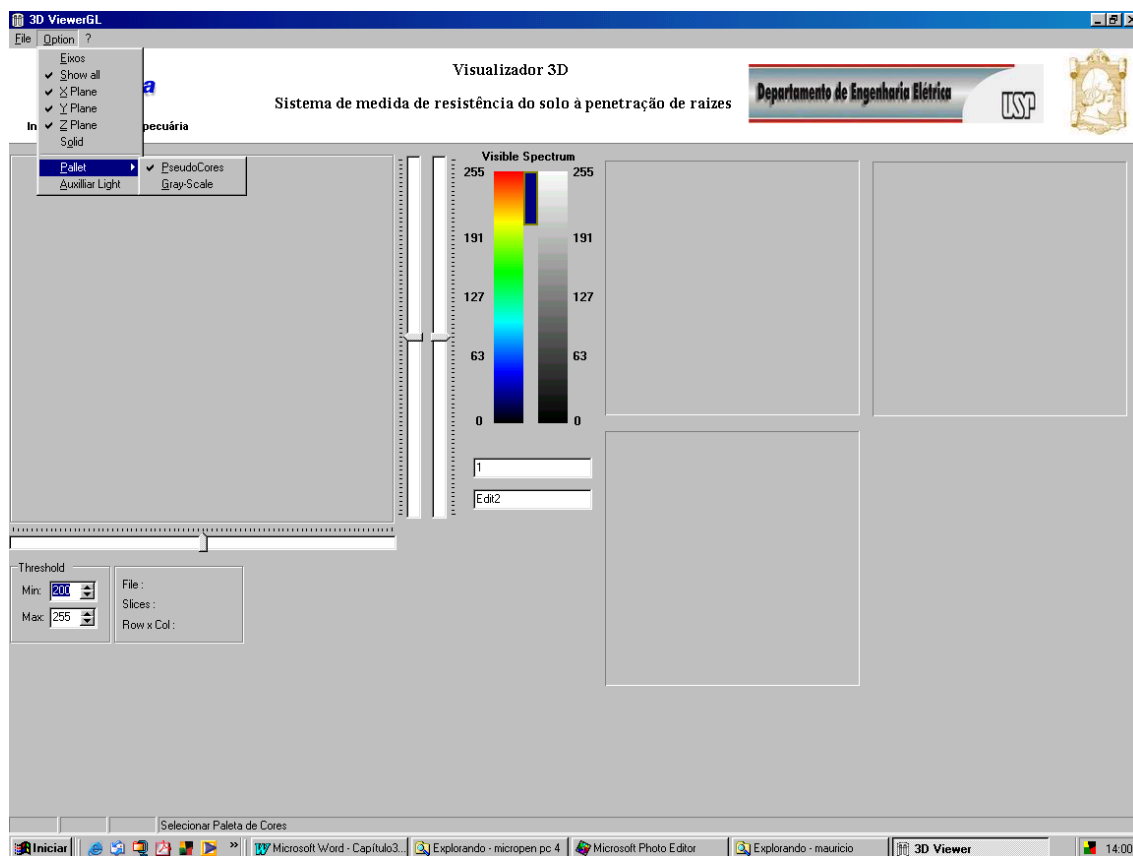


Figura 3.48 : Menu *Option* do programa de visualização volumétrica, ao alto a esquerda.

Os programas desenvolvidos podem ser consultados no comunicado interno apresentado por Rabello e colaboradores em setembro de 2003, (RABELLO *et al.*, 2003).



## Capítulo 4

### Resultados e conclusões

Neste capítulo são apresentados os resultados e conclusões obtidas referente à aferição, resolução, sensibilidade, reprodutibilidade e precisão, incluindo acuracidade das medidas realizadas com a microsonda e a instrumentação desenvolvida, incluindo ensaios de laboratório e de campo.

#### 4.1 Calibração do instrumento

O sistema de sensibilidade de força utilizado no instrumento é composto por uma célula de carga com capacidade de 5,00 kg e característica elétrica de 2,00 mV/V. Como ela é alimentada com uma tensão de 12,00 Vdc, o máximo de sinal que ela fornece esta dentro da faixa de 0,00 a 24,00 mVdc.

O sinal de saída da célula de carga é amplificado por meio de um circuito eletrônico, composto por amplificadores operacionais, com um ganho de 200 vezes, resultando em uma faixa de tensão de 0,00 a 4,80 Vdc. Faixa esta admissível pelo conversor analógico-digital do microcontrolador 80535, que tem uma faixa de operação de 0,00 a 5,00 Vdc em sua entrada de sinal para a conversão. O sinal convertido pelo A/D de 8 bits do microcontrolador 80535 pode assim estar dentro da faixa de 0 a 255 níveis digitais. Assim, ele apresenta uma sensibilidade de 19,61 mVdc por nível digital convertido.

A célula de carga utilizada possui uma resposta, que dentro das especificações do fabricante, estável, correspondente a um nível de saída de excitação elétrica de 2,00 mV/V. Mas, como este sinal é amplificado e

convertido para uma palavra digital de 0 a 255 níveis, faz-se necessário uma calibração do sistema de medida de força, uma vez que só se tem em mãos as palavras digitais.

Assim, a calibração foi realizada com a ajuda de uma balança da marca FILIZOLA de capacidade 20,00 kg, mas dividida em escalas, tais como de 0,00 a 5,00 kg; 0,00 a 10,00 kg e de 0,00 a 20,00 kg, sendo que a escala utilizada foi a de 0,00 a 5,00 kg. O prato de pesagem foi retirado e o ajuste de zero foi realizado com pesos padrões.

Uma vez ajustado o zero da balança, o sistema de medida de força foi ajustado a se posicionar no centro da base do prato de pesagem com a ponta da microsonda encostada nessa base.

Para a realização das medidas, foi provocado um avanço da microsonda sobre a base da balança, provocando uma deflexão no ponteiro de medida da mesma. A deflexão foi equivalente a força que o sistema proporcionou.

O avanço da microsonda foi feito de modo a provocar um incremento de 0,10 kg para cada medida e foram feitas 10 leituras para cada incremento. Para fins de organização as medidas foram divididas em faixas de leituras, sendo a primeira variando de 0,00 a 1,00 kg, a segunda de 1,00 a 2,00 kg, a terceira de 2,00 a 3,00 kg, a quarta de 3,00 a 4,00 kg e a quinta de 4,00 a 5,00 kg, incrementando de 0,10 kg para cada medida dentro de cada faixa de leitura.

O sinal de torção da célula de carga, proporcional a deflexão do ponteiro da balança foi convertido em um sinal analógico, amplificado, na faixa de 0,00 a 5,00 Vdc, por meio do circuito de condicionamento de sinal da célula de carga. Este sinal foi monitorado por um multimedidor da marca HP modelo 34401A de 6½ dígitos em opção de medida de tensão, cujas características principais são, método de medida com integração contínua com conversor analógico digital mult-slop III, de linearidade 0,0002% para leitura e 0,0001% para faixa de medida; resistência de entrada selecionável de 10 M $\Omega$  ou maior que 10 G $\Omega$  para faixas de 0,1 V, 1 V e 10 V, e 10 M $\Omega$   $\pm$ 1% para faixas de 100 V

e 1000 V; corrente de entrada menor que 30 pA a 25°C; proteção de entrada de 1000 V em toda a faixa; faixas de leituras de 0 a 10,0000 mV, 0 a 1,000000 V, 0 a 10,00000 V, 0 a 100,0000 V e 0 a 1000,000 V.

O sinal proveniente da célula de carga foi enviado até o conversor analógico/digital, para a conversão, e mais tarde armazenado e convertido em uma posição de memória para uso futuro. Como o conversor A/D é uma parte importante para a conversão do sinal fez-se necessário um conhecimento de como é feita essa conversão e se ocorre na proporção ou com uma adequada aproximação do sinal convertido.

#### **4.2 Avaliação do conversor A/D do microcontrolador 80535**

Conforme dados de fabricante o 80535 possui um conversor A/D de 8 bits de 8 entradas multiplexadas (podendo ser estendido para 10 bits). No desenvolvimento foi utilizada a entrada analógica AN0, pino 20, com uma faixa de conversão de sinal analógico de 0,00 a 5,00 Vdc. No Apêndice D, as linhas de programação para a conversão A/D, no modo 10 bits, são apresentadas e se configuram como uma opção de uso da plataforma implementada.

A entrada analógico foi alimentada com um sinal proveniente de uma fonte de tensão de precisão de um eletrômetro de marca KIETHLEY, modelo 6517A.

O retorno do sinal convertido em sua correspondente palavra digital, foi feito por meio do programa de controle do sistema de medida de resistência do solo à penetração de raízes (RSPR) no modo *calibrar*, que permite a visualização em tempo real da respectiva conversão de medida.

A avaliação do sinal convertido se fez alimentando a entrada analógico com o respectivo sinal de tensão até a indicação dos valores inteiros na tela *calibrar*, estes valores foram tomados de 10 em 10, começando com o valor 10 e incrementando até o valor de 255, sendo que foram feitas 10 leituras para cada medida.

Foram estudados para cada medida o valor mais provável da grandeza, o erro absoluto verdadeiro, o erro absoluto aparente, o erro relativo, o erro percentual, o desvio médio, o desvio quadrático médio, o desvio padrão, a variância e o erro tolerável, conforme pode ser observado na tabela 4.1 (TIMONER *et al.*, 1976).

Tabela 4.1 : Avaliação do erro do conversor A/D.

| A/D lido | Tensão mVdc | A/D teórico esp. | Média A/D esp. | Tensão mVdc teórica | Média tensão teórica | Ev   | Erro Abs. Ap. | Er   | E%    | Unidade – palavra do A/D |       |
|----------|-------------|------------------|----------------|---------------------|----------------------|------|---------------|------|-------|--------------------------|-------|
| 10       | 0,17047     | 8,69             | 8,69           | 1,96E-01            | 0,20                 | 1,31 | 1,31          | 0,15 | 15,02 | Desvio médio             | 1,51  |
| 10       | 0,17047     | 8,69             |                | 1,96E-01            |                      | 1,31 | 1,31          | 0,15 | 15,02 | Desvio Quadrático médio  | 1,56  |
| 11       | 0,17047     | 8,69             |                | 2,16E-01            |                      | 2,31 | 2,31          | 0,27 | 26,52 | Desvio padrão            | 1,64  |
| 10       | 0,17047     | 8,69             |                | 1,96E-01            |                      | 1,31 | 1,31          | 0,15 | 15,02 | Variância                | 2,70  |
| 10       | 0,17047     | 8,69             |                | 1,96E-01            |                      | 1,31 | 1,31          | 0,15 | 15,02 | Erro tolerável           | 8,09  |
| 10       | 0,17048     | 8,69             |                | 1,96E-01            |                      | 1,31 | 1,31          | 0,15 | 15,02 |                          |       |
| 11       | 0,17048     | 8,69             |                | 2,16E-01            |                      | 2,31 | 2,31          | 0,27 | 26,52 | Média E%                 | 17,32 |
| 10       | 0,17048     | 8,69             |                | 1,96E-01            |                      | 1,31 | 1,31          | 0,15 | 15,02 |                          |       |
| 10       | 0,17048     | 8,69             |                | 1,96E-01            |                      | 1,31 | 1,31          | 0,15 | 15,02 |                          |       |
| 10       | 0,17048     | 8,69             |                | 1,96E-01            |                      | 1,31 | 1,31          | 0,15 | 15,02 |                          |       |
| 20       | 0,3644      | 18,58            | 18,59          | 3,92E-01            | 0,36                 | 1,42 | 1,41          | 0,08 | 7,61  | Desvio médio             | 1,51  |
| 20       | 0,3644      | 18,58            |                | 3,92E-01            |                      | 1,42 | 1,41          | 0,08 | 7,61  | Desvio Quadrático médio  | 1,61  |
| 21       | 0,36441     | 18,58            |                | 4,12E-01            |                      | 2,42 | 2,41          | 0,13 | 12,99 | Desvio padrão            | 1,69  |
| 20       | 0,36441     | 18,58            |                | 3,92E-01            |                      | 1,42 | 1,41          | 0,08 | 7,61  | Variância                | 2,87  |
| 19       | 0,36441     | 18,58            |                | 3,73E-01            |                      | 0,42 | 0,41          | 0,02 | 2,23  | Erro tolerável           | 8,62  |
| 21       | 0,36442     | 18,59            |                | 4,12E-01            |                      | 2,41 | 2,41          | 0,13 | 12,99 |                          |       |
| 20       | 0,36442     | 18,59            |                | 3,92E-01            |                      | 1,41 | 1,41          | 0,08 | 7,61  | Média E%                 | 8,15  |
| 20       | 0,36442     | 18,59            |                | 3,92E-01            |                      | 1,41 | 1,41          | 0,08 | 7,61  |                          |       |
| 20       | 0,36442     | 18,59            |                | 3,92E-01            |                      | 1,41 | 1,41          | 0,08 | 7,61  |                          |       |
| 20       | 0,36442     | 18,59            |                | 3,92E-01            |                      | 1,41 | 1,41          | 0,08 | 7,61  |                          |       |
| 30       | 0,5443      | 27,76            | 27,93          | 5,88E-01            | 0,56                 | 2,24 | 2,07          | 0,07 | 7,41  | Desvio médio             | 2,07  |
| 30       | 0,54431     | 27,76            |                | 5,88E-01            |                      | 2,24 | 2,07          | 0,07 | 7,41  | Desvio Quadrático médio  | 2,07  |
| 30       | 0,54846     | 27,97            |                | 5,88E-01            |                      | 2,03 | 2,07          | 0,07 | 7,41  | Desvio padrão            | 2,18  |
| 30       | 0,54846     | 27,97            |                | 5,88E-01            |                      | 2,03 | 2,07          | 0,07 | 7,41  | Variância                | 4,76  |
| 30       | 0,54855     | 27,98            |                | 5,88E-01            |                      | 2,02 | 2,07          | 0,07 | 7,41  | Erro tolerável           | 14,29 |
| 30       | 0,54847     | 27,97            |                | 5,88E-01            |                      | 2,03 | 2,07          | 0,07 | 7,41  |                          |       |
| 30       | 0,54847     | 27,97            |                | 5,88E-01            |                      | 2,03 | 2,07          | 0,07 | 7,41  | Média E%                 | 7,41  |
| 30       | 0,54847     | 27,97            |                | 5,88E-01            |                      | 2,03 | 2,07          | 0,07 | 7,41  |                          |       |
| 30       | 0,54847     | 27,97            |                | 5,88E-01            |                      | 2,03 | 2,07          | 0,07 | 7,41  |                          |       |
| 30       | 0,54847     | 27,97            |                | 5,88E-01            |                      | 2,03 | 2,07          | 0,07 | 7,41  |                          |       |
| 40       | 0,73391     | 37,43            | 37,43          | 7,84E-01            | 0,75                 | 2,57 | 2,57          | 0,07 | 6,87  | Desvio médio             | 2,57  |
| 40       | 0,73391     | 37,43            |                | 7,84E-01            |                      | 2,57 | 2,57          | 0,07 | 6,87  | Desvio Quadrático médio  | 2,57  |
| 40       | 0,73393     | 37,43            |                | 7,84E-01            |                      | 2,57 | 2,57          | 0,07 | 6,87  | Desvio padrão            | 2,71  |
| 40       | 0,73392     | 37,43            |                | 7,84E-01            |                      | 2,57 | 2,57          | 0,07 | 6,87  | Variância                | 7,34  |
| 40       | 0,73393     | 37,43            |                | 7,84E-01            |                      | 2,57 | 2,57          | 0,07 | 6,87  | Erro tolerável           | 22,01 |
| 40       | 0,73392     | 37,43            |                | 7,84E-01            |                      | 2,57 | 2,57          | 0,07 | 6,87  |                          |       |
| 40       | 0,73393     | 37,43            |                | 7,84E-01            |                      | 2,57 | 2,57          | 0,07 | 6,87  | Média E%                 | 6,87  |
| 40       | 0,73394     | 37,43            |                | 7,84E-01            |                      | 2,57 | 2,57          | 0,07 | 6,87  |                          |       |
| 40       | 0,73394     | 37,43            |                | 7,84E-01            |                      | 2,57 | 2,57          | 0,07 | 6,87  |                          |       |
| 40       | 0,73395     | 37,43            |                | 7,84E-01            |                      | 2,57 | 2,57          | 0,07 | 6,87  |                          |       |
| 50       | 0,92589     | 47,22            | 47,22          | 9,80E-01            | 0,95                 | 2,78 | 2,78          | 0,06 | 5,88  | Desvio médio             | 2,78  |
| 50       | 0,92589     | 47,22            |                | 9,80E-01            |                      | 2,78 | 2,78          | 0,06 | 5,88  | Desvio Quadrático médio  | 2,78  |
| 50       | 0,9259      | 47,22            |                | 9,80E-01            |                      | 2,78 | 2,78          | 0,06 | 5,88  | Desvio padrão            | 2,93  |
| 50       | 0,9259      | 47,22            |                | 9,80E-01            |                      | 2,78 | 2,78          | 0,06 | 5,88  | Variância                | 8,58  |
| 50       | 0,9259      | 47,22            |                | 9,80E-01            |                      | 2,78 | 2,78          | 0,06 | 5,88  | Erro tolerável           | 25,74 |
| 50       | 0,92591     | 47,22            |                | 9,80E-01            |                      | 2,78 | 2,78          | 0,06 | 5,88  |                          |       |
| 50       | 0,92591     | 47,22            |                | 9,80E-01            |                      | 2,78 | 2,78          | 0,06 | 5,88  | Média E%                 | 5,88  |
| 50       | 0,92591     | 47,22            |                | 9,80E-01            |                      | 2,78 | 2,78          | 0,06 | 5,88  |                          |       |
| 50       | 0,92592     | 47,22            |                | 9,80E-01            |                      | 2,78 | 2,78          | 0,06 | 5,88  |                          |       |
| 50       | 0,9259      | 47,22            |                | 9,80E-01            |                      | 2,78 | 2,78          | 0,06 | 5,88  |                          |       |
| 60       | 1,1311      | 57,69            | 57,69          | 1,18E+00            | 1,14                 | 2,31 | 2,31          | 0,04 | 4,01  | Desvio médio             | 2,31  |
| 60       | 1,13111     | 57,69            |                | 1,18E+00            |                      | 2,31 | 2,31          | 0,04 | 4,01  | Desvio Quadrático médio  | 2,31  |
| 60       | 1,1311      | 57,69            |                | 1,18E+00            |                      | 2,31 | 2,31          | 0,04 | 4,01  | Desvio padrão            | 2,44  |
| 60       | 1,13111     | 57,69            |                | 1,18E+00            |                      | 2,31 | 2,31          | 0,04 | 4,01  | Variância                | 5,95  |
| 60       | 1,13112     | 57,69            |                | 1,18E+00            |                      | 2,31 | 2,31          | 0,04 | 4,01  | Erro tolerável           | 17,84 |
| 60       | 1,1311      | 57,69            |                | 1,18E+00            |                      | 2,31 | 2,31          | 0,04 | 4,01  |                          |       |
| 60       | 1,13112     | 57,69            |                | 1,18E+00            |                      | 2,31 | 2,31          | 0,04 | 4,01  | Média E%                 | 4,01  |
| 60       | 1,13112     | 57,69            |                | 1,18E+00            |                      | 2,31 | 2,31          | 0,04 | 4,01  |                          |       |
| 60       | 1,13112     | 57,69            |                | 1,18E+00            |                      | 2,31 | 2,31          | 0,04 | 4,01  |                          |       |
| 60       | 1,13113     | 57,69            |                | 1,18E+00            |                      | 2,31 | 2,31          | 0,04 | 4,01  |                          |       |
| 70       | 1,3066      | 66,64            | 66,64          | 1,37E+00            | 1,34                 | 3,36 | 3,36          | 0,05 | 5,05  | Desvio médio             | 3,36  |

|     |        |        |        |          |      |      |      |      |      |                         |       |
|-----|--------|--------|--------|----------|------|------|------|------|------|-------------------------|-------|
| 70  | 1,3066 | 66,64  |        | 1,37E+00 |      | 3,36 | 3,36 | 0,05 | 5,05 | Desvio Quadrático médio | 3,36  |
| 70  | 1,3066 | 66,64  |        | 1,37E+00 |      | 3,36 | 3,36 | 0,05 | 5,05 | Desvio padrão           | 3,55  |
| 70  | 1,3066 | 66,64  |        | 1,37E+00 |      | 3,36 | 3,36 | 0,05 | 5,05 | Variância               | 12,57 |
| 70  | 1,3066 | 66,64  |        | 1,37E+00 |      | 3,36 | 3,36 | 0,05 | 5,05 | Erro tolerável          | 37,71 |
| 70  | 1,3066 | 66,64  |        | 1,37E+00 |      | 3,36 | 3,36 | 0,05 | 5,05 |                         |       |
| 70  | 1,3066 | 66,64  |        | 1,37E+00 |      | 3,36 | 3,36 | 0,05 | 5,05 | Média E%                | 5,05  |
| 70  | 1,3066 | 66,64  |        | 1,37E+00 |      | 3,36 | 3,36 | 0,05 | 5,05 |                         |       |
| 70  | 1,3066 | 66,64  |        | 1,37E+00 |      | 3,36 | 3,36 | 0,05 | 5,05 |                         |       |
| 70  | 1,3066 | 66,64  |        | 1,37E+00 |      | 3,36 | 3,36 | 0,05 | 5,05 |                         |       |
| 80  | 1,5053 | 76,77  | 76,77  | 1,57E+00 | 1,54 | 3,23 | 3,23 | 0,04 | 4,21 | Desvio médio            | 3,23  |
| 80  | 1,5053 | 76,77  |        | 1,57E+00 |      | 3,23 | 3,23 | 0,04 | 4,21 | Desvio Quadrático médio | 3,23  |
| 80  | 1,5053 | 76,77  |        | 1,57E+00 |      | 3,23 | 3,23 | 0,04 | 4,21 | Desvio padrão           | 3,40  |
| 80  | 1,5053 | 76,77  |        | 1,57E+00 |      | 3,23 | 3,23 | 0,04 | 4,21 | Variância               | 11,59 |
| 80  | 1,5053 | 76,77  |        | 1,57E+00 |      | 3,23 | 3,23 | 0,04 | 4,21 | Erro tolerável          | 34,77 |
| 80  | 1,5053 | 76,77  |        | 1,57E+00 |      | 3,23 | 3,23 | 0,04 | 4,21 |                         |       |
| 80  | 1,5053 | 76,77  |        | 1,57E+00 |      | 3,23 | 3,23 | 0,04 | 4,21 | Média E%                | 4,21  |
| 80  | 1,5053 | 76,77  |        | 1,57E+00 |      | 3,23 | 3,23 | 0,04 | 4,21 |                         |       |
| 80  | 1,5053 | 76,77  |        | 1,57E+00 |      | 3,23 | 3,23 | 0,04 | 4,21 |                         |       |
| 80  | 1,5053 | 76,77  |        | 1,57E+00 |      | 3,23 | 3,23 | 0,04 | 4,21 |                         |       |
| 90  | 1,6931 | 86,34  | 86,35  | 1,76E+00 | 1,73 | 3,66 | 3,65 | 0,04 | 4,23 | Desvio médio            | 3,65  |
| 90  | 1,6931 | 86,35  |        | 1,76E+00 |      | 3,65 | 3,65 | 0,04 | 4,23 | Desvio Quadrático médio | 3,65  |
| 90  | 1,6931 | 86,34  |        | 1,76E+00 |      | 3,66 | 3,65 | 0,04 | 4,23 | Desvio padrão           | 3,85  |
| 90  | 1,6931 | 86,34  |        | 1,76E+00 |      | 3,66 | 3,65 | 0,04 | 4,23 | Variância               | 14,84 |
| 90  | 1,6931 | 86,34  |        | 1,76E+00 |      | 3,66 | 3,65 | 0,04 | 4,23 | Erro tolerável          | 44,52 |
| 90  | 1,6931 | 86,34  |        | 1,76E+00 |      | 3,66 | 3,65 | 0,04 | 4,23 |                         |       |
| 90  | 1,6931 | 86,35  |        | 1,76E+00 |      | 3,65 | 3,65 | 0,04 | 4,23 | Média E%                | 4,23  |
| 90  | 1,6931 | 86,35  |        | 1,76E+00 |      | 3,65 | 3,65 | 0,04 | 4,23 |                         |       |
| 90  | 1,6931 | 86,35  |        | 1,76E+00 |      | 3,65 | 3,65 | 0,04 | 4,23 |                         |       |
| 90  | 1,6931 | 86,35  |        | 1,76E+00 |      | 3,65 | 3,65 | 0,04 | 4,23 |                         |       |
| 100 | 1,8905 | 96,42  | 96,41  | 1,96E+00 | 1,93 | 3,58 | 3,59 | 0,04 | 3,72 | Desvio médio            | 3,59  |
| 100 | 1,8905 | 96,42  |        | 1,96E+00 |      | 3,58 | 3,59 | 0,04 | 3,72 | Desvio Quadrático médio | 3,59  |
| 100 | 1,8904 | 96,41  |        | 1,96E+00 |      | 3,59 | 3,59 | 0,04 | 3,72 | Desvio padrão           | 3,78  |
| 100 | 1,8905 | 96,42  |        | 1,96E+00 |      | 3,58 | 3,59 | 0,04 | 3,72 | Variância               | 14,28 |
| 100 | 1,8905 | 96,42  |        | 1,96E+00 |      | 3,58 | 3,59 | 0,04 | 3,72 | Erro tolerável          | 42,84 |
| 100 | 1,8905 | 96,42  |        | 1,96E+00 |      | 3,58 | 3,59 | 0,04 | 3,72 |                         |       |
| 100 | 1,8905 | 96,42  |        | 1,96E+00 |      | 3,58 | 3,59 | 0,04 | 3,72 | Média E%                | 3,72  |
| 100 | 1,8905 | 96,42  |        | 1,96E+00 |      | 3,58 | 3,59 | 0,04 | 3,72 |                         |       |
| 100 | 1,8905 | 96,42  |        | 1,96E+00 |      | 3,58 | 3,59 | 0,04 | 3,72 |                         |       |
| 100 | 1,8905 | 96,42  |        | 1,96E+00 |      | 3,58 | 3,59 | 0,04 | 3,72 |                         |       |
| 110 | 2,0817 | 106,17 | 106,17 | 2,16E+00 | 2,12 | 3,83 | 3,83 | 0,04 | 3,61 | Desvio médio            | 3,83  |
| 110 | 2,0817 | 106,17 |        | 2,16E+00 |      | 3,83 | 3,83 | 0,04 | 3,61 | Desvio Quadrático médio | 3,83  |
| 110 | 2,0817 | 106,17 |        | 2,16E+00 |      | 3,83 | 3,83 | 0,04 | 3,61 | Desvio padrão           | 4,04  |
| 110 | 2,0817 | 106,17 |        | 2,16E+00 |      | 3,83 | 3,83 | 0,04 | 3,61 | Variância               | 16,33 |
| 110 | 2,0817 | 106,17 |        | 2,16E+00 |      | 3,83 | 3,83 | 0,04 | 3,61 | Erro tolerável          | 48,98 |
| 110 | 2,0817 | 106,17 |        | 2,16E+00 |      | 3,83 | 3,83 | 0,04 | 3,61 |                         |       |
| 110 | 2,0817 | 106,17 |        | 2,16E+00 |      | 3,83 | 3,83 | 0,04 | 3,61 | Média E%                | 3,61  |
| 110 | 2,0817 | 106,17 |        | 2,16E+00 |      | 3,83 | 3,83 | 0,04 | 3,61 |                         |       |
| 110 | 2,0817 | 106,17 |        | 2,16E+00 |      | 3,83 | 3,83 | 0,04 | 3,61 |                         |       |
| 110 | 2,0817 | 106,17 |        | 2,16E+00 |      | 3,83 | 3,83 | 0,04 | 3,61 |                         |       |
| 120 | 2,2654 | 115,54 | 115,54 | 2,35E+00 | 2,32 | 4,46 | 4,46 | 0,04 | 3,86 | Desvio médio            | 4,46  |
| 120 | 2,2654 | 115,54 |        | 2,35E+00 |      | 4,46 | 4,46 | 0,04 | 3,86 | Desvio Quadrático médio | 4,46  |
| 120 | 2,2654 | 115,54 |        | 2,35E+00 |      | 4,46 | 4,46 | 0,04 | 3,86 | Desvio padrão           | 4,71  |
| 120 | 2,2654 | 115,54 |        | 2,35E+00 |      | 4,46 | 4,46 | 0,04 | 3,86 | Variância               | 22,15 |
| 120 | 2,2654 | 115,54 |        | 2,35E+00 |      | 4,46 | 4,46 | 0,04 | 3,86 | Erro tolerável          | 66,44 |
| 120 | 2,2654 | 115,54 |        | 2,35E+00 |      | 4,46 | 4,46 | 0,04 | 3,86 |                         |       |
| 120 | 2,2654 | 115,54 |        | 2,35E+00 |      | 4,46 | 4,46 | 0,04 | 3,86 | Média E%                | 3,86  |
| 120 | 2,2654 | 115,54 |        | 2,35E+00 |      | 4,46 | 4,46 | 0,04 | 3,86 |                         |       |
| 120 | 2,2654 | 115,54 |        | 2,35E+00 |      | 4,46 | 4,46 | 0,04 | 3,86 |                         |       |
| 120 | 2,2654 | 115,54 |        | 2,35E+00 |      | 4,46 | 4,46 | 0,04 | 3,86 |                         |       |
| 130 | 2,4608 | 125,50 | 125,50 | 2,55E+00 | 2,52 | 4,50 | 4,50 | 0,04 | 3,59 | Desvio médio            | 4,50  |
| 130 | 2,4608 | 125,50 |        | 2,55E+00 |      | 4,50 | 4,50 | 0,04 | 3,59 | Desvio Quadrático médio | 4,50  |
| 130 | 2,4608 | 125,50 |        | 2,55E+00 |      | 4,50 | 4,50 | 0,04 | 3,59 | Desvio padrão           | 4,74  |
| 130 | 2,4607 | 125,50 |        | 2,55E+00 |      | 4,50 | 4,50 | 0,04 | 3,59 | Variância               | 22,50 |
| 130 | 2,4608 | 125,50 |        | 2,55E+00 |      | 4,50 | 4,50 | 0,04 | 3,59 | Erro tolerável          | 67,49 |
| 130 | 2,4608 | 125,50 |        | 2,55E+00 |      | 4,50 | 4,50 | 0,04 | 3,59 |                         |       |
| 130 | 2,4608 | 125,50 |        | 2,55E+00 |      | 4,50 | 4,50 | 0,04 | 3,59 | Média E%                | 3,59  |
| 130 | 2,4608 | 125,50 |        | 2,55E+00 |      | 4,50 | 4,50 | 0,04 | 3,59 |                         |       |
| 130 | 2,4608 | 125,50 |        | 2,55E+00 |      | 4,50 | 4,50 | 0,04 | 3,59 |                         |       |
| 130 | 2,4608 | 125,50 |        | 2,55E+00 |      | 4,50 | 4,50 | 0,04 | 3,59 |                         |       |
| 140 | 2,6592 | 135,62 | 135,62 | 2,75E+00 | 2,71 | 4,38 | 4,38 | 0,03 | 3,23 | Desvio médio            | 4,38  |
| 140 | 2,6592 | 135,62 |        | 2,75E+00 |      | 4,38 | 4,38 | 0,03 | 3,23 | Desvio Quadrático médio | 4,38  |
| 140 | 2,6593 | 135,62 |        | 2,75E+00 |      | 4,38 | 4,38 | 0,03 | 3,23 | Desvio padrão           | 4,61  |
| 140 | 2,6593 | 135,62 |        | 2,75E+00 |      | 4,38 | 4,38 | 0,03 | 3,23 | Variância               | 21,28 |
| 140 | 2,6593 | 135,62 |        | 2,75E+00 |      | 4,38 | 4,38 | 0,03 | 3,23 | Erro tolerável          | 63,85 |
| 140 | 2,6593 | 135,62 |        | 2,75E+00 |      | 4,38 | 4,38 | 0,03 | 3,23 |                         |       |
| 140 | 2,6593 | 135,62 |        | 2,75E+00 |      | 4,38 | 4,38 | 0,03 | 3,23 | Média E%                | 3,23  |
| 140 | 2,6593 | 135,62 |        | 2,75E+00 |      | 4,38 | 4,38 | 0,03 | 3,23 |                         |       |
| 140 | 2,6593 | 135,62 |        | 2,75E+00 |      | 4,38 | 4,38 | 0,03 | 3,23 |                         |       |
| 140 | 2,6593 | 135,62 |        | 2,75E+00 |      | 4,38 | 4,38 | 0,03 | 3,23 |                         |       |
| 150 | 2,8346 | 144,56 | 144,56 | 2,94E+00 | 2,91 | 5,44 | 5,44 | 0,04 | 3,76 | Desvio médio            | 5,44  |
| 150 | 2,8346 | 144,56 |        | 2,94E+00 |      | 5,44 | 5,44 | 0,04 | 3,76 | Desvio Quadrático médio | 5,44  |
| 150 | 2,8346 | 144,56 |        | 2,94E+00 |      | 5,44 | 5,44 | 0,04 | 3,76 | Desvio padrão           | 5,73  |
| 150 | 2,8345 | 144,56 |        | 2,94E+00 |      | 5,44 | 5,44 | 0,04 | 3,76 | Variância               | 32,85 |
| 150 | 2,8346 | 144,56 |        | 2,94E+00 |      | 5,44 | 5,44 | 0,04 | 3,76 | Erro tolerável          | 98,55 |
| 150 | 2,8345 | 144,56 |        | 2,94E+00 |      | 5,44 | 5,44 | 0,04 | 3,76 |                         |       |



|     |        |        |        |          |      |      |      |      |      |                         |        |
|-----|--------|--------|--------|----------|------|------|------|------|------|-------------------------|--------|
| 239 | 4,5691 | 233,02 |        | 4,69E+00 |      | 5,98 | 5,97 | 0,03 | 2,56 | Desvio quadrático médio | 7,01   |
| 241 | 4,5692 | 233,03 |        | 4,73E+00 |      | 7,97 | 7,97 | 0,03 | 3,42 | Desvio padrão           | 7,39   |
| 240 | 4,5693 | 233,03 |        | 4,71E+00 |      | 6,97 | 6,97 | 0,03 | 2,99 | Variância               | 54,64  |
| 239 | 4,5693 | 233,03 |        | 4,69E+00 |      | 5,97 | 5,97 | 0,03 | 2,56 | Erro tolerável          | 163,93 |
| 241 | 4,5692 | 233,03 |        | 4,73E+00 |      | 7,97 | 7,97 | 0,03 | 3,42 |                         |        |
| 240 | 4,5692 | 233,03 |        | 4,71E+00 |      | 6,97 | 6,97 | 0,03 | 2,99 | Média E%                | 2,99   |
| 241 | 4,5693 | 233,03 |        | 4,73E+00 |      | 7,97 | 7,97 | 0,03 | 3,42 |                         |        |
| 240 | 4,5692 | 233,03 |        | 4,71E+00 |      | 6,97 | 6,97 | 0,03 | 2,99 |                         |        |
| 239 | 4,5693 | 233,03 |        | 4,69E+00 |      | 5,97 | 5,97 | 0,03 | 2,56 |                         |        |
| 250 | 4,7472 | 242,11 | 242,11 | 4,90E+00 | 4,87 | 7,89 | 7,89 | 0,03 | 3,26 | Desvio médio            | 7,89   |
| 250 | 4,7472 | 242,11 |        | 4,90E+00 |      | 7,89 | 7,89 | 0,03 | 3,26 | Desvio quadrático médio | 7,89   |
| 250 | 4,7472 | 242,11 |        | 4,90E+00 |      | 7,89 | 7,89 | 0,03 | 3,26 | Desvio padrão           | 8,32   |
| 250 | 4,7472 | 242,11 |        | 4,90E+00 |      | 7,89 | 7,89 | 0,03 | 3,26 | Variância               | 69,19  |
| 250 | 4,7473 | 242,11 |        | 4,90E+00 |      | 7,89 | 7,89 | 0,03 | 3,26 | Erro tolerável          | 207,57 |
| 250 | 4,7473 | 242,11 |        | 4,90E+00 |      | 7,89 | 7,89 | 0,03 | 3,26 |                         |        |
| 250 | 4,7472 | 242,11 |        | 4,90E+00 |      | 7,89 | 7,89 | 0,03 | 3,26 | Média E%                | 3,26   |
| 250 | 4,7473 | 242,11 |        | 4,90E+00 |      | 7,89 | 7,89 | 0,03 | 3,26 |                         |        |
| 250 | 4,7472 | 242,11 |        | 4,90E+00 |      | 7,89 | 7,89 | 0,03 | 3,26 |                         |        |
| 250 | 4,7472 | 242,11 |        | 4,90E+00 |      | 7,89 | 7,89 | 0,03 | 3,26 |                         |        |
| 255 | 4,8626 | 247,99 | 247,99 | 5,00E+00 | 4,98 | 7,01 | 7,01 | 0,03 | 2,83 | Desvio médio            | 6,91   |
| 255 | 4,8627 | 248,00 |        | 5,00E+00 |      | 7,00 | 7,01 | 0,03 | 2,83 | Desvio quadrático médio | 6,91   |
| 255 | 4,8626 | 247,99 |        | 5,00E+00 |      | 7,01 | 7,01 | 0,03 | 2,83 | Desvio padrão           | 7,29   |
| 255 | 4,8626 | 247,99 |        | 5,00E+00 |      | 7,01 | 7,01 | 0,03 | 2,83 | Variância               | 53,09  |
| 254 | 4,8626 | 247,99 |        | 4,98E+00 |      | 6,01 | 6,01 | 0,02 | 2,42 | Erro tolerável          | 159,27 |
| 255 | 4,8627 | 248,00 |        | 5,00E+00 |      | 7,00 | 7,01 | 0,03 | 2,83 |                         |        |
| 255 | 4,8626 | 247,99 |        | 5,00E+00 |      | 7,01 | 7,01 | 0,03 | 2,83 | Média E%                | 2,78   |
| 255 | 4,8627 | 248,00 |        | 5,00E+00 |      | 7,00 | 7,01 | 0,03 | 2,83 |                         |        |
| 255 | 4,8626 | 247,99 |        | 5,00E+00 |      | 7,01 | 7,01 | 0,03 | 2,83 |                         |        |
| 255 | 4,8626 | 247,99 |        | 5,00E+00 |      | 7,01 | 7,01 | 0,03 | 2,83 |                         |        |

Na figura 4.1, é mostrada a variação do valor do erro percentual em função da palavra do A/D. Observa-se a maior variação para os valores inferiores à palavra 20 do A/D, decrescendo e permanecendo estável para valores superiores a palavra 80 do A/D. Nesta faixa, considerada, observou-se um erro médio percentual de 4,29%.

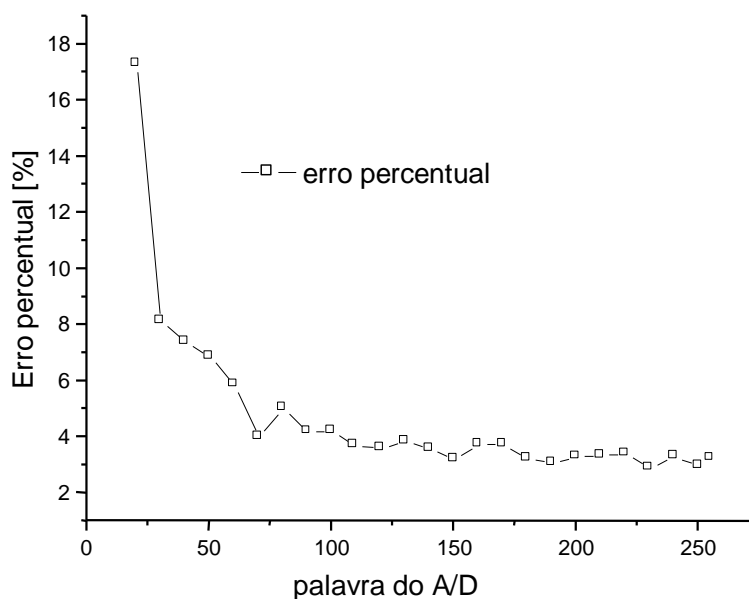


Figura 4.1 : Erro percentual para os valores lidos na conversão analógica.

A diferença entre o valor real que deveria ser indicado pelo conversor A/D, na conversão do sinal analógico, e o valor medido é mostrado na figura 4.2.

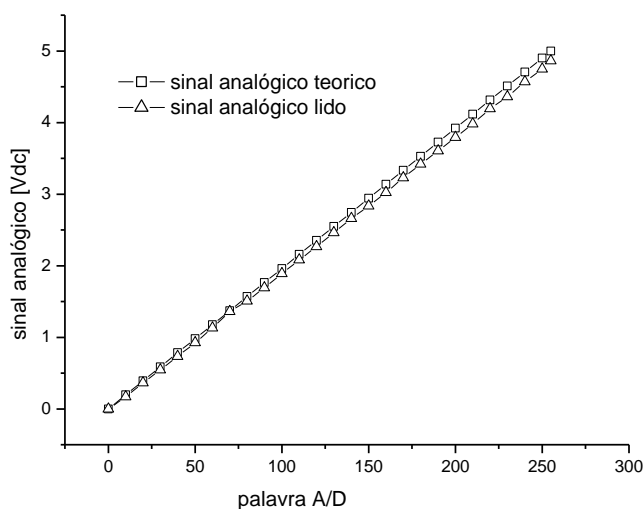


Figura 4.2 : Diferença entre o valor teórico de conversão do A/D e valor medido.

### 4.3 Avaliação dos valores da medida de força do sistema de medida de resistência do solo à penetração de raízes

As análises dos resultados de medida de força estão representadas nas tabelas 4.2 a 4.6, onde foram avaliados, o valor mais provável da grandeza, o erro absoluto verdadeiro, o erro absoluto aparente, o erro relativo, o erro percentual, o desvio médio, o desvio quadrático médio, o desvio padrão, a variância e o erro tolerável.

Tabela 4.2 : Avaliação do estudo do erro da medida de resistência dos solo à penetração de raízes, de 0 kg a 1 kg.

| Força Kg | Tensão MVdc | A/d lido | Média A/D Lido | A/D esperado | Média A/D esperado | Conversão Para Kg | Valor prov. da grandeza | Ev   | Erro abs. ap. | Er   | E%    | Unidade – kg    |          |
|----------|-------------|----------|----------------|--------------|--------------------|-------------------|-------------------------|------|---------------|------|-------|-----------------|----------|
| 0        | 0,12        | 1,00     | 0,40           | 1,17         | 1,17               | -0,01             | -0,02                   | 0,01 | 0,01          | 0,58 | 57,78 | Desvio médio    | 8,98E-03 |
| 0        | 0,103       | 0,00     |                | 1,17         |                    | -0,03             |                         | 0,03 | 0,01          | 0,39 | 38,52 | Desvio q. médio | 9,16E-03 |
| 0        | 0,128       | 1,00     |                | 1,17         |                    | -0,01             |                         | 0,01 | 0,01          | 0,58 | 57,78 | Desvio padrão   | 9,66E-03 |
| 0        | 0,132       | 1,00     |                | 1,17         |                    | -0,01             |                         | 0,01 | 0,01          | 0,58 | 57,78 | Variância       | 9,33E-05 |
| 0        | 0,11        | 0,00     |                | 1,17         |                    | -0,03             |                         | 0,03 | 0,01          | 0,39 | 38,52 | Erro tolerável  | 2,80E-04 |
| 0        | 0,089       | 0,00     |                | 1,16         |                    | -0,03             |                         | 0,03 | 0,01          | 0,39 | 38,52 | Média           |          |
| 0        | 0,103       | 0,00     |                | 1,17         |                    | -0,03             |                         | 0,03 | 0,01          | 0,39 | 38,52 | Ev              | 1,94E-02 |
| 0        | 0,118       | 1,00     |                | 1,17         |                    | -0,01             |                         | 0,01 | 0,01          | 0,58 | 57,78 | Erro abs. Ap.   | 8,98E-3  |
| 0        | 0,08        | 0,00     |                | 1,16         |                    | -0,03             |                         | 0,03 | 0,01          | 0,39 | 38,52 | Er              | 4,62E-01 |
| 0        | 0,096       | 0,00     |                | 1,17         |                    | -0,03             |                         | 0,03 | 0,01          | 0,39 | 38,52 | E%              | 4,62E+01 |
| 0,1      | 91,59       | 6,00     | 4,67           | 5,96         | 5,15               | 0,09              | 0,08                    | 0,01 | 0,01          | 0,10 | 9,61  | Desvio médio    | 8,98E-03 |
| 0,1      | 91,48       | 6,00     |                | 5,95         |                    | 0,09              |                         | 0,01 | 0,01          | 0,10 | 9,61  | Desvio q. médio | 9,16E-03 |
| 0,1      | 91,51       | 6,00     |                | 5,95         |                    | 0,09              |                         | 0,01 | 0,01          | 0,10 | 9,61  | Desvio padrão   | 9,66E-03 |



|     |        |       |       |       |       |      |      |      |      |      |       |                 |          |
|-----|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-----------------|----------|
| 0,1 | 91,19  | 5,00  |       | 5,93  |       | 0,07 |      | 0,03 | 0,01 | 0,14 | 14,42 | Variância       | 9,33E-05 |
| 0,1 | 91,49  | 6,00  |       | 5,95  |       | 0,09 |      | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 9,61  | Erro tolerável  | 2,80E-04 |
| 0,1 | 91,58  | 6,00  |       | 5,96  |       | 0,09 |      | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 9,61  | Média           |          |
| 0,1 | 91,48  | 5,00  |       | 5,95  |       | 0,07 |      | 0,03 | 0,01 | 0,14 | 14,42 | Ev              | 2,22E-02 |
| 0,1 | 91,34  | 5,00  |       | 5,94  |       | 0,07 |      | 0,03 | 0,01 | 0,14 | 14,42 | Erro abs. Ap.   | 8,98E-03 |
| 0,1 | 91,6   | 6,00  |       | 5,96  |       | 0,09 |      | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 9,61  | Er              | 1,15E-01 |
| 0,1 | 91,45  | 5,00  |       | 5,95  |       | 0,07 |      | 0,03 | 0,01 | 0,14 | 14,42 | E%              | 1,15E+01 |
| 0,2 | 202,63 | 12,00 | 10,83 | 11,77 | 10,80 | 0,20 | 0,20 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,96  | Desvio médio    | 3,37E-03 |
| 0,2 | 202,39 | 11,00 |       | 11,76 |       | 0,18 |      | 0,02 | 0,02 | 0,09 | 8,60  | Desvio q. médio | 5,61E-03 |
| 0,2 | 202,43 | 12,00 |       | 11,76 |       | 0,20 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,96  | Desvio padrão   | 5,91E-03 |
| 0,2 | 202,51 | 12,00 |       | 11,76 |       | 0,20 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,96  | Variância       | 3,50E-05 |
| 0,2 | 202,68 | 12,00 |       | 11,77 |       | 0,20 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,96  | Erro tolerável  | 1,05E-04 |
| 0,2 | 202,63 | 12,00 |       | 11,77 |       | 0,20 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,96  | Média           |          |
| 0,2 | 202,58 | 12,00 |       | 11,77 |       | 0,20 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,96  | Ev              | 4,37E-03 |
| 0,2 | 202,65 | 12,00 |       | 11,77 |       | 0,20 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,96  | Erro abs. Ap.   | 3,37E-03 |
| 0,2 | 202,49 | 12,00 |       | 11,76 |       | 0,20 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,96  | Er              | 1,72E-02 |
| 0,2 | 202,63 | 12,00 |       | 11,77 |       | 0,20 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,96  | E%              | 1,72E-00 |
| 0,3 | 304,64 | 17,00 | 15,92 | 17,11 | 16,21 | 0,29 | 0,29 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 1,97  | Desvio médio    | 7,85E-03 |
| 0,3 | 304,75 | 17,00 |       | 17,12 |       | 0,29 |      | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 1,97  | Desvio q. médio | 8,57E-03 |
| 0,3 | 304,63 | 17,00 |       | 17,11 |       | 0,29 |      | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 1,97  | Desvio padrão   | 9,03E-03 |
| 0,3 | 304,34 | 17,00 |       | 17,10 |       | 0,29 |      | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 1,97  | Variância       | 8,16E-05 |
| 0,3 | 304,47 | 17,00 |       | 17,10 |       | 0,29 |      | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 1,97  | Erro tolerável  | 2,45E-04 |
| 0,3 | 304,59 | 17,00 |       | 17,11 |       | 0,29 |      | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 1,97  | Média           |          |
| 0,3 | 304,08 | 16,00 |       | 17,08 |       | 0,27 |      | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 4,59  | Ev              | 1,46E-02 |
| 0,3 | 304,18 | 17,00 |       | 17,09 |       | 0,29 |      | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 1,97  | Erro abs. Ap.   | 7,85E-03 |
| 0,3 | 304,16 | 16,00 |       | 17,09 |       | 0,27 |      | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 4,59  | Er              | 2,75E-02 |
| 0,3 | 304,05 | 16,00 |       | 17,08 |       | 0,27 |      | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 4,59  | E%              | 2,75E-00 |
| 0,4 | 421,09 | 23,00 | 22,17 | 23,21 | 22,18 | 0,40 | 0,41 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 1,82  | Desvio médio    | 8,98E-03 |
| 0,4 | 421,23 | 23,00 |       | 23,22 |       | 0,40 |      | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 1,82  | Desvio q. médio | 9,16E-03 |
| 0,4 | 420,92 | 24,00 |       | 23,20 |       | 0,42 |      | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 2,73  | Desvio padrão   | 9,66E-03 |
| 0,4 | 420,96 | 24,00 |       | 23,20 |       | 0,42 |      | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 2,73  | Variância       | 9,33E-05 |
| 0,4 | 421,04 | 23,00 |       | 23,21 |       | 0,40 |      | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 1,82  | Erro tolerável  | 2,80E-04 |
| 0,4 | 420,89 | 24,00 |       | 23,20 |       | 0,42 |      | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 2,73  | Média           |          |
| 0,4 | 420,94 | 24,00 |       | 23,20 |       | 0,42 |      | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 2,73  | Ev              | 1,07E-02 |
| 0,4 | 420,47 | 23,00 |       | 23,18 |       | 0,40 |      | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 1,82  | Erro abs. Ap.   | 8,98E-03 |
| 0,4 | 420,37 | 23,00 |       | 23,17 |       | 0,40 |      | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 1,82  | Er              | 2,19E-02 |
| 0,4 | 420,41 | 23,00 |       | 23,17 |       | 0,40 |      | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 1,82  | E%              | 2,19E-00 |
| 0,5 | 527,52 | 29,00 | 27,42 | 28,78 | 27,82 | 0,52 | 0,50 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 2,61  | Desvio médio    | 1,05E-02 |
| 0,5 | 527,1  | 29,00 |       | 28,76 |       | 0,52 |      | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 2,61  | Desvio q. médio | 1,20E-02 |
| 0,5 | 527,05 | 28,00 |       | 28,76 |       | 0,50 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 1,12  | Desvio padrão   | 1,26E-02 |
| 0,5 | 527,05 | 27,00 |       | 28,76 |       | 0,48 |      | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 4,84  | Variância       | 1,59E-04 |
| 0,5 | 527,07 | 28,00 |       | 28,76 |       | 0,50 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 1,12  | Erro tolerável  | 4,78E-04 |
| 0,5 | 526,7  | 29,00 |       | 28,74 |       | 0,52 |      | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 2,61  | Média           |          |
| 0,5 | 527,12 | 28,00 |       | 28,76 |       | 0,50 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 1,12  | Ev              | 1,00E-02 |
| 0,5 | 526,68 | 28,00 |       | 28,74 |       | 0,50 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 1,12  | Erro abs. Ap.   | 1,05E-02 |
| 0,5 | 526,75 | 28,00 |       | 28,74 |       | 0,50 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 1,12  | Er              | 2,08E-02 |
| 0,5 | 526,87 | 29,00 |       | 28,75 |       | 0,52 |      | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 2,61  | E%              | 2,08E+00 |
| 0,6 | 634,9  | 34,00 | 33,00 | 34,40 | 33,44 | 0,61 | 0,61 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,31  | Desvio médio    | 3,37E-03 |
| 0,6 | 634,75 | 34,00 |       | 34,40 |       | 0,61 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,31  | Desvio q. médio | 5,61E-03 |
| 0,6 | 634,01 | 33,00 |       | 34,36 |       | 0,59 |      | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 2,77  | Desvio padrão   | 5,91E-03 |
| 0,6 | 634,91 | 34,00 |       | 34,40 |       | 0,61 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,31  | Variância       | 3,50E-05 |
| 0,6 | 634,34 | 34,00 |       | 34,37 |       | 0,61 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,31  | Erro tolerável  | 1,05E-04 |
| 0,6 | 634,75 | 34,00 |       | 34,40 |       | 0,61 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,31  | Média           |          |
| 0,6 | 634,64 | 34,00 |       | 34,39 |       | 0,61 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,31  | Ev              | 8,99E-03 |
| 0,6 | 634,48 | 34,00 |       | 34,38 |       | 0,61 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,31  | Erro abs. Ap.   | 3,37E-03 |
| 0,6 | 634,29 | 34,00 |       | 34,37 |       | 0,61 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,31  | Er              | 5,55E-03 |
| 0,6 | 634,14 | 34,00 |       | 34,36 |       | 0,61 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,31  | E%              | 5,55E-01 |
| 0,7 | 735,18 | 39,00 | 38,33 | 39,65 | 38,78 | 0,70 | 0,71 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,53  | Desvio médio    | 5,98E-03 |
| 0,7 | 735,44 | 39,00 |       | 39,67 |       | 0,70 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,53  | Desvio q. médio | 7,48E-03 |
| 0,7 | 735,52 | 39,00 |       | 39,67 |       | 0,70 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,53  | Desvio padrão   | 7,88E-03 |
| 0,7 | 735,6  | 40,00 |       | 39,68 |       | 0,72 |      | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 2,12  | Variância       | 6,22E-05 |
| 0,7 | 735,42 | 39,00 |       | 39,67 |       | 0,70 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,53  | Erro tolerável  | 1,87E-04 |
| 0,7 | 735,18 | 39,00 |       | 39,65 |       | 0,70 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,53  | Média           |          |
| 0,7 | 735,16 | 39,00 |       | 39,65 |       | 0,70 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,53  | Ev              | 6,14E-03 |
| 0,7 | 735,42 | 40,00 |       | 39,67 |       | 0,72 |      | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 2,12  | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 0,7 | 735,28 | 39,00 |       | 39,66 |       | 0,70 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,53  | Er              | 8,47E-03 |
| 0,7 | 735,14 | 39,00 |       | 39,65 |       | 0,70 |      | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,53  | E%              | 8,47E-01 |
| 0,8 | 831,78 | 45,00 | 43,83 | 44,71 | 43,87 | 0,81 | 0,81 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,46  | Desvio médio    | 5,98E-03 |
| 0,8 | 831,94 | 45,00 |       | 44,72 |       | 0,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,46  | Desvio q. médio | 7,48E-03 |
| 0,8 | 831,84 | 45,00 |       | 44,72 |       | 0,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,46  | Desvio padrão   | 7,88E-03 |
| 0,8 | 832,01 | 45,00 |       | 44,72 |       | 0,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,46  | Variância       | 6,22E-05 |
| 0,8 | 831,86 | 45,00 |       | 44,72 |       | 0,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,46  | Erro tolerável  | 1,87E-04 |
| 0,8 | 831,89 | 45,00 |       | 44,72 |       | 0,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,46  | Média           |          |
| 0,8 | 831,77 | 45,00 |       | 44,71 |       | 0,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,46  | Ev              | 1,25E-02 |
| 0,8 | 832,06 | 45,00 |       | 44,73 |       | 0,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,46  | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 0,8 | 831,64 | 44,00 |       | 44,70 |       | 0,80 |      | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 1,84  | Er              | 7,38E-03 |
| 0,8 | 831,58 | 44,00 |       | 44,70 |       | 0,80 |      | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 1,84  | E%              | 7,38E-01 |
| 0,9 | 946,59 | 50,00 | 49,17 | 50,72 | 49,72 | 0,91 | 0,91 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,41  | Desvio médio    | 5,98E-03 |
| 0,9 | 946,97 | 51,00 |       | 50,74 |       | 0,93 |      | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 1,64  | Desvio q. médio | 7,48E-03 |
| 0,9 | 946,61 | 50,00 |       | 50,72 |       | 0,91 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,41  | Desvio padrão   | 7,88E-03 |

|     |         |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |                 |          |
|-----|---------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-----------------|----------|
| 0,9 | 946,78  | 50,00 |       | 50,73 |       | 0,91 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | Variância       | 6,22E-05 |
| 0,9 | 946,46  | 50,00 |       | 50,72 |       | 0,91 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | Erro tolerável  | 1,87E-04 |
| 0,9 | 946,63  | 51,00 |       | 50,73 |       | 0,93 |      | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 1,64 | Média           |          |
| 0,9 | 946,38  | 50,00 |       | 50,71 |       | 0,91 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | Ev              | 1,18E-02 |
| 0,9 | 946,26  | 50,00 |       | 50,71 |       | 0,91 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 0,9 | 946,21  | 50,00 |       | 50,70 |       | 0,91 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | Er              | 6,56E-03 |
| 0,9 | 946,07  | 50,00 |       | 50,70 |       | 0,91 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | E%              | 6,56E-01 |
| 1   | 1042,68 | 56,00 | 54,58 | 55,75 | 54,88 | 1,02 | 1,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,92 | Desvio médio    | 9,35E-03 |
| 1   | 1042,48 | 56,00 |       | 55,74 |       | 1,02 |      | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,92 | Desvio q. médio | 9,35E-03 |
| 1   | 1042,34 | 56,00 |       | 55,74 |       | 1,02 |      | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,92 | Desvio padrão   | 9,86E-03 |
| 1   | 1042,18 | 56,00 |       | 55,73 |       | 1,02 |      | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,92 | Variância       | 9,71E-05 |
| 1   | 1042,92 | 56,00 |       | 55,77 |       | 1,02 |      | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,92 | Erro tolerável  | 2,91E-04 |
| 1   | 1041,56 | 55,00 |       | 55,70 |       | 1,00 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,92 | Média           |          |
| 1   | 1041,48 | 55,00 |       | 55,69 |       | 1,00 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,92 | Ev              | 1,10E-02 |
| 1   | 1041,26 | 55,00 |       | 55,68 |       | 1,00 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,92 | Erro abs. Ap.   | 9,35E-03 |
| 1   | 1041,19 | 55,00 |       | 55,68 |       | 1,00 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,92 | Er              | 9,25E-03 |
| 1   | 1041,08 | 55,00 |       | 55,67 |       | 1,00 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,92 | E%              | 9,25E-01 |

Tabela 4.3 : Avaliação do estudo do erro da medida de resistência do solo à penetração de raízes, de 1 kg a 2kg.

| Força kg | Tensão MVdc | A/d lido | Média A/D lido | A/D esperado | Média A/D esperado | Conversão Para Kg | Valor prov. da grand e-za | Ev   | Erro abs. ap. | Er   | E%   | Unidade – kg    |          |
|----------|-------------|----------|----------------|--------------|--------------------|-------------------|---------------------------|------|---------------|------|------|-----------------|----------|
| 1        | 1042,68     | 56,00    | 55,50          | 55,75        | 55,71              | 1,02              | 1,01                      | 0,02 | 0,01          | 0,01 | 0,92 | Desvio médio    | 9,35E-03 |
| 1        | 1042,48     | 56,00    |                | 55,74        |                    | 1,02              |                           | 0,02 | 0,01          | 0,01 | 0,92 | Desvio q. médio | 9,35E-03 |
| 1        | 1042,34     | 56,00    |                | 55,74        |                    | 1,02              |                           | 0,02 | 0,01          | 0,01 | 0,92 | Desvio padrão   | 9,86E-03 |
| 1        | 1042,18     | 56,00    |                | 55,73        |                    | 1,02              |                           | 0,02 | 0,01          | 0,01 | 0,92 | Variância       | 9,71E-05 |
| 1        | 1042,92     | 56,00    |                | 55,77        |                    | 1,02              |                           | 0,02 | 0,01          | 0,01 | 0,92 | Erro tolerável  | 2,91E-04 |
| 1        | 1041,56     | 55,00    |                | 55,70        |                    | 1,00              |                           | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,92 | Média           |          |
| 1        | 1041,48     | 55,00    |                | 55,69        |                    | 1,00              |                           | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,92 | Ev              | 1,10E-02 |
| 1        | 1041,26     | 55,00    |                | 55,68        |                    | 1,00              |                           | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,92 | Erro abs. Ap.   | 9,35E-03 |
| 1        | 1041,19     | 55,00    |                | 55,68        |                    | 1,00              |                           | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,92 | Er              | 9,25E-03 |
| 1        | 1041,08     | 55,00    |                | 55,67        |                    | 1,00              |                           | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,92 | E%              | 9,25E-01 |
| 1,1      | 1134,6      | 60,00    | 59,42          | 60,57        | 59,75              | 1,10              | 1,10                      | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,51 | Desvio médio    | 7,85E-03 |
| 1,1      | 1134,6      | 60,00    |                | 60,57        |                    | 1,10              |                           | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,51 | Desvio q. médio | 8,57E-03 |
| 1,1      | 1134,7      | 60,00    |                | 60,57        |                    | 1,10              |                           | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,51 | Desvio padrão   | 9,03E-03 |
| 1,1      | 1135        | 61,00    |                | 60,59        |                    | 1,11              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 1,19 | Variância       | 8,16E-05 |
| 1,1      | 1134,8      | 61,00    |                | 60,58        |                    | 1,11              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 1,19 | Erro tolerável  | 2,45E-04 |
| 1,1      | 1134,9      | 61,00    |                | 60,58        |                    | 1,11              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 1,19 | Média           |          |
| 1,1      | 1134,7      | 60,00    |                | 60,57        |                    | 1,10              |                           | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,51 | Ev              | 7,57E-03 |
| 1,1      | 1134,5      | 60,00    |                | 60,56        |                    | 1,10              |                           | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,51 | Erro abs. Ap.   | 7,85E-03 |
| 1,1      | 1134,3      | 60,00    |                | 60,55        |                    | 1,10              |                           | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,51 | Er              | 7,14E-03 |
| 1,1      | 1134,3      | 60,00    |                | 60,55        |                    | 1,10              |                           | 0,00 | 0,01          | 0,01 | 0,51 | E%              | 7,14E-01 |
| 1,2      | 1235,1      | 66,00    | 64,67          | 65,83        | 64,94              | 1,21              | 1,20                      | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,62 | Desvio médio    | 8,98E-03 |
| 1,2      | 1235,4      | 66,00    |                | 65,85        |                    | 1,21              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,62 | Desvio q. médio | 9,16E-03 |
| 1,2      | 1235,3      | 66,00    |                | 65,84        |                    | 1,21              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,62 | Desvio padrão   | 9,66E-03 |
| 1,2      | 1235,1      | 66,00    |                | 65,83        |                    | 1,21              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,62 | Variância       | 9,33E-05 |
| 1,2      | 1235        | 66,00    |                | 65,82        |                    | 1,21              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,62 | Erro tolerável  | 2,80E-04 |
| 1,2      | 1234,8      | 66,00    |                | 65,81        |                    | 1,21              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,62 | Média           |          |
| 1,2      | 1234,6      | 65,00    |                | 65,80        |                    | 1,19              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,94 | Ev              | 8,94E-03 |
| 1,2      | 1234,4      | 65,00    |                | 65,79        |                    | 1,19              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,94 | Erro abs. Ap.   | 8,98E-03 |
| 1,2      | 1234,3      | 65,00    |                | 65,79        |                    | 1,19              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,94 | Er              | 7,48E-03 |
| 1,2      | 1234,4      | 65,00    |                | 65,79        |                    | 1,19              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,94 | E%              | 7,48E-01 |
| 1,3      | 1340,9      | 71,00    | 69,92          | 71,37        | 70,41              | 1,30              | 1,30                      | 0,00 | 0,00          | 0,00 | 0,14 | Desvio médio    | 3,37E-03 |
| 1,3      | 1341        | 71,00    |                | 71,37        |                    | 1,30              |                           | 0,00 | 0,00          | 0,00 | 0,14 | Desvio q. médio | 5,61E-03 |
| 1,3      | 1340,8      | 71,00    |                | 71,36        |                    | 1,30              |                           | 0,00 | 0,00          | 0,00 | 0,14 | Desvio padrão   | 5,91E-03 |
| 1,3      | 1340,6      | 71,00    |                | 71,35        |                    | 1,30              |                           | 0,00 | 0,00          | 0,00 | 0,14 | Variância       | 3,50E-05 |
| 1,3      | 1340,6      | 71,00    |                | 71,35        |                    | 1,30              |                           | 0,00 | 0,00          | 0,00 | 0,14 | Erro tolerável  | 1,05E-04 |
| 1,3      | 1340,1      | 70,00    |                | 71,33        |                    | 1,28              |                           | 0,02 | 0,02          | 0,01 | 1,30 | Média           |          |
| 1,3      | 1339,8      | 71,00    |                | 71,31        |                    | 1,30              |                           | 0,00 | 0,00          | 0,00 | 0,14 | Ev              | 2,51E-03 |
| 1,3      | 1339,8      | 71,00    |                | 71,31        |                    | 1,30              |                           | 0,00 | 0,00          | 0,00 | 0,14 | Erro abs. Ap.   | 3,37E-03 |
| 1,3      | 1339,4      | 71,00    |                | 71,29        |                    | 1,30              |                           | 0,00 | 0,00          | 0,00 | 0,14 | Er              | 2,59E-03 |
| 1,3      | 1340,3      | 71,00    |                | 71,34        |                    | 1,30              |                           | 0,00 | 0,00          | 0,00 | 0,14 | E%              | 2,59E-01 |
| 1,4      | 1447,2      | 76,00    | 75,42          | 76,94        | 75,97              | 1,39              | 1,40                      | 0,01 | 0,01          | 0,00 | 0,40 | Desvio médio    | 7,85E-03 |
| 1,4      | 1447        | 76,00    |                | 76,92        |                    | 1,39              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,00 | 0,40 | Desvio q. médio | 8,57E-03 |
| 1,4      | 1446,9      | 77,00    |                | 76,92        |                    | 1,41              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,94 | Desvio padrão   | 9,03E-03 |
| 1,4      | 1446,6      | 76,00    |                | 76,90        |                    | 1,39              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,00 | 0,40 | Variância       | 8,16E-05 |
| 1,4      | 1446,8      | 77,00    |                | 76,91        |                    | 1,41              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,94 | Erro tolerável  | 2,45E-04 |
| 1,4      | 1446,5      | 76,00    |                | 76,90        |                    | 1,39              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,00 | 0,40 | Média           |          |
| 1,4      | 1446,9      | 77,00    |                | 76,92        |                    | 1,41              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,01 | 0,94 | Ev              | 7,89E-03 |
| 1,4      | 1446,1      | 76,00    |                | 76,88        |                    | 1,39              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,00 | 0,40 | Erro abs. Ap.   | 7,85E-03 |
| 1,4      | 1446,2      | 76,00    |                | 76,88        |                    | 1,39              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,00 | 0,40 | Er              | 5,61E-03 |
| 1,4      | 1446,1      | 76,00    |                | 76,88        |                    | 1,39              |                           | 0,01 | 0,01          | 0,00 | 0,40 | E%              | 5,61E-01 |
| 1,5      | 1554,8      | 83,00    | 81,17          | 82,57        | 81,60              | 1,53              | 1,51                      | 0,03 | 0,01          | 0,01 | 0,99 | Desvio médio    | 5,98E-03 |

|     |        |        |        |        |        |      |      |      |      |      |                 |              |          |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|------|-----------------|--------------|----------|
| 1,5 | 1554,6 | 83,00  |        | 82,56  |        | 1,53 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,99 | Desvio q. médio | 7,48E-03     |          |
| 1,5 | 1554,3 | 82,00  |        | 82,54  |        | 1,51 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | Desvio padrão   | 7,88E-03     |          |
| 1,5 | 1554,4 | 82,00  |        | 82,55  |        | 1,51 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | Variância       | 6,22E-05     |          |
| 1,5 | 1554,5 | 82,00  |        | 82,55  |        | 1,51 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | Erro tolerável  | 1,87E-04     |          |
| 1,5 | 1554,4 | 82,00  |        | 82,55  |        | 1,51 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | Média           |              |          |
| 1,5 | 1554,3 | 82,00  |        | 82,54  |        | 1,51 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | Ev              | 1,02E-02     |          |
| 1,5 | 1554,2 | 82,00  |        | 82,54  |        | 1,51 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03     |          |
| 1,5 | 1554,1 | 82,00  |        | 82,53  |        | 1,51 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | Er              | 3,96E-03     |          |
| 1,5 | 1554,1 | 82,00  |        | 82,53  |        | 1,51 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | E%              | 3,96E-01     |          |
| 1,6 | 1660,5 | 88,00  | 87,25  | 88,10  | 87,16  | 1,62 | 1,60 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,87            | Desvio médio | 1,96E-02 |
| 1,6 | 1660,4 | 88,00  |        | 88,10  |        | 1,62 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,87 | Desvio q. médio | 2,14E-02     |          |
| 1,6 | 1660,5 | 89,00  |        | 88,10  |        | 1,64 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 2,04 | Desvio padrão   | 2,26E-02     |          |
| 1,6 | 1660,4 | 88,00  |        | 88,10  |        | 1,62 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,87 | Variância       | 5,10E-04     |          |
| 1,6 | 1660,3 | 88,00  |        | 88,09  |        | 1,62 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,87 | Erro tolerável  | 1,53E-03     |          |
| 1,6 | 1660,1 | 88,00  |        | 88,08  |        | 1,62 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,87 | Média           |              |          |
| 1,6 | 1659,8 | 89,00  |        | 88,07  |        | 1,64 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 2,04 | Ev              | 2,43E-02     |          |
| 1,6 | 1659,8 | 89,00  |        | 88,07  |        | 1,64 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 2,04 | Erro abs. Ap.   | 1,96E-02     |          |
| 1,6 | 1659,8 | 88,00  |        | 88,07  |        | 1,62 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,87 | Er              | 1,22E-02     |          |
| 1,6 | 1659,4 | 88,00  |        | 88,05  |        | 1,62 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,87 | E%              | 1,22E+00     |          |
| 1,7 | 1761,4 | 93,00  | 91,83  | 93,39  | 92,48  | 1,71 | 1,70 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,44            | Desvio médio | 8,98E-03 |
| 1,7 | 1761,3 | 93,00  |        | 93,38  |        | 1,71 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Desvio q. médio | 9,16E-03     |          |
| 1,7 | 1761,4 | 93,00  |        | 93,39  |        | 1,71 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Desvio padrão   | 9,66E-03     |          |
| 1,7 | 1761,3 | 93,00  |        | 93,38  |        | 1,71 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Variância       | 9,33E-05     |          |
| 1,7 | 1761   | 93,00  |        | 93,37  |        | 1,71 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Erro tolerável  | 2,80E-04     |          |
| 1,7 | 1761,1 | 93,00  |        | 93,37  |        | 1,71 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Média           |              |          |
| 1,7 | 1760,9 | 92,00  |        | 93,36  |        | 1,69 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,66 | Ev              | 9,92E-03     |          |
| 1,7 | 1760,8 | 92,00  |        | 93,36  |        | 1,69 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,66 | Erro abs. Ap.   | 8,98E-03     |          |
| 1,7 | 1760,6 | 92,00  |        | 93,35  |        | 1,69 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,66 | Er              | 5,27E-03     |          |
| 1,7 | 1760,6 | 92,00  |        | 93,35  |        | 1,69 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,66 | E%              | 5,27E-01     |          |
| 1,8 | 1863,1 | 99,00  | 97,17  | 98,71  | 97,76  | 1,82 | 1,81 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,83            | Desvio médio | 5,98E-03 |
| 1,8 | 1863,1 | 99,00  |        | 98,71  |        | 1,82 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,83 | Desvio q. médio | 7,48E-03     |          |
| 1,8 | 1862,9 | 98,00  |        | 98,70  |        | 1,81 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | Desvio padrão   | 7,88E-03     |          |
| 1,8 | 1862,6 | 98,00  |        | 98,69  |        | 1,81 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | Variância       | 6,22E-05     |          |
| 1,8 | 1861,1 | 98,00  |        | 98,61  |        | 1,81 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | Erro tolerável  | 1,87E-04     |          |
| 1,8 | 1861,5 | 98,00  |        | 98,63  |        | 1,81 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | Média           |              |          |
| 1,8 | 1861,3 | 98,00  |        | 98,62  |        | 1,81 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | Ev              | 9,44E-03     |          |
| 1,8 | 1861,1 | 98,00  |        | 98,61  |        | 1,81 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03     |          |
| 1,8 | 1861,2 | 98,00  |        | 98,61  |        | 1,81 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | Er              | 3,31E-03     |          |
| 1,8 | 1861   | 98,00  |        | 98,60  |        | 1,81 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | E%              | 3,31E-01     |          |
| 1,9 | 1962,9 | 104,00 | 102,58 | 103,94 | 103,01 | 1,92 | 1,91 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,49            | Desvio médio | 9,35E-03 |
| 1,9 | 1962,4 | 104,00 |        | 103,91 |        | 1,92 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,49 | Desvio q. médio | 9,35E-03     |          |
| 1,9 | 1962,5 | 104,00 |        | 103,92 |        | 1,92 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,49 | Desvio padrão   | 9,86E-03     |          |
| 1,9 | 1962,2 | 104,00 |        | 103,90 |        | 1,92 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,49 | Variância       | 9,71E-05     |          |
| 1,9 | 1962,2 | 104,00 |        | 103,90 |        | 1,92 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,49 | Erro tolerável  | 2,91E-04     |          |
| 1,9 | 1962   | 103,00 |        | 103,89 |        | 1,90 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,49 | Média           |              |          |
| 1,9 | 1961,9 | 103,00 |        | 103,89 |        | 1,90 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,49 | Ev              | 9,35E-03     |          |
| 1,9 | 1961,7 | 103,00 |        | 103,87 |        | 1,90 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,49 | Erro abs. Ap.   | 9,35E-03     |          |
| 1,9 | 1961,4 | 103,00 |        | 103,86 |        | 1,90 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,49 | Er              | 4,90E-03     |          |
| 1,9 | 1961,3 | 103,00 |        | 103,85 |        | 1,90 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,49 | E%              | 4,90E-01     |          |
| 2   | 2066,4 | 110,00 | 107,92 | 109,36 | 108,39 | 2,03 | 2,01 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 1,02            | Desvio médio | 1,01E-02 |
| 2   | 2066,3 | 109,00 |        | 109,35 |        | 2,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Desvio q. médio | 1,31E-02     |          |
| 2   | 2066   | 110,00 |        | 109,34 |        | 2,03 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 1,02 | Desvio padrão   | 1,38E-02     |          |
| 2   | 2065,5 | 109,00 |        | 109,31 |        | 2,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Variância       | 1,90E-04     |          |
| 2   | 2065,1 | 109,00 |        | 109,29 |        | 2,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Erro tolerável  | 5,71E-04     |          |
| 2   | 2065,1 | 109,00 |        | 109,29 |        | 2,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Média           |              |          |
| 2   | 2065,2 | 109,00 |        | 109,29 |        | 2,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Ev              | 2,12E-01     |          |
| 2   | 2064,9 | 108,00 |        | 109,28 |        | 1,99 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,84 | Erro abs. Ap.   | 1,01E-02     |          |
| 2   | 2064,6 | 108,00 |        | 109,26 |        | 1,99 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,84 | Er              | 5,03E-03     |          |
| 2   | 2064,5 | 108,00 |        | 109,26 |        | 1,99 | 1,99 | 0,02 | 0,01 | 0,84 | E%              | 5,03E-01     |          |

Tabela 4.4 : Avaliação do estudo do erro da medida de resistência do solo à penetração de raízes, de 2 kg a 3kg.

| Força kg | Tensão MVdc | A/d lido | Média A/D lido | A/D esperado | Média A/D esperado | Conversão Para Kg | Valor prov. da grandeza | Ev   | Erro abs. ap. | Er   | E%   | Unidade – kg    |          |
|----------|-------------|----------|----------------|--------------|--------------------|-------------------|-------------------------|------|---------------|------|------|-----------------|----------|
| 2        | 2066,4      | 110,00   | 108,90         | 109,36       | 109,30             | 2,03              | 2,01                    | 0,03 | 0,02          | 0,01 | 1,02 | Desvio médio    | 1,01E-02 |
| 2        | 2066,3      | 109,00   |                | 109,35       |                    | 2,01              |                         | 0,01 | 0,00          | 0,00 | 0,09 | Desvio q. médio | 1,31E-02 |
| 2        | 2066        | 110,00   |                | 109,34       |                    | 2,03              |                         | 0,03 | 0,02          | 0,01 | 1,02 | Desvio padrão   | 1,38E-02 |
| 2        | 2065,5      | 109,00   |                | 109,31       |                    | 2,01              |                         | 0,01 | 0,00          | 0,00 | 0,09 | Variância       | 1,90E-04 |
| 2        | 2065,1      | 109,00   |                | 109,29       |                    | 2,01              |                         | 0,01 | 0,00          | 0,00 | 0,09 | Erro tolerável  | 5,71E-04 |
| 2        | 2065,1      | 109,00   |                | 109,29       |                    | 2,01              |                         | 0,01 | 0,00          | 0,00 | 0,09 | Média           |          |
| 2        | 2065,2      | 109,00   |                | 109,29       |                    | 2,01              |                         | 0,01 | 0,00          | 0,00 | 0,09 | Ev              | 1,39E-02 |

|     |        |        |        |        |        |      |      |      |      |      |      |                 |          |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|-----------------|----------|
| 2   | 2064,9 | 108,00 |        | 109,28 |        | 1,99 |      | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,84 | Erro abs. Ap.   | 1,01E-02 |
| 2   | 2064,6 | 108,00 |        | 109,26 |        | 1,99 |      | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,84 | Er              | 5,03E-03 |
| 2   | 2064,5 | 108,00 |        | 109,26 |        | 1,99 |      | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,84 | E%              | 5,03E-01 |
| 2,1 | 2167,4 | 115,00 | 113,42 | 114,65 | 113,73 | 2,12 | 2,11 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Desvio médio    | 9,35E-03 |
| 2,1 | 2167,5 | 115,00 |        | 114,65 |        | 2,12 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Desvio q. médio | 9,35E-03 |
| 2,1 | 2167,4 | 115,00 |        | 114,65 |        | 2,12 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Desvio padrão   | 9,86E-03 |
| 2,1 | 2167,2 | 115,00 |        | 114,63 |        | 2,12 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Variância       | 9,71E-05 |
| 2,1 | 2167,2 | 115,00 |        | 114,63 |        | 2,12 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Erro tolerável  | 2,91E-04 |
| 2,1 | 2167   | 114,00 |        | 114,62 |        | 2,10 |      | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Média           |          |
| 2,1 | 2166,8 | 114,00 |        | 114,61 |        | 2,10 |      | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Ev              | 1,43E-02 |
| 2,1 | 2166,4 | 114,00 |        | 114,59 |        | 2,10 |      | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Erro abs. Ap.   | 9,35E-03 |
| 2,1 | 2166,3 | 114,00 |        | 114,59 |        | 2,10 |      | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Er              | 4,42E-03 |
| 2,1 | 2166,1 | 114,00 |        | 114,58 |        | 2,10 |      | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | E%              | 4,42E-01 |
| 2,2 | 2273,2 | 121,00 | 119,17 | 120,18 | 119,23 | 2,24 | 2,22 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,67 | Desvio médio    | 5,98E-03 |
| 2,2 | 2273   | 121,00 |        | 120,17 |        | 2,24 |      | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,67 | Desvio q. médio | 7,48E-03 |
| 2,2 | 2272,8 | 120,00 |        | 120,16 |        | 2,22 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | Desvio padrão   | 7,88E-03 |
| 2,2 | 2272,9 | 120,00 |        | 120,17 |        | 2,22 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | Variância       | 6,22E-05 |
| 2,2 | 2272,6 | 120,00 |        | 120,15 |        | 2,22 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | Erro tolerável  | 1,87E-04 |
| 2,2 | 2272,6 | 120,00 |        | 120,15 |        | 2,22 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | Média           |          |
| 2,2 | 2272,7 | 120,00 |        | 120,16 |        | 2,22 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | Ev              | 2,08E-02 |
| 2,2 | 2272,4 | 120,00 |        | 120,14 |        | 2,22 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 2,2 | 2272,5 | 120,00 |        | 120,15 |        | 2,22 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | Er              | 2,69E-03 |
| 2,2 | 2272,2 | 120,00 |        | 120,13 |        | 2,22 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | E%              | 2,69E-01 |
| 2,3 | 2378,2 | 126,00 | 124,58 | 125,68 | 124,72 | 2,33 | 2,32 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | Desvio médio    | 9,35E-03 |
| 2,3 | 2377,8 | 126,00 |        | 125,66 |        | 2,33 |      | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | Desvio q. médio | 9,35E-03 |
| 2,3 | 2377,7 | 126,00 |        | 125,66 |        | 2,33 |      | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | Desvio padrão   | 9,86E-03 |
| 2,3 | 2377,4 | 126,00 |        | 125,64 |        | 2,33 |      | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | Variância       | 9,71E-05 |
| 2,3 | 2377,3 | 126,00 |        | 125,64 |        | 2,33 |      | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | Erro tolerável  | 2,91E-04 |
| 2,3 | 2377,4 | 125,00 |        | 125,64 |        | 2,31 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | Média           |          |
| 2,3 | 2377   | 125,00 |        | 125,62 |        | 2,31 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | Ev              | 2,00E-02 |
| 2,3 | 2376,9 | 125,00 |        | 125,61 |        | 2,31 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | Erro abs. Ap.   | 9,35E-03 |
| 2,3 | 2376,8 | 125,00 |        | 125,61 |        | 2,31 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | Er              | 4,03E-03 |
| 2,3 | 2377,3 | 125,00 |        | 125,64 |        | 2,31 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | E%              | 4,03E-01 |
| 2,4 | 2478,6 | 131,00 | 129,75 | 130,94 | 130,02 | 2,42 | 2,42 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,23 | Desvio médio    | 7,85E-03 |
| 2,4 | 2478,4 | 131,00 |        | 130,93 |        | 2,42 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,23 | Desvio q. médio | 8,57E-03 |
| 2,4 | 2478,4 | 131,00 |        | 130,93 |        | 2,42 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,23 | Desvio padrão   | 9,03E-03 |
| 2,4 | 2478,2 | 131,00 |        | 130,92 |        | 2,42 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,23 | Variância       | 8,16E-05 |
| 2,4 | 2478,1 | 131,00 |        | 130,91 |        | 2,42 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,23 | Erro tolerável  | 2,45E-04 |
| 2,4 | 2477,9 | 131,00 |        | 130,90 |        | 2,42 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,23 | Média           |          |
| 2,4 | 2477,8 | 131,00 |        | 130,90 |        | 2,42 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,23 | Ev              | 1,72E-02 |
| 2,4 | 2477,4 | 130,00 |        | 130,88 |        | 2,40 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,54 | Erro abs. Ap.   | 7,85E-03 |
| 2,4 | 2477,3 | 130,00 |        | 130,87 |        | 2,40 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,54 | Er              | 3,25E-03 |
| 2,4 | 2477,3 | 130,00 |        | 130,87 |        | 2,40 |      | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,54 | E%              | 3,25E-01 |
| 2,5 | 2584,3 | 137,00 | 135,33 | 136,47 | 135,51 | 2,54 | 2,52 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Desvio médio    | 8,98E-03 |
| 2,5 | 2584,2 | 137,00 |        | 136,47 |        | 2,54 |      | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Desvio q. médio | 9,16E-03 |
| 2,5 | 2584,2 | 137,00 |        | 136,47 |        | 2,54 |      | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | Desvio padrão   | 9,66E-03 |
| 2,5 | 2583,9 | 136,00 |        | 136,45 |        | 2,52 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,30 | Variância       | 9,33E-05 |
| 2,5 | 2583,6 | 136,00 |        | 136,44 |        | 2,52 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,30 | Erro tolerável  | 2,80E-04 |
| 2,5 | 2583,5 | 136,00 |        | 136,43 |        | 2,52 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,30 | Média           |          |
| 2,5 | 2583,1 | 136,00 |        | 136,41 |        | 2,52 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,30 | Ev              | 2,38E-02 |
| 2,5 | 2583   | 136,00 |        | 136,41 |        | 2,52 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,30 | Erro abs. Ap.   | 8,98E-03 |
| 2,5 | 2582,7 | 136,00 |        | 136,39 |        | 2,52 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,30 | Er              | 3,56E-03 |
| 2,5 | 2583,4 | 137,00 |        | 136,43 |        | 2,54 |      | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,44 | E%              | 3,56E-01 |
| 2,6 | 2690,5 | 142,00 | 140,92 | 142,03 | 141,06 | 2,63 | 2,62 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Desvio médio    | 5,98E-03 |
| 2,6 | 2690,5 | 142,00 |        | 142,03 |        | 2,63 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Desvio q. médio | 7,48E-03 |
| 2,6 | 2690,2 | 142,00 |        | 142,02 |        | 2,63 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Desvio padrão   | 7,88E-03 |
| 2,6 | 2689,9 | 142,00 |        | 142,00 |        | 2,63 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Variância       | 6,22E-05 |
| 2,6 | 2689,8 | 142,00 |        | 142,00 |        | 2,63 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Erro tolerável  | 1,87E-04 |
| 2,6 | 2689,7 | 142,00 |        | 141,99 |        | 2,63 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Média           |          |
| 2,6 | 2689,5 | 142,00 |        | 141,98 |        | 2,63 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Ev              | 2,48E-02 |
| 2,6 | 2689,2 | 142,00 |        | 141,97 |        | 2,63 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 2,6 | 2688,9 | 141,00 |        | 141,95 |        | 2,61 |      | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,57 | Er              | 2,28E-03 |
| 2,6 | 2688,5 | 141,00 |        | 141,93 |        | 2,61 |      | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,57 | E%              | 2,28E-01 |
| 2,7 | 2794,3 | 148,00 | 146,17 | 147,47 | 146,51 | 2,74 | 2,73 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,55 | Desvio médio    | 5,98E-03 |
| 2,7 | 2794,4 | 147,00 |        | 147,47 |        | 2,72 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Desvio q. médio | 7,48E-03 |
| 2,7 | 2793,6 | 148,00 |        | 147,43 |        | 2,74 |      | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,55 | Desvio padrão   | 7,88E-03 |
| 2,7 | 2793,4 | 147,00 |        | 147,42 |        | 2,72 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Variância       | 6,22E-05 |
| 2,7 | 2793,1 | 147,00 |        | 147,41 |        | 2,72 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Erro tolerável  | 1,87E-04 |
| 2,7 | 2793,1 | 147,00 |        | 147,41 |        | 2,72 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Média           |          |
| 2,7 | 2792,9 | 147,00 |        | 147,40 |        | 2,72 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Ev              | 2,57E-02 |
| 2,7 | 2792,9 | 147,00 |        | 147,40 |        | 2,72 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 2,7 | 2793,1 | 147,00 |        | 147,41 |        | 2,72 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | Er              | 2,20E-03 |
| 2,7 | 2792,6 | 147,00 |        | 147,38 |        | 2,72 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | E%              | 2,20E-01 |
| 2,8 | 2891   | 152,00 | 151,33 | 152,53 | 151,63 | 2,82 | 2,82 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | Desvio médio    | 5,98E-03 |
| 2,8 | 2890,9 | 153,00 |        | 152,53 |        | 2,83 |      | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,53 | Desvio q. médio | 7,48E-03 |
| 2,8 | 2890,7 | 153,00 |        | 152,52 |        | 2,83 |      | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,53 | Desvio padrão   | 7,88E-03 |

|     |        |        |        |        |        |      |      |      |      |      |      |                 |          |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|-----------------|----------|
| 2,8 | 2890,3 | 152,00 |        | 152,50 |        | 2,82 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | Variância       | 6,22E-05 |
| 2,8 | 2890,1 | 152,00 |        | 152,49 |        | 2,82 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | Erro tolerável  | 1,87E-04 |
| 2,8 | 2889,8 | 152,00 |        | 152,47 |        | 2,82 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | Média           |          |
| 2,8 | 2889,3 | 152,00 |        | 152,44 |        | 2,82 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | Ev              | 1,92E-02 |
| 2,8 | 2888,9 | 152,00 |        | 152,42 |        | 2,82 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 2,8 | 2888,4 | 152,00 |        | 152,40 |        | 2,82 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | Er              | 2,12E-03 |
| 2,8 | 2888,9 | 152,00 |        | 152,42 |        | 2,82 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | E%              | 2,12E-01 |
| 2,9 | 2997,4 | 158,00 | 157,00 | 158,10 | 157,11 | 2,93 | 2,93 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio médio    | 4,44E-16 |
| 2,9 | 2997,4 | 158,00 |        | 158,10 |        | 2,93 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio q. médio | 4,44E-16 |
| 2,9 | 2997,5 | 158,00 |        | 158,11 |        | 2,93 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio padrão   | 4,68E-16 |
| 2,9 | 2996,9 | 158,00 |        | 158,08 |        | 2,93 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Variância       | 2,19E-31 |
| 2,9 | 2996,5 | 158,00 |        | 158,06 |        | 2,93 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Erro tolerável  | 6,57E-31 |
| 2,9 | 2996   | 158,00 |        | 158,03 |        | 2,93 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Média           |          |
| 2,9 | 2995,9 | 158,00 |        | 158,03 |        | 2,93 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Ev              | 2,77E-02 |
| 2,9 | 2995,5 | 158,00 |        | 158,00 |        | 2,93 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Erro abs. Ap.   | 4,44E-16 |
| 2,9 | 2995,4 | 158,00 |        | 158,00 |        | 2,93 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Er              | 1,52E-16 |
| 2,9 | 2995,7 | 158,00 |        | 158,01 |        | 2,93 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | E%              | 1,52E-14 |
| 3   | 3100,3 | 164,00 | 162,42 | 163,49 | 162,53 | 3,04 | 3,03 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,43 | Desvio médio    | 7,85E-03 |
| 3   | 3099,9 | 164,00 |        | 163,47 |        | 3,04 |      | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,43 | Desvio q. médio | 8,57E-03 |
| 3   | 3099,9 | 164,00 |        | 163,47 |        | 3,04 |      | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,43 | Desvio padrão   | 9,03E-03 |
| 3   | 3099,5 | 163,00 |        | 163,45 |        | 3,02 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | Variância       | 8,16E-05 |
| 3   | 3099,4 | 163,00 |        | 163,44 |        | 3,02 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | Erro tolerável  | 2,45E-04 |
| 3   | 3099   | 163,00 |        | 163,42 |        | 3,02 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | Média           |          |
| 3   | 3098,2 | 163,00 |        | 163,38 |        | 3,02 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | Ev              | 2,68E-02 |
| 3   | 3098,5 | 163,00 |        | 163,40 |        | 3,02 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | Erro abs. Ap.   | 7,85E-03 |
| 3   | 3098,5 | 163,00 |        | 163,40 |        | 3,02 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | Er              | 2,59E-03 |
| 3   | 3098,4 | 163,00 |        | 163,39 |        | 3,02 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | E%              | 2,59E-01 |

Tabela 4.5 : Avaliação do estudo do erro da medida de resistência do solo à penetração de raízes, de 3 kg a 4kg.

| For-ça kg | Tensão MVdc | A/d lido | Média A/D lido | A/D esperado | Média A/D esperado | Con-versão Para Kg | Valor prov. da grande-za | Ev   | Erro abs. Ap. | Er   | E%   | Unidade – kg    |          |
|-----------|-------------|----------|----------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------------|------|---------------|------|------|-----------------|----------|
| 3         | 3100,3      | 164,00   | 163,30         | 163,49       | 163,43             | 3,04               | 3,03                     | 0,04 | 0,01          | 0,00 | 0,43 | Desvio médio    | 7,85E-03 |
| 3         | 3099,9      | 164,00   |                | 163,47       |                    | 3,04               |                          | 0,04 | 0,01          | 0,00 | 0,43 | Desvio q. médio | 8,57E-03 |
| 3         | 3099,9      | 164,00   |                | 163,47       |                    | 3,04               |                          | 0,04 | 0,01          | 0,00 | 0,43 | Desvio padrão   | 9,03E-03 |
| 3         | 3099,5      | 163,00   |                | 163,45       |                    | 3,02               |                          | 0,02 | 0,01          | 0,00 | 0,19 | Variância       | 8,16E-05 |
| 3         | 3099,4      | 163,00   |                | 163,44       |                    | 3,02               |                          | 0,02 | 0,01          | 0,00 | 0,19 | Erro tolerável  | 2,45E-04 |
| 3         | 3099        | 163,00   |                | 163,42       |                    | 3,02               |                          | 0,02 | 0,01          | 0,00 | 0,19 | Média           |          |
| 3         | 3098,2      | 163,00   |                | 163,38       |                    | 3,02               |                          | 0,02 | 0,01          | 0,00 | 0,19 | Ev              | 2,68E-02 |
| 3         | 3098,5      | 163,00   |                | 163,40       |                    | 3,02               |                          | 0,02 | 0,01          | 0,00 | 0,19 | Erro abs. Ap.   | 7,85E-03 |
| 3         | 3098,5      | 163,00   |                | 163,40       |                    | 3,02               |                          | 0,02 | 0,01          | 0,00 | 0,19 | Er              | 2,59E-03 |
| 3         | 3098,4      | 163,00   |                | 163,39       |                    | 3,02               |                          | 0,02 | 0,01          | 0,00 | 0,19 | E%              | 2,59E-01 |
| 3,1       | 3203,1      | 169,00   | 167,75         | 168,87       | 167,91             | 3,13               | 3,13                     | 0,03 | 0,01          | 0,00 | 0,18 | Desvio médio    | 7,85E-03 |
| 3,1       | 3202,7      | 169,00   |                | 168,85       |                    | 3,13               |                          | 0,03 | 0,01          | 0,00 | 0,18 | Desvio q. médio | 8,57E-03 |
| 3,1       | 3202,2      | 169,00   |                | 168,83       |                    | 3,13               |                          | 0,03 | 0,01          | 0,00 | 0,18 | Desvio padrão   | 9,03E-03 |
| 3,1       | 3201,8      | 169,00   |                | 168,81       |                    | 3,13               |                          | 0,03 | 0,01          | 0,00 | 0,18 | Variância       | 8,16E-05 |
| 3,1       | 3201,8      | 169,00   |                | 168,81       |                    | 3,13               |                          | 0,03 | 0,01          | 0,00 | 0,18 | Erro tolerável  | 2,45E-04 |
| 3,1       | 3201,6      | 169,00   |                | 168,80       |                    | 3,13               |                          | 0,03 | 0,01          | 0,00 | 0,18 | Média           |          |
| 3,1       | 3201,5      | 169,00   |                | 168,79       |                    | 3,13               |                          | 0,03 | 0,01          | 0,00 | 0,18 | Ev              | 2,78E-02 |
| 3,1       | 3201,3      | 168,00   |                | 168,78       |                    | 3,11               |                          | 0,01 | 0,01          | 0,00 | 0,42 | Erro abs. Ap.   | 7,85E-03 |
| 3,1       | 3201,4      | 168,00   |                | 168,79       |                    | 3,11               |                          | 0,01 | 0,01          | 0,00 | 0,42 | Er              | 2,51E-03 |
| 3,1       | 3201,2      | 168,00   |                | 168,77       |                    | 3,11               |                          | 0,01 | 0,01          | 0,00 | 0,42 | E%              | 2,51E-01 |
| 3,2       | 3306,6      | 175,00   | 173,17         | 174,29       | 173,34             | 3,25               | 3,23                     | 0,05 | 0,01          | 0,00 | 0,46 | Desvio médio    | 5,98E-03 |
| 3,2       | 3306,4      | 175,00   |                | 174,28       |                    | 3,25               |                          | 0,05 | 0,01          | 0,00 | 0,46 | Desvio q. médio | 7,48E-03 |
| 3,2       | 3306,3      | 174,00   |                | 174,28       |                    | 3,23               |                          | 0,03 | 0,00          | 0,00 | 0,12 | Desvio padrão   | 7,88E-03 |
| 3,2       | 3306,2      | 174,00   |                | 174,27       |                    | 3,23               |                          | 0,03 | 0,00          | 0,00 | 0,12 | Variância       | 6,22E-05 |
| 3,2       | 3306,1      | 174,00   |                | 174,27       |                    | 3,23               |                          | 0,03 | 0,00          | 0,00 | 0,12 | Erro tolerável  | 1,87E-04 |
| 3,2       | 3305,9      | 174,00   |                | 174,26       |                    | 3,23               |                          | 0,03 | 0,00          | 0,00 | 0,12 | Média           |          |
| 3,2       | 3305,4      | 174,00   |                | 174,23       |                    | 3,23               |                          | 0,03 | 0,00          | 0,00 | 0,12 | Ev              | 3,06E-02 |
| 3,2       | 3305,3      | 174,00   |                | 174,23       |                    | 3,23               |                          | 0,03 | 0,00          | 0,00 | 0,12 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 3,2       | 3305,2      | 174,00   |                | 174,22       |                    | 3,23               |                          | 0,03 | 0,00          | 0,00 | 0,12 | Er              | 1,85E-03 |
| 3,2       | 3305,1      | 174,00   |                | 174,22       |                    | 3,23               |                          | 0,03 | 0,00          | 0,00 | 0,12 | E%              | 1,85E-01 |
| 3,3       | 3403,2      | 180,00   | 178,33         | 179,35       | 178,46             | 3,34               | 3,32                     | 0,04 | 0,01          | 0,00 | 0,45 | Desvio médio    | 5,98E-03 |
| 3,3       | 3403,1      | 179,00   |                | 179,35       |                    | 3,32               |                          | 0,02 | 0,00          | 0,00 | 0,11 | Desvio q. médio | 7,48E-03 |
| 3,3       | 3401,9      | 180,00   |                | 179,28       |                    | 3,34               |                          | 0,04 | 0,01          | 0,00 | 0,45 | Desvio padrão   | 7,88E-03 |
| 3,3       | 3401,8      | 179,00   |                | 179,28       |                    | 3,32               |                          | 0,02 | 0,00          | 0,00 | 0,11 | Variância       | 6,22E-05 |
| 3,3       | 3401,9      | 179,00   |                | 179,28       |                    | 3,32               |                          | 0,02 | 0,00          | 0,00 | 0,11 | Erro tolerável  | 1,87E-04 |
| 3,3       | 3402,1      | 179,00   |                | 179,29       |                    | 3,32               |                          | 0,02 | 0,00          | 0,00 | 0,11 | Média           |          |
| 3,3       | 3402,2      | 179,00   |                | 179,30       |                    | 3,32               |                          | 0,02 | 0,00          | 0,00 | 0,11 | Ev              | 2,41E-02 |
| 3,3       | 3402,1      | 179,00   |                | 179,29       |                    | 3,32               |                          | 0,02 | 0,00          | 0,00 | 0,11 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 3,3       | 3402,3      | 179,00   |                | 179,30       |                    | 3,32               |                          | 0,02 | 0,00          | 0,00 | 0,11 | Er              | 1,80E-03 |
| 3,3       | 3402,1      | 179,00   |                | 179,29       |                    | 3,32               |                          | 0,02 | 0,00          | 0,00 | 0,11 | E%              | 1,80E-01 |
| 3,4       | 3511,6      | 185,00   | 183,92         | 185,03       | 184,06             | 3,43               | 3,43                     | 0,03 | 0,00          | 0,00 | 0,05 | Desvio médio    | 3,37E-03 |

|     |        |        |        |        |        |      |      |      |      |      |      |                 |          |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|-----------------|----------|
| 3,4 | 3511,4 | 185,00 |        | 185,02 |        | 3,43 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Desvio q. médio | 5,61E-03 |
| 3,4 | 3511,3 | 185,00 |        | 185,01 |        | 3,43 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Desvio padrão   | 5,91E-03 |
| 3,4 | 3511,1 | 185,00 |        | 185,00 |        | 3,43 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Variância       | 3,50E-05 |
| 3,4 | 3511,2 | 185,00 |        | 185,01 |        | 3,43 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Erro tolerável  | 1,05E-04 |
| 3,4 | 3511,1 | 185,00 |        | 185,00 |        | 3,43 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Média           |          |
| 3,4 | 3511   | 185,00 |        | 185,00 |        | 3,43 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Ev              | 3,07E-02 |
| 3,4 | 3510,9 | 184,00 |        | 184,99 |        | 3,41 |      | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,49 | Erro abs. Ap.   | 3,37E-03 |
| 3,4 | 3511,2 | 185,00 |        | 185,01 |        | 3,43 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Er              | 9,81E-04 |
| 3,4 | 3511,2 | 185,00 |        | 185,01 |        | 3,43 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | E%              | 9,81E-02 |
| 3,5 | 3599,4 | 189,00 | 188,67 | 189,62 | 188,89 | 3,51 | 3,51 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,21 | Desvio médio    | 8,98E-03 |
| 3,5 | 3599,8 | 189,00 |        | 189,65 |        | 3,51 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,21 | Desvio q. médio | 9,16E-03 |
| 3,5 | 3600,1 | 189,00 |        | 189,66 |        | 3,51 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,21 | Desvio padrão   | 9,66E-03 |
| 3,5 | 3600,1 | 189,00 |        | 189,66 |        | 3,51 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,21 | Variância       | 9,33E-05 |
| 3,5 | 3600,3 | 189,00 |        | 189,67 |        | 3,51 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,21 | Erro tolerável  | 2,80E-04 |
| 3,5 | 3600,2 | 189,00 |        | 189,67 |        | 3,51 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,21 | Média           |          |
| 3,5 | 3600,5 | 190,00 |        | 189,68 |        | 3,53 |      | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,32 | Ev              | 1,49E-02 |
| 3,5 | 3600,5 | 190,00 |        | 189,68 |        | 3,53 |      | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,32 | Erro abs. Ap.   | 8,98E-03 |
| 3,5 | 3600,1 | 190,00 |        | 189,66 |        | 3,53 |      | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,32 | Er              | 2,55E-03 |
| 3,5 | 3600,3 | 190,00 |        | 189,67 |        | 3,53 |      | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,32 | E%              | 2,55E-01 |
| 3,6 | 3710,1 | 195,00 | 194,08 | 195,42 | 194,45 | 3,62 | 3,62 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Desvio médio    | 3,37E-03 |
| 3,6 | 3710,1 | 195,00 |        | 195,42 |        | 3,62 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Desvio q. médio | 5,61E-03 |
| 3,6 | 3710,2 | 195,00 |        | 195,43 |        | 3,62 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Desvio padrão   | 5,91E-03 |
| 3,6 | 3710,2 | 195,00 |        | 195,43 |        | 3,62 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Variância       | 3,50E-05 |
| 3,6 | 3709,8 | 195,00 |        | 195,41 |        | 3,62 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Erro tolerável  | 1,05E-04 |
| 3,6 | 3709,8 | 195,00 |        | 195,41 |        | 3,62 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Média           |          |
| 3,6 | 3710   | 195,00 |        | 195,42 |        | 3,62 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Ev              | 1,77E-02 |
| 3,6 | 3709,7 | 195,00 |        | 195,40 |        | 3,62 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Erro abs. Ap.   | 3,37E-03 |
| 3,6 | 3709,1 | 194,00 |        | 195,37 |        | 3,60 |      | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,47 | Er              | 9,30E-04 |
| 3,6 | 3709,3 | 195,00 |        | 195,38 |        | 3,62 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | E%              | 9,30E-02 |
| 3,7 | 3807,9 | 200,00 | 198,92 | 200,54 | 199,65 | 3,71 | 3,71 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | Desvio médio    | 5,98E-03 |
| 3,7 | 3807,8 | 200,00 |        | 200,54 |        | 3,71 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | Desvio q. médio | 7,48E-03 |
| 3,7 | 3807,3 | 200,00 |        | 200,51 |        | 3,71 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | Desvio padrão   | 7,88E-03 |
| 3,7 | 3807,4 | 200,00 |        | 200,52 |        | 3,71 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | Variância       | 6,22E-05 |
| 3,7 | 3807,2 | 200,00 |        | 200,50 |        | 3,71 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | Erro tolerável  | 1,87E-04 |
| 3,7 | 3807,5 | 200,00 |        | 200,52 |        | 3,71 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | Média           |          |
| 3,7 | 3807   | 200,00 |        | 200,49 |        | 3,71 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | Ev              | 1,16E-02 |
| 3,7 | 3807,3 | 200,00 |        | 200,51 |        | 3,71 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 3,7 | 3806,9 | 199,00 |        | 200,49 |        | 3,69 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | Er              | 1,61E-03 |
| 3,7 | 3806,8 | 199,00 |        | 200,48 |        | 3,69 |      | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | E%              | 1,61E-01 |
| 3,8 | 3904,6 | 205,00 | 203,92 | 205,60 | 204,77 | 3,81 | 3,80 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Desvio médio    | 3,37E-03 |
| 3,8 | 3904,6 | 205,00 |        | 205,60 |        | 3,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Desvio q. médio | 5,61E-03 |
| 3,8 | 3904,8 | 205,00 |        | 205,62 |        | 3,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Desvio padrão   | 5,91E-03 |
| 3,8 | 3904,7 | 205,00 |        | 205,61 |        | 3,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Variância       | 3,50E-05 |
| 3,8 | 3904,5 | 205,00 |        | 205,60 |        | 3,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Erro tolerável  | 1,05E-04 |
| 3,8 | 3904,8 | 205,00 |        | 205,62 |        | 3,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Média           |          |
| 3,8 | 3905,3 | 205,00 |        | 205,64 |        | 3,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Ev              | 7,15E-03 |
| 3,8 | 3905,6 | 205,00 |        | 205,66 |        | 3,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Erro abs. Ap.   | 3,37E-03 |
| 3,8 | 3905,7 | 205,00 |        | 205,66 |        | 3,81 |      | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | Er              | 8,85E-04 |
| 3,8 | 3904,9 | 204,00 |        | 205,62 |        | 3,79 |      | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,44 | E%              | 8,85E-02 |
| 3,9 | 4009,9 | 212,00 | 210,25 | 211,12 | 210,19 | 3,94 | 3,93 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,29 | Desvio médio    | 8,98E-03 |
| 3,9 | 4010   | 212,00 |        | 211,12 |        | 3,94 |      | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,29 | Desvio q. médio | 9,16E-03 |
| 3,9 | 4009,8 | 212,00 |        | 211,11 |        | 3,94 |      | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,29 | Desvio padrão   | 9,66E-03 |
| 3,9 | 4009,8 | 212,00 |        | 211,11 |        | 3,94 |      | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,29 | Variância       | 9,33E-05 |
| 3,9 | 4009,5 | 211,00 |        | 211,10 |        | 3,92 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | Erro tolerável  | 2,80E-04 |
| 3,9 | 4009,4 | 211,00 |        | 211,09 |        | 3,92 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | Média           |          |
| 3,9 | 4009,5 | 211,00 |        | 211,10 |        | 3,92 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | Ev              | 2,63E-02 |
| 3,9 | 4009,3 | 211,00 |        | 211,09 |        | 3,92 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | Erro abs. Ap.   | 8,98E-03 |
| 3,9 | 4009,7 | 211,00 |        | 211,11 |        | 3,92 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | Er              | 2,29E-03 |
| 3,9 | 4009,3 | 211,00 |        | 211,09 |        | 3,92 |      | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,19 | E%              | 2,29E-01 |
| 4   | 4119   | 217,00 | 216,17 | 216,83 | 215,88 | 4,03 | 4,03 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Desvio médio    | 5,98E-03 |
| 4   | 4119,2 | 217,00 |        | 216,84 |        | 4,03 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Desvio q. médio | 7,48E-03 |
| 4   | 4119,3 | 217,00 |        | 216,85 |        | 4,03 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Desvio padrão   | 7,88E-03 |
| 4   | 4119,4 | 217,00 |        | 216,85 |        | 4,03 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Variância       | 6,22E-05 |
| 4   | 4119,5 | 218,00 |        | 216,86 |        | 4,05 |      | 0,05 | 0,01 | 0,00 | 0,37 | Erro tolerável  | 1,87E-04 |
| 4   | 4119   | 217,00 |        | 216,83 |        | 4,03 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Média           |          |
| 4   | 4119,4 | 218,00 |        | 216,85 |        | 4,05 |      | 0,05 | 0,01 | 0,00 | 0,37 | Ev              | 3,47E-02 |
| 4   | 4119,4 | 217,00 |        | 216,85 |        | 4,03 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 4   | 4119,1 | 217,00 |        | 216,84 |        | 4,03 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | Er              | 1,48E-03 |
| 4   | 4118,7 | 217,00 |        | 216,82 |        | 4,03 |      | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | E%              | 1,48E-01 |

Tabela 4.6 : Avaliação do estudo do erro da medida de resistência do solo à penetração de raízes, de 4 kg a 5kg.



|     |        |        |        |        |        |      |      |      |      |      |      |                 |          |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|-----------------|----------|
| 4,7 | 4830,1 | 253,00 |        | 254,06 |        | 4,70 |      | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,32 | Ev              | 1,92E-02 |
| 4,7 | 4831,5 | 254,00 |        | 254,14 |        | 4,72 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | Erro abs. Ap.   | 5,98E-03 |
| 4,7 | 4829,9 | 253,00 |        | 254,05 |        | 4,70 |      | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,32 | Er              | 1,27E-03 |
| 4,7 | 4830,2 | 254,00 |        | 254,07 |        | 4,72 |      | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | E%              | 1,27E-01 |
| 4,8 | 4936,1 | 255,00 | 254,75 | 259,61 | 258,64 | 4,74 | 4,74 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio médio    | 8,88E-16 |
| 4,8 | 4935,8 | 255,00 |        | 259,60 |        | 4,74 |      | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio q. médio | 8,88E-16 |
| 4,8 | 4935,5 | 255,00 |        | 259,58 |        | 4,74 |      | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio padrão   | 9,36E-16 |
| 4,8 | 4935,4 | 255,00 |        | 259,58 |        | 4,74 |      | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Variância       | 8,77E-31 |
| 4,8 | 4935,1 | 255,00 |        | 259,56 |        | 4,74 |      | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Erro tolerável  | 2,63E-30 |
| 4,8 | 4934,9 | 255,00 |        | 259,55 |        | 4,74 |      | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Média           |          |
| 4,8 | 4934,8 | 255,00 |        | 259,55 |        | 4,74 |      | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Ev              | 5,84E-02 |
| 4,8 | 4934,9 | 255,00 |        | 259,55 |        | 4,74 |      | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Erro abs. Ap.   | 8,88E-16 |
| 4,8 | 4933,9 | 255,00 |        | 259,50 |        | 4,74 |      | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Er              | 1,87E-16 |
| 4,8 | 4933,8 | 255,00 |        | 259,49 |        | 4,74 |      | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | E%              | 1,87E-14 |
| 4,9 | 5037,1 | 255,00 | 255,00 | 264,90 | 263,98 | 4,74 | 4,74 | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio médio    | 8,88E-16 |
| 4,9 | 5037,1 | 255,00 |        | 264,90 |        | 4,74 |      | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio q. médio | 8,88E-16 |
| 4,9 | 5036,5 | 255,00 |        | 264,87 |        | 4,74 |      | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio padrão   | 9,36E-16 |
| 4,9 | 5036,6 | 255,00 |        | 264,88 |        | 4,74 |      | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Variância       | 8,77E-31 |
| 4,9 | 5036,5 | 255,00 |        | 264,87 |        | 4,74 |      | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Erro tolerável  | 2,63E-30 |
| 4,9 | 5037,1 | 255,00 |        | 264,90 |        | 4,74 |      | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Média           |          |
| 4,9 | 5036,4 | 255,00 |        | 264,87 |        | 4,74 |      | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Ev              | 1,58E-01 |
| 4,9 | 5036,4 | 255,00 |        | 264,87 |        | 4,74 |      | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Erro abs. Ap.   | 8,88E-16 |
| 4,9 | 5036,2 | 255,00 |        | 264,86 |        | 4,74 |      | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Er              | 1,87E-16 |
| 4,9 | 5036,1 | 255,00 |        | 264,85 |        | 4,74 |      | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | E%              | 1,87E-14 |
| 5   | 5131,9 | 255,00 | 255,00 | 269,87 | 269,04 | 4,74 | 4,74 | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio médio    | 8,88E-16 |
| 5   | 5133,2 | 255,00 |        | 269,93 |        | 4,74 |      | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio q. médio | 8,88E-16 |
| 5   | 5132,7 | 255,00 |        | 269,91 |        | 4,74 |      | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Desvio padrão   | 9,36E-16 |
| 5   | 5132,2 | 255,00 |        | 269,88 |        | 4,74 |      | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Variância       | 8,77E-31 |
| 5   | 5132,4 | 255,00 |        | 269,89 |        | 4,74 |      | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Erro tolerável  | 2,63E-30 |
| 5   | 5132,3 | 255,00 |        | 269,89 |        | 4,74 |      | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Média           |          |
| 5   | 5132,1 | 255,00 |        | 269,88 |        | 4,74 |      | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Ev              | 2,58E-01 |
| 5   | 5131,8 | 255,00 |        | 269,86 |        | 4,74 |      | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Erro abs. Ap.   | 8,88E-16 |
| 5   | 5131,7 | 255,00 |        | 269,86 |        | 4,74 |      | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Er              | 1,87E-16 |
| 5   | 5131,8 | 255,00 |        | 269,86 |        | 4,74 |      | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | E%              | 1,87E-14 |

Os erros percentuais observados nas tabelas 4.2 a 4.6, tomados pelas médias dos valores apresentados foram respectivamente de 28,9 % para a faixa entre 0,00 kg a 0,10 kg, 2,2 % para a faixa de 0,20 kg a 0,50 kg, abaixo de 1% para a faixa de 0,60 kg a 5,00 kg. Observou-se que para valores de conversão iguais ou acima de 0,16 kg o erro percentual médio ficou abaixo de 5%.

#### 4.4 Ensaio de laboratório com amostra de solo coletado em cilindro amostrador

Após a avaliação dos erros de medidas foram feitas leituras da resistência do solo à penetração de raízes em uma amostra de solo coletada com cilindro amostrador. O experimento foi feito com uma amostra de solo não deformada, coletada com o auxílio de um cilindro amostrador de dimensões  $72 \cdot 10^{-3}$  m de diâmetro interno e altura de  $54 \cdot 10^{-3}$  m, contendo uma massa de solo de 403,73 g, já descontado a massa do cilindro. A amostra de solo foi extraída de uma área do campo experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, conforme ilustrado na figura 4.3 como *área de coleta de amostra com cilindro amostrador*, tendo sua posição geofísica de Latitude sul igual a  $21^{\circ}58'24,8916''$ ; longitude oeste igual a  $47^{\circ}50'55,194''$  (TRIMBLE, 2000).



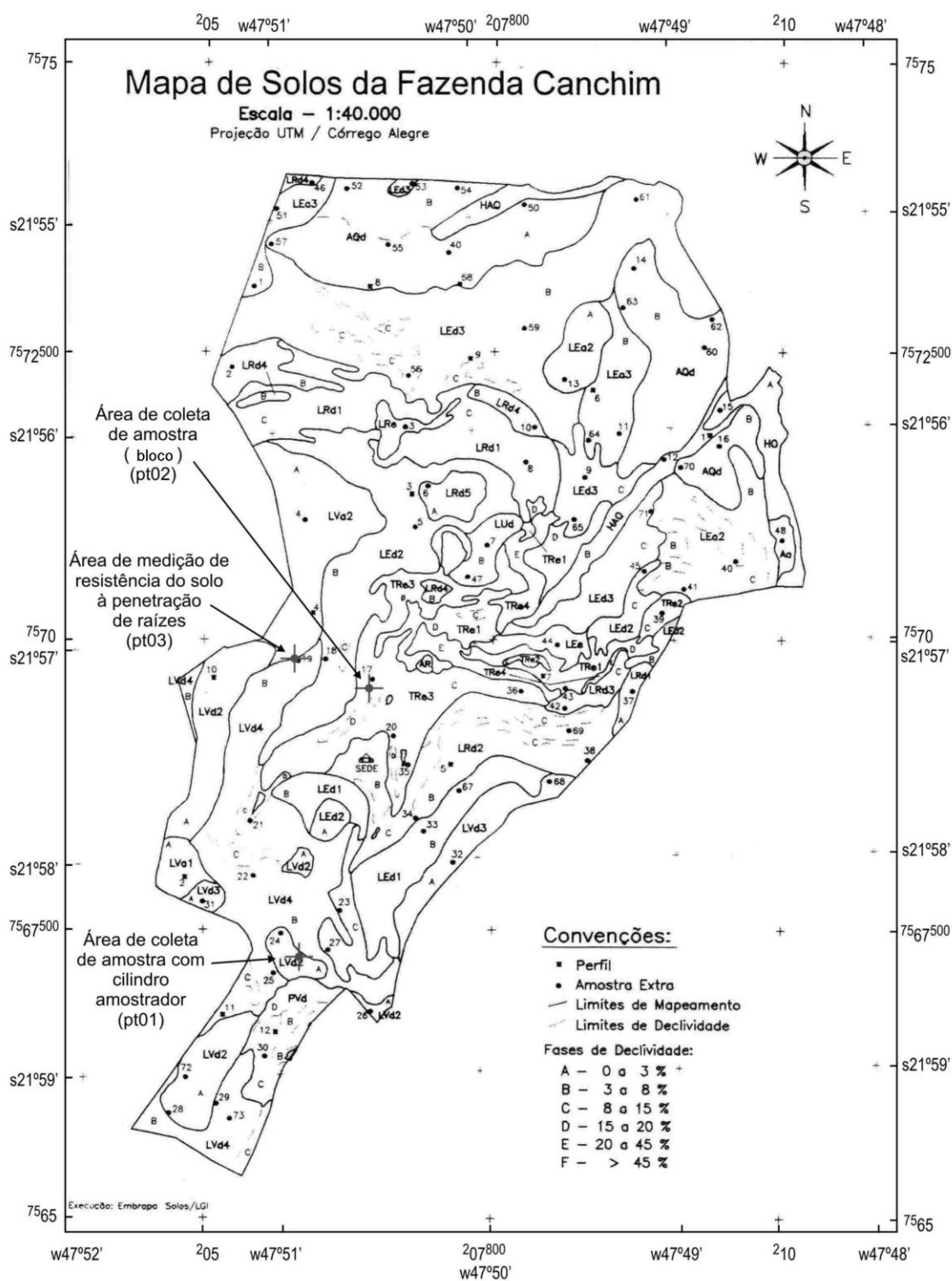


Figura 4.3 : Mapa de solos da Embrapa Pecuária Sudeste, com as áreas de coleta de amostras e de medidas (CALDERANO FILHO *et al.*, 1998).

A amostra coletada para este ensaio, pertence a uma área de pastagem, cujo solo é denominado de *Latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVd2)* que tem uma característica de textura argilosa, fase cerradão tropical

subcaducifólio, solo profundo, predominância de fração de areia grossa, em uma parte, no restante, dominância de fração argilosa.

A unidade apresenta perfis com baixa saturação por bases e baixa saturação por alumínio, constituindo solos distróficos, com saturação por alumínio elevada (CALDERANO FILHO *et al.*, 1998).

Para a amostra de solo as seguintes características analíticas são encontradas : Saturação por base varia de muito baixa a média (8 a 31%), com menores valores em profundidade; a saturação por alumínio é baixa nos horizontes subsuperficiais; capacidade de troca de cátions tem valor baixo, de 1,5 a 7,1  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de solo, com valores menores em profundidade; o valor de bases trocáveis é baixo variando de 0,2 a 1,7  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de solo; o carbono orgânico, diminui com a profundidade, apresentando valores baixos variando de 2,9 a 14,2  $\text{g kg}^{-1}$  de solo; os teores de alumínio trocável, em algumas amostras são prejudiciais às culturas no horizonte superficial; o fósforo disponível é baixo ao longo do perfil, apresentando valores menores que 1  $\text{mg g}^{-1}$  de solo; este solo é fortemente a moderadamente ácido, apresentando valores entre 4,8 a 5,5 de pH; os teores de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) são baixos variando de 76 a 93  $\text{g kg}^{-1}$ .

Assim, de posse da amostra de solo, fez-se a medida em laboratório, ajustando o cilindro amostrador abaixo da microsonda, conforme ilustrado na figura 4.4.

O sistema de medida de resistência à penetração de raízes foi ajustado para medida do perfil Z em um único sítio, com coordenadas (x,y) fixas, através do botão de comando <Medir Ponto>, e o resultado desta medida pode ser observado diretamente da tela principal de execução do programa de controle, conforme mostrado na figura 4.5.

Também na mesma tela da interface, é possível a visualização dos dados em forma de gráfico, no painel *Leituras* na pasta *Gráfico*, conforme ilustrado na figura 4.6.



Figura 4.4 : Ensaio com uma amostra de solo (LVd2), coletado com cilindro amostrador.

**Micropen PC - Embrapa Instrumentação**

Micropenetrômetro Base de Dados Relatório Sair

**Medir Ponto**

Nova Posição: X (mm.) Y (mm.) Z (dmm.)  
 Posição Atual: X (mm.) Y (mm.) Z (dmm.)

0 0 0

Posicionar Medir Ponto

**Medir Região**

Posição Inicial: X (mm.) Y (mm.)  
 Posição Final: X (mm.) Y (mm.)  
 Incremento: X (mm.) Y (mm.)  
 Numero de Medidas: Feitas Total

0 0 100 100 10 10

Medir Região

**Dados**

Medida: Código Ponta da sonda Ponta da sonda  
 1 1 1  
 1: cônica com rebaiço  
 2: cônica sem rebaiço  
 3: sem ponta

Local: Embrapa Instrumentação Agropecuária

Data e Hora: 23/11/02 21:31:17

Observação: Amostra de solo da Embrapa Pecuária Sudeste - área de

Altitude: 903,75 Latitude: -21,973581 Longitude: -47,848665

**Leituras**

Tabela Gráfico Gráfico1

| x (mm.) | y (mm.) | z (mm.) | força (kgf.) | Força Calc. (Kgf/mm2) |
|---------|---------|---------|--------------|-----------------------|
| 420     | 120     | 8       | 2,46         | 1,22                  |
| 420     | 120     | 9       | 2,83         | 1,41                  |
| 420     | 120     | 10      | 3,02         | 1,5                   |
| 420     | 120     | 11      | 3,21         | 1,6                   |
| 420     | 120     | 12      | 3,97         | 1,97                  |
| 420     | 120     | 13      | 4,16         | 2,07                  |
| 420     | 120     | 14      | 3,4          | 1,69                  |

Mensagem

Figura 4.5 : Resultado de uma coleta de dados para perfil de um único sítio, ilustrando os dados no painel *Leituras* em *Tabela*.

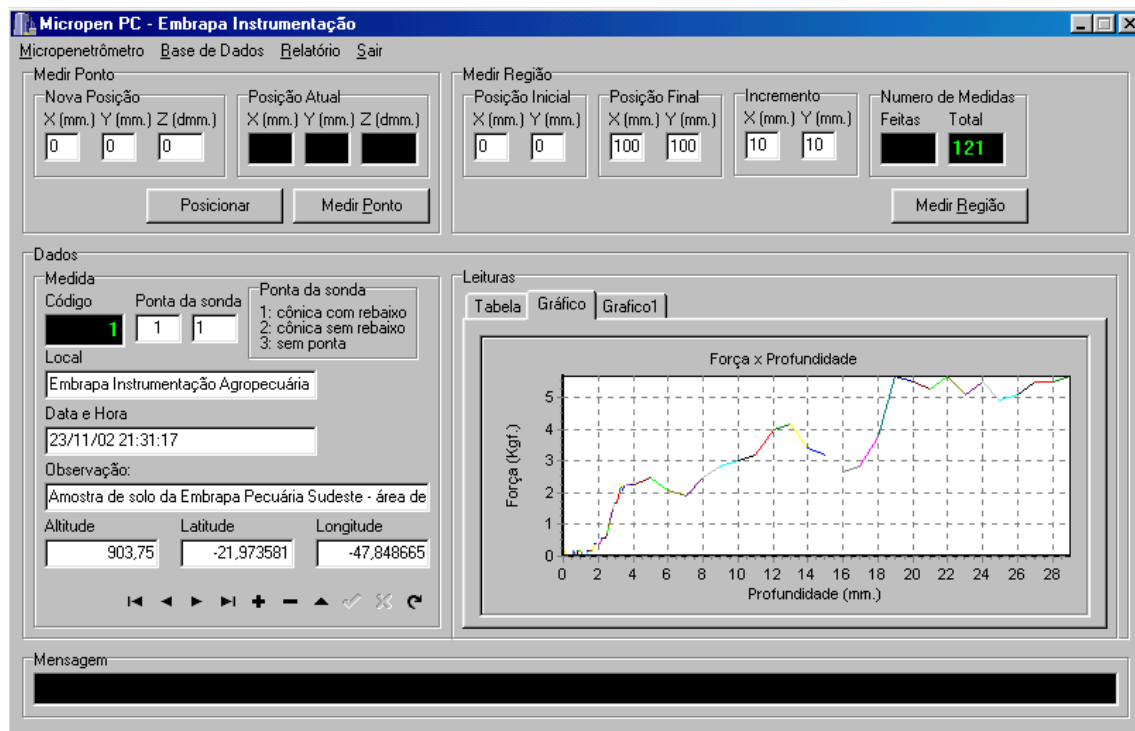


Figura 4.6 : Resultado de uma coleta de dados para o perfil de um único sítio, ilustrando os dados no painel *Leituras* em *Gráfico*.

Na tabela 4.7 é mostrado o conjunto de dados referente ao ensaio, da maneira como ele é registrado no banco de dados do sistema, onde é possível se ver de acordo com as colunas o número da leitura, o código de medida, as coordenadas de localização da medida (X e Y), a profundidade da medida (Z) e as correspondentes forças de resistência do solo à penetração de raízes.

Tabela 4.7 : Valores coletados em ensaio de uma amostra de solo (LVd2) (Embrapa Pecuária Sudeste, latitude s21°58'24,8916", longitude o47°50'55,194", altitude 903,75 m) pelo sistema de medida de resistência do solo à penetração raízes. X e Y são coordenadas do ponto de coleta e Z é a profundidade da microsonda no perfil de solo.

| Leituras | Código  |     | Z   | Força |      |       |
|----------|---------|-----|-----|-------|------|-------|
|          | Medidas | X   |     | Y     | Kgf  |       |
| 1        | 1       | 420 | 120 | 0     | 0    |       |
| 2        | 1       | 420 | 120 | 0,1   | 0,19 | 83,76 |
| 3        | 1       | 420 | 120 | 0,2   | 0,19 | 20,94 |
| 4        | 1       | 420 | 120 | 0,3   | 0,19 | 9,31  |
| 5        | 1       | 420 | 120 | 0,4   | 0,19 | 5,24  |
| 6        | 1       | 420 | 120 | 0,5   | 0,38 | 6,7   |
| 7        | 1       | 420 | 120 | 0,6   | 0,38 | 4,65  |
| 8        | 1       | 420 | 120 | 0,7   | 0,38 | 3,42  |
| 9        | 1       | 420 | 120 | 0,8   | 0,57 | 3,93  |

---

|    |   |     |     |     |      |      |
|----|---|-----|-----|-----|------|------|
| 10 | 1 | 420 | 120 | 0,9 | 0,57 | 3,1  |
| 11 | 1 | 420 | 120 | 1   | 0,76 | 3,35 |
| 12 | 1 | 420 | 120 | 1,1 | 1,13 | 4,15 |
| 13 | 1 | 420 | 120 | 1,2 | 1,13 | 3,49 |
| 14 | 1 | 420 | 120 | 1,3 | 1,13 | 2,97 |
| 15 | 1 | 420 | 120 | 1,4 | 1,13 | 2,56 |
| 16 | 1 | 420 | 120 | 1,5 | 1,32 | 2,61 |
| 17 | 1 | 420 | 120 | 1,6 | 1,51 | 2,62 |
| 18 | 1 | 420 | 120 | 1,7 | 1,7  | 2,61 |
| 19 | 1 | 420 | 120 | 1,8 | 1,89 | 2,59 |
| 20 | 1 | 420 | 120 | 1,9 | 2,08 | 2,55 |
| 21 | 1 | 420 | 120 | 2   | 2,27 | 2,51 |
| 22 | 1 | 420 | 120 | 2,1 | 2,27 | 2,28 |
| 23 | 1 | 420 | 120 | 2,2 | 2,46 | 2,25 |
| 24 | 1 | 420 | 120 | 2,3 | 2,46 | 2,06 |
| 25 | 1 | 420 | 120 | 2,4 | 2,65 | 2,04 |
| 26 | 1 | 420 | 120 | 2,5 | 2,83 | 2,01 |
| 27 | 1 | 420 | 120 | 2,6 | 3,02 | 1,98 |
| 28 | 1 | 420 | 120 | 2,7 | 3,21 | 1,95 |
| 29 | 1 | 420 | 120 | 2,8 | 3,4  | 1,92 |
| 30 | 1 | 420 | 120 | 2,9 | 3,21 | 1,69 |
| 31 | 1 | 420 | 120 | 3   | 3,02 | 1,49 |
| 32 | 1 | 420 | 120 | 3,1 | 3,21 | 1,6  |
| 33 | 1 | 420 | 120 | 3,2 | 3,21 | 1,6  |
| 34 | 1 | 420 | 120 | 3,3 | 3,4  | 1,69 |
| 35 | 1 | 420 | 120 | 3,4 | 3,4  | 1,69 |
| 36 | 1 | 420 | 120 | 3,5 | 3,4  | 1,69 |
| 37 | 1 | 420 | 120 | 3,6 | 3,4  | 1,69 |
| 38 | 1 | 420 | 120 | 3,7 | 3,4  | 1,69 |
| 39 | 1 | 420 | 120 | 3,8 | 3,4  | 1,69 |
| 40 | 1 | 420 | 120 | 3,9 | 3,4  | 1,69 |
| 41 | 1 | 420 | 120 | 4   | 3,59 | 1,79 |
| 42 | 1 | 420 | 120 | 5   | 3,4  | 1,69 |
| 43 | 1 | 420 | 120 | 6   | 3,21 | 1,6  |
| 44 | 1 | 420 | 120 | 7   | 3,59 | 1,79 |
| 45 | 1 | 420 | 120 | 8   | 4,16 | 2,07 |
| 46 | 1 | 420 | 120 | 9   | 4,35 | 2,16 |
| 47 | 1 | 420 | 120 | 10  | 4,16 | 2,07 |
| 48 | 1 | 420 | 120 | 11  | 4,72 | 2,35 |
| 49 | 1 | 420 | 120 | 12  | 4,35 | 2,16 |
| 50 | 1 | 420 | 120 | 13  | 5,29 | 2,63 |
| 51 | 1 | 420 | 120 | 14  | 4,91 | 2,44 |
| 52 | 1 | 420 | 120 | 15  | 4,54 | 2,26 |
| 53 | 1 | 420 | 120 | 16  | 4,54 | 2,26 |
| 54 | 1 | 420 | 120 | 17  | 5,29 | 2,63 |
| 55 | 1 | 420 | 120 | 18  | 5,48 | 2,73 |
| 56 | 1 | 420 | 120 | 19  | 5,86 | 2,91 |
| 57 | 1 | 420 | 120 | 20  | 5,1  | 2,54 |
| 58 | 1 | 420 | 120 | 21  | 4,72 | 2,35 |
| 59 | 1 | 420 | 120 | 22  | 6,05 | 3,01 |
| 60 | 1 | 420 | 120 | 23  | 6,05 | 3,01 |
| 61 | 1 | 420 | 120 | 24  | 6,24 | 3,1  |
| 62 | 1 | 420 | 120 | 25  | 6,05 | 3,01 |
| 63 | 1 | 420 | 120 | 26  | 6,43 | 3,2  |
| 64 | 1 | 420 | 120 | 27  | 6,05 | 3,01 |
| 65 | 1 | 420 | 120 | 28  | 6,99 | 3,48 |

66                      1                      420                      120                      29                      6,99                      3,48

Também é possível a visualização do resultado da medida em forma de um relatório, em folha de papel A4, onde são fornecidos os dados e sua plotagem em gráfico, conforme ilustrado na figura 4.7.

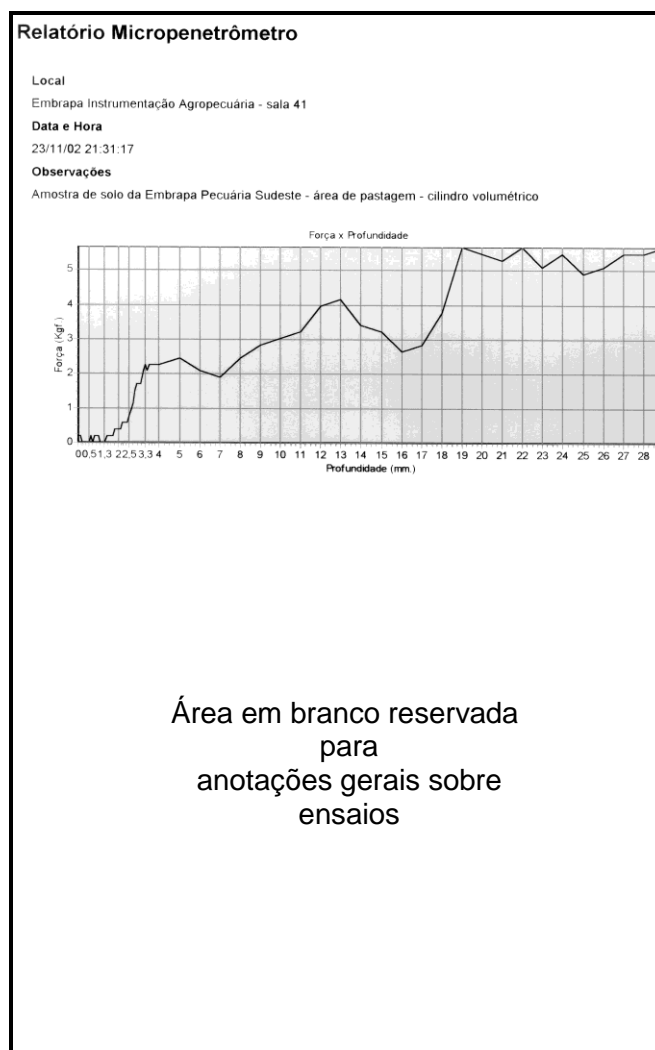


Figura 4.7 : Página de relatório fornecido pelo sistema de medida de resistência do solo à penetração de raízes (folha A4, escala 1:2,38).

#### 4.5 Ensaio de medida em laboratório de uma amostra de bloco de solo não deformado para geração de mapa RSPRxPosiçãoxProfundidade

Outra opção de operação viabilizada pelo sistema é a realização automática da coleta em vários sítios, através dos comandos localizados no painel *Medir Região*, como ilustrado na figura 4.5 e 4.6.

Assim, um segundo ensaio de laboratório foi realizado utilizando uma amostra de solo em forma de um bloco com dimensões de 0,27 m x 0,27 m x 0,13 m, como mostrado na figura 4.8.



Figura 4.8 : Amostra de solo não deformado em forma de bloco, para o ensaio de geração de mapa de RSPRxPosiçãoxProfundidade (amostra coletada na Embrapa Pecuária Sudeste, com coordenadas geofísicas : latitude s21°57'10,9591", longitude o47°50'35,8174").

A amostra de solo foi coletada de uma outra área do campo experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, a qual é localizada no mapa da figura 4.3, no centro à esquerda com as seguintes coordenadas geofísicas, latitude sul igual a 21°57'10,9591" e longitude oeste igual a 47°50'35,8174".

A região, onde se coletou a amostra de solo em forma de bloco, é usada para plantio de diferentes espécies. O solo dessa região, pela indicação do mapa, área de coleta de amostra (bloco), é uma associação de *Terra Roxa Estruturada Eutrófica Latossólica* com *Latossolo Roxo Distrófico (TRe3)*, com ambos apresentando textura argilosa, fase floresta tropical subcaducifólica. As

seguintes características analíticas são observadas nesta amostra : valor alto de saturação por bases, variando de 60 a 75% e aumentando com a profundidade; valores de saturação por alumínio baixos e com valores nulos na maioria dos perfis; capacidade de troca de cátions varia de baixo a alto entre 5,4 a 14,0  $\text{cm}_c \text{ kg}^{-1}$  de solo; os valores de carbono orgânico varia de baixo a médio, entre 7,1 a 22,6  $\text{g kg}^{-1}$ , com valores menores em profundidade; os teores de alumínio trocáveis são nulos; valores muito baixos de fósforo disponível variando de 1 a 3  $\text{mg kg}^{-1}$  de solo; solos moderadamente ácidos a neutros tendo valores entre 5,3 a 6,7 de pH; teores de óxido de ferro altos, variando de 201 a 286  $\text{g kg}^{-1}$ .

Para início da coleta de dados o sistema de medida de resistência do solo à penetração de raízes foi posicionado em um sítio de um extremo da amostra, com as coordenadas X= 300 mm e Y= 50 mm, com referência à origem das coordenadas do sistema. Assim foram configuradas as seguintes coordenadas que estão representadas na tabela 4.8.

Tabela 4.8 : Coordenadas para geração de mapas de RSPRxPosiçãoxProfundidade.

| Posição inicial |        | Posição final |        | Incremento |        |
|-----------------|--------|---------------|--------|------------|--------|
| X (mm)          | Y (mm) | X (mm)        | Y (mm) | X (mm)     | Y (mm) |
| 300             | 50     | 480           | 230    | 10         | 10     |

Estas coordenadas indicam que a microsonda se posicionará na coordenada inicial X=300 mm e Y=50mm, do ponto de origem do sistema, e partirá na direção do eixo Y, com incremento de 10 mm, até a coordenada Y=230 mm, depois, incrementa a coordenada X de 10 mm, ficando com coordenada X=310 mm, e novamente retornando na direção Y, até a coordenada Y=50 mm. Assim sucessivamente até atingir as coordenadas finais de X=480 mm e Y=230 mm, formando uma grade de 19 por 19 sítios de medida.

Cada ponto de medida na grade, corresponde a 66 leituras na profundidade, representada pela coordenada Z, sendo que como explicado anteriormente, das 66 medidas as 40 primeiras são feitas com incremento de 0,1 mm, dentro de um intervalo de 0,0 a 4,0 mm, e as 26 restantes com



incremento de 1,0 mm, dentro de um intervalo de 4,0 a 29,0 mm, com um total de profundidade de 30,0 mm.

Imediatamente ao término das leituras, os dados coletados foram enviados ao computador central que os converteu em dados de força e armazenou-os em um banco de dados com as respectivas informações referente a coleta. Imediatamente após, na tela principal, foram apresentados os dados em forma de tabela e gráficos.

O ensaio com o bloco de solo gerou uma base de dados com dimensão de 23826 linhas por 6 colunas. Para ilustrar uma parte desta base, por exemplo, tomando-se os resultados obtidos no intervalo de (440,120); (450,120) e (460,120), são apresentados na tabela 4.9, onde pode-se verificar as variações de profundidade Z e os valores de resistência do solo à penetração de raízes.

Um exemplo da variação da resistência do solo à penetração de raízes com a profundidade pode ser observada no gráfico da figura 4.9, tomando como exemplo a coordenada X=440 e Y=120.

Tabela 4.9 : Variação do valor da força de penetração tomando como exemplo três coordenadas.

| Profundidade<br>Z (mm) | Força de penetração para as<br>Coordenadas dos pixels (X,Y) |         |         |
|------------------------|---|---------|---------|
|                        | 440x120   | 450x120 | 460x120 |
| 0                      | 0   | 0       | 0       |
| 0,1                    | 0,19  | 0       | 0       |
| 0,2                    | 0,19  | 0       | 0       |
| 0,3                    | 0   | 0       | 0       |
| 0,4                    | 0,57  | 0       | 0       |
| 0,5                    | 1,13  | 0       | 0       |
| 0,6                    | 0,57  | 0       | 0       |
| 0,7                    | 0,57  | 0       | 0       |
| 0,8                    | 0,57  | 0       | 0,19    |
| 0,9                    | 0,57  | 0       | 0,38    |
| 1                      | 1,32  | 0       | 0,94    |
| 1,1                    | 2,27  | 0       | 1,89    |
| 1,2                    | 2,83  | 0       | 2,46    |
| 1,3                    | 3,02  | 0       | 3,02    |
| 1,4                    | 3,4   | 0,19    | 3,59    |
| 1,5                    | 3,97  | 0,38    | 3,59    |
| 1,6                    | 4,16  | 0,76    | 3,78    |
| 1,7                    | 4,54  | 1,13    | 4,16    |
| 1,8                    | 4,91  | 1,51    | 4,35    |
| 1,9                    | 5,29  | 2,46    | 4,72    |
| 2                      | 5,86  | 3,59    | 4,72    |
| 2,1                    | 5,86  | 4,54    | 5,1     |
| 2,2                    | 6,61  | 6,05    | 6,05    |
| 2,3                    | 6,99  | 7,37    | 6,24    |
| 2,4                    | 6,43  | 8,13    | 6,99    |
| 2,5                    | 5,48  | 9,45    | 7,18    |

|     |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|
| 2,6 | 4,16  | 10,77 | 6,99  |
| 2,7 | 4,54  | 12,28 | 6,61  |
| 2,8 | 3,97  | 13,42 | 6,43  |
| 2,9 | 3,97  | 14,74 | 6,05  |
| 3   | 3,4   | 15,88 | 6,05  |
| 3,1 | 3,4   | 16,44 | 6,24  |
| 3,2 | 3,02  | 17,58 | 5,86  |
| 3,3 | 2,65  | 18,14 | 5,48  |
| 3,4 | 1,51  | 19,09 | 4,91  |
| 3,5 | 0,94  | 20,41 | 3,59  |
| 3,6 | 0     | 21,36 | 3,02  |
| 3,7 | 0     | 22,11 | 1,89  |
| 3,8 | 0     | 23,06 | 1,13  |
| 3,9 | 0     | 24,38 | 0,57  |
| 4   | 0     | 28,92 | 0     |
| 5   | 0     | 30,05 | 0     |
| 6   | 0     | 30,62 | 0     |
| 7   | 0,19  | 32,13 | 0     |
| 8   | 0     | 34,4  | 0     |
| 9   | 0     | 37,23 | 0     |
| 10  | 0     | 34,59 | 0     |
| 11  | 0,19  | 22,3  | 0     |
| 12  | 0,76  | 15,88 | 6,43  |
| 13  | 4,54  | 12,28 | 13,99 |
| 14  | 7,94  | 12,85 | 24,76 |
| 15  | 7,94  | 12,1  | 29,29 |
| 16  | 11,53 | 11,91 | 30,43 |
| 17  | 13,61 | 13,04 | 32,89 |
| 18  | 17,01 | 10,96 | 30,43 |
| 19  | 18,14 | 8,69  | 23,25 |
| 20  | 19,84 | 7,37  | 17,2  |
| 21  | 27,4  | 7,94  | 13,23 |
| 22  | 37,61 | 8,13  | 8,32  |
| 23  | 43,09 | 8,32  | 2,65  |
| 24  | 44,04 | 10,58 | 1,13  |
| 25  | 43,66 | 13,99 | 1,51  |
| 26  | 42,34 | 20,22 | 1,51  |
| 27  | 39,88 | 25,7  | 1,51  |
| 28  | 35,34 | 31,75 | 1,89  |
| 29  | 31,75 | 48,01 | 2,08  |

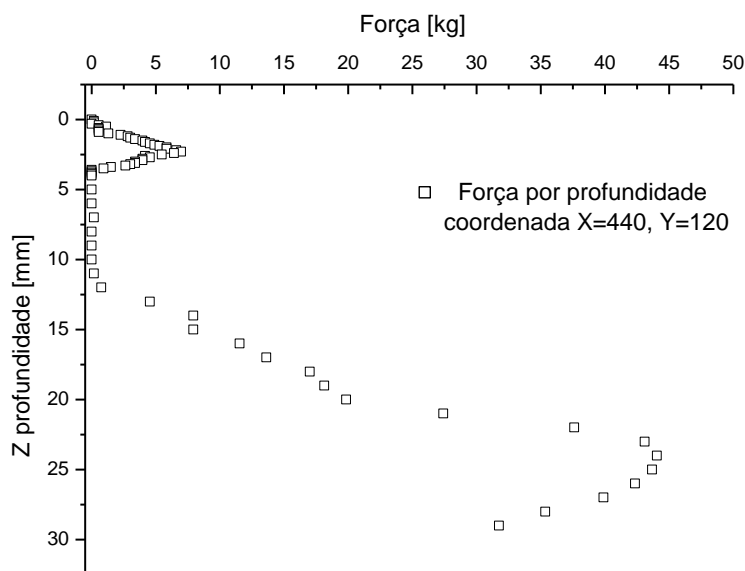


Figura 4.9 : RSPRxPosiçãoxProfundidade para as coordenadas X=440 e Y=120.

#### 4.6 Visualização da base de dados com mapas bidimensionais

A visualização de dados da resistência do solo à penetração de raízes em forma de tabela ou gráfico unidimensional é dificultada à medida que ocorre

um aumento da base dos dados. Para esses casos, a geração de mapas bidimensionais vêm a ser uma ferramenta útil.

As figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 ilustram parte de mapas obtidos para o ensaio com bloco de solo. Os mapas ilustram a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração de raízes em diferentes profundidades dos perfis ensaiados.

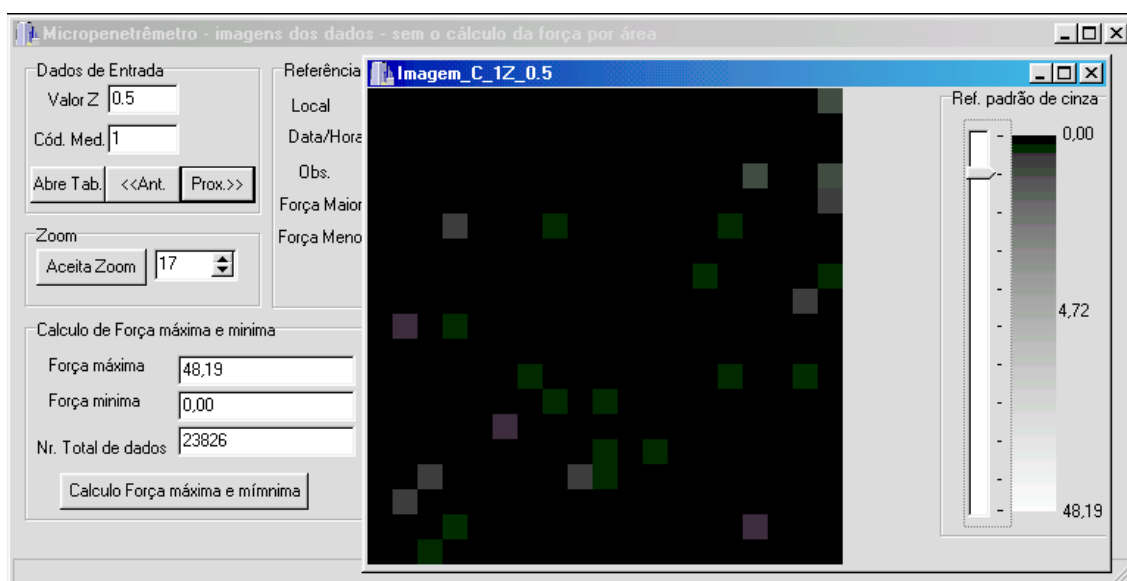


Figura 4.10 : Visualização da resistência do solo à penetração de raízes em uma camada na profundidade de 0,5 mm.

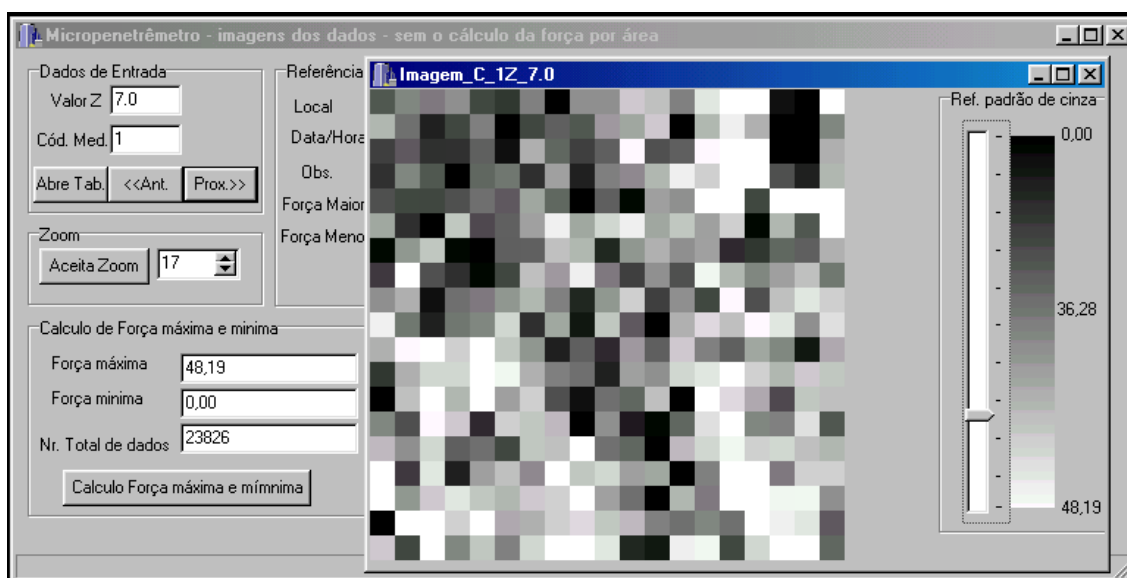


Figura 4.11 : Visualização da resistência do solo à penetração de raízes em uma camada na profundidade de 7,0 mm.

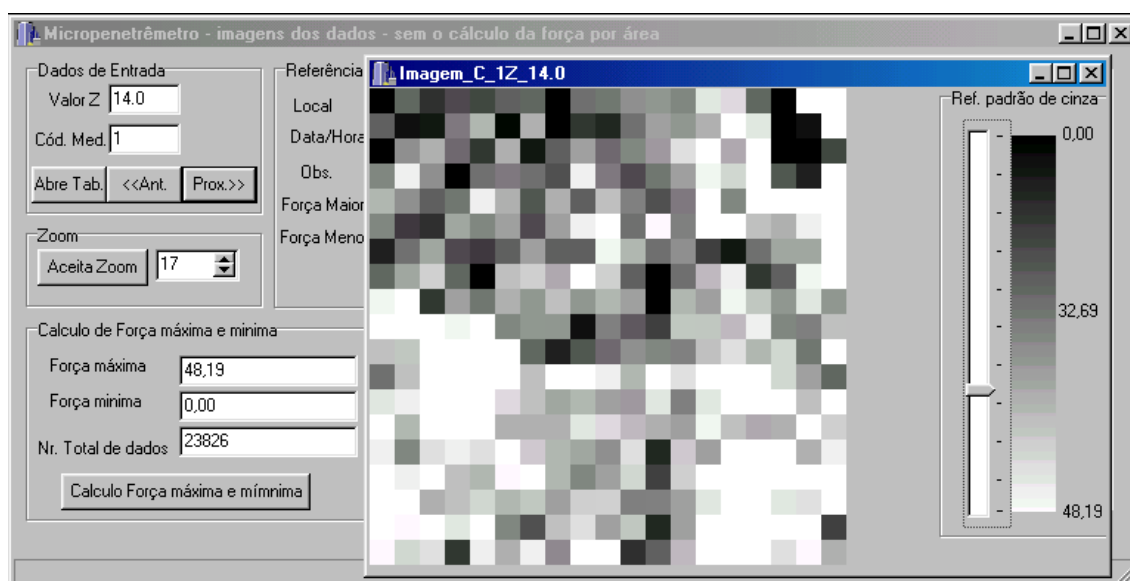


Figura 4.12 : Visualização da resistência do solo à penetração de raízes em uma camada na profundidade de 14,0 mm.

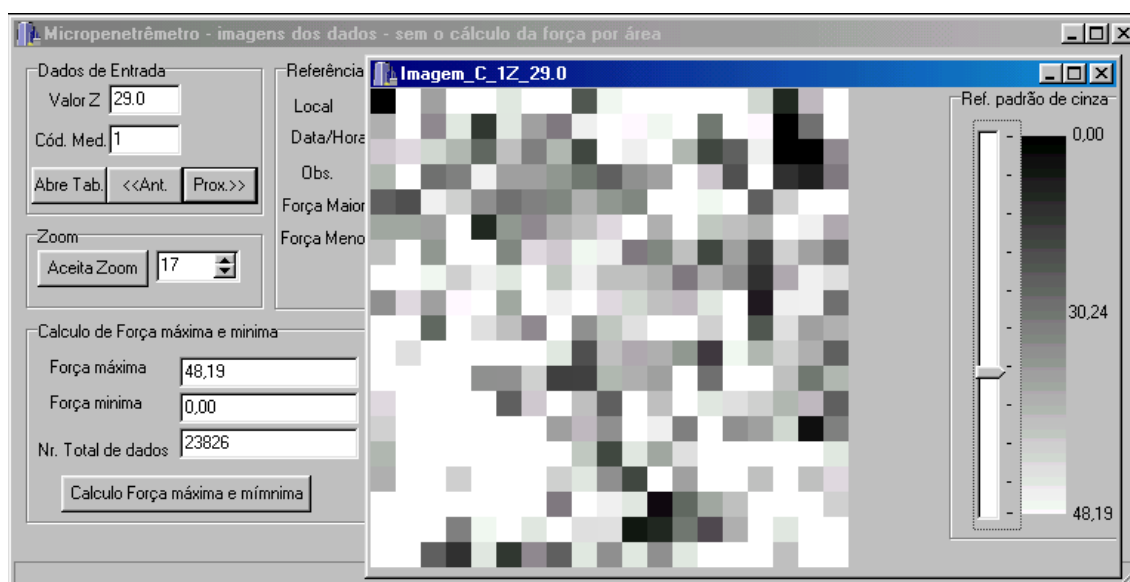


Figura 4.13 : Visualização da resistência do solo à penetração de raízes em uma camada na profundidade de 29,0 mm.

Cada mapa, representado nas figuras 4.12 e 4.13, correspondem a uma camada de medida no avanço da microsonda e cada pixel dos mapas corresponde ao valor da resistência do solo à penetração de raízes.

Estes resultados auxiliam a visualização de áreas críticas à penetração de raízes, devido às condições variadas de resistência do solo à essa penetração.

#### **4.7 Visualização volumétrica da resistência do solo à penetração de raízes no ensaio da amostra com bloco de solo não deformado**

Adicionalmente à ferramenta para visualização de mapas bidimensionais de resistência do solo à penetração de raízes, a visualização volumétrica foi obtida com a interpolação de planos entre os planos medidos.

Assim, com a utilização dos algoritmos computacionais, descrito nos itens 3.8 e 3.9 do capítulo 3, os mapas bidimensionais foram utilizados para gerar um mapa tridimensional dos dados coletados com a amostra do bloco de solo ensaiado, conforme ilustrado na figura 4.14, com corte transversal, o corte coronal e o corte sagital.

Esta ferramenta do sistema, além de permitir uma visualização em toda a extensão da amostra, permite a visualização da variação da resistência do solo à penetração de raízes por camada e em tempo real com seus respectivos cortes. Também, viabiliza ferramenta de *threshold*, selecionando a faixa de valores referentes a RSPR e visualização de onde elas estão atuando dentro da amostra, conforme ilustrado nas figuras 4.15 e 4.16.

Na figura 4.17 é ilustrado um outro resultado desta ferramenta, onde foram interpoladas 10 camadas entre as profundidade de 13,0 mm e de 16,0 mm, ou seja, onde foram incluídas camadas de estudo a cada 0,3 mm. Através dos cortes é possível observar o provável comportamento da variação da resistência do solo à penetração de raízes entre as camadas.

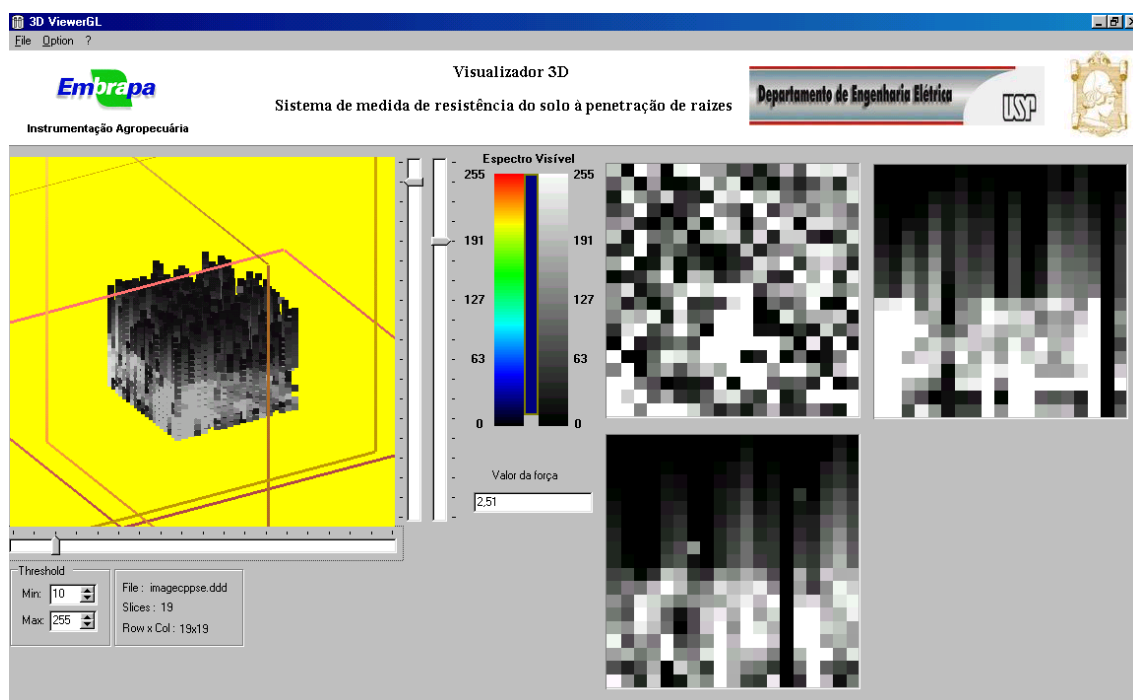


Figura 4.14 : Visualização volumétrica da resistência do solo à penetração de raízes, em escala de cinza, da amostra de bloco de solo (Embrapa Pecuária Sudeste, latitude  $s21^{\circ}57'10,9591''$ , longitude  $o47^{\circ}50'35,8174''$ ).

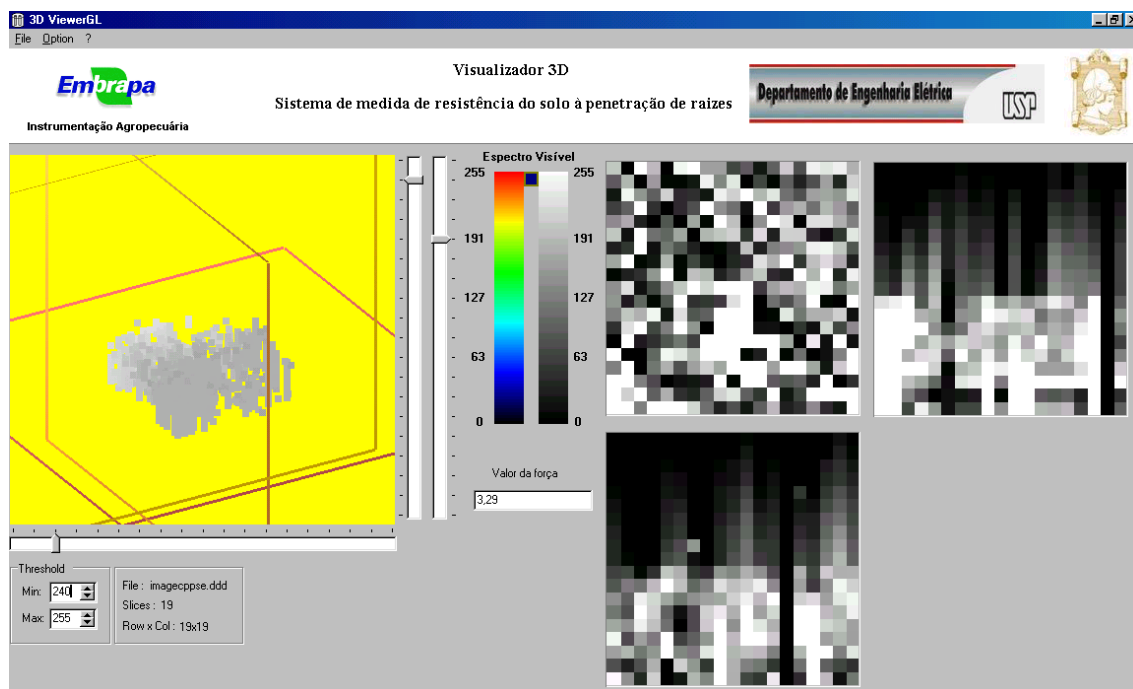


Figura 4.15 : Visualização de mapa 3D para uma selecionada faixa de RSPR, região de alta resistência do solo à penetração de raízes, faixa de 4,7 kg a 5,0kg (46,10 kgf a 49,03 kgf).

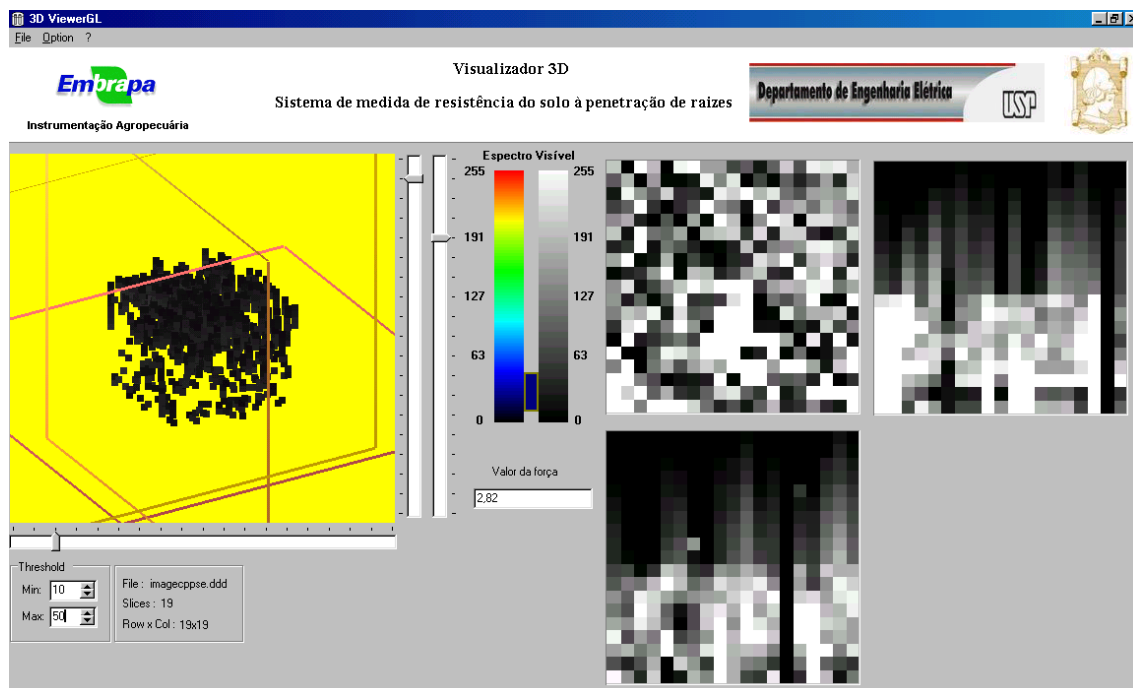


Figura 4.16 : Visualização de mapa 3D para uma selecionada faixa de RSPR, região de baixa resistência do solo à penetração de raízes, faixa de 0,20 kg a 0,98 kg (1,96 kgf a 9,61 kgf).

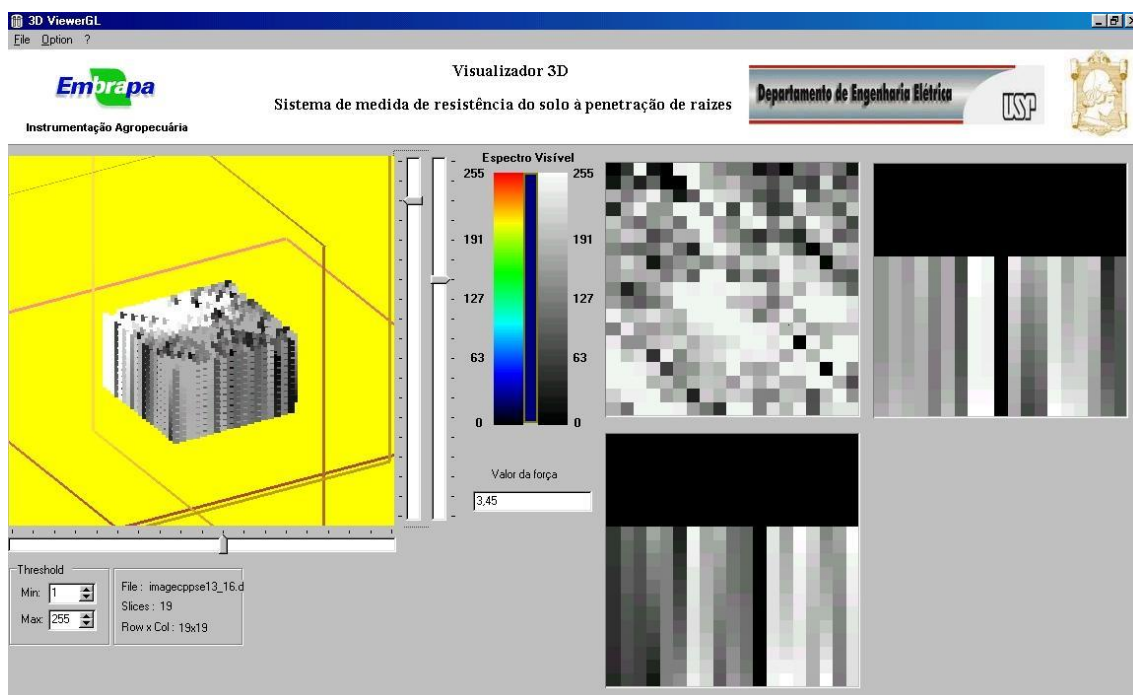


Figura 4.17 : Resultado com interpolação de 10 camadas entre as camadas de profundidade de 13,0 mm e de 16,0 mm.

#### 4.8 Medida de resistência do solo à penetração de raízes em ensaio de campo

Os ensaios de campo foram realizados em uma área selecionada, localizada, conforme indicado, na parte central do mapa apresentado na figura 4.3, como : *Área de medida de resistência do solo à penetração de raízes*. A área fica próxima a uma plantação de cana-de-açúcar, com coordenadas geofísicas (obtidas com GPS) de latitude sul igual a 21°57'2,581336" e longitude oeste igual a 47°50'50,7862".

O solo da região analisada é do tipo *Latosolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVd4)* e apresenta textura média, fase cerradão tropical subcaducifólico, são solos profundos, bem acentuadamente drenados, porosos e de coloração variável bruno-amarelado-escuro, bruno-escuro, bruno-forte e bruno, com teores de argila entre 200 a 350 g kg<sup>-1</sup> ao longo do perfil. Este solo apresenta baixa saturação por bases e baixa saturação por alumínio, conferindo à unidade o caráter distrófico e apresentando as seguintes características analíticas : saturação por bases variando de muito baixa a média entre 6 a 63%, com menores valores em profundidade; a saturação por alumínio é baixa na maioria dos perfis; a capacidade de troca de cátions varia de baixa a média, entre 1,8 a 7,2 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de solo, com valores menores em profundidade; o valor de bases trocáveis é baixo, ficando entre os valores de 0,2 a 2,5 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de solo; os valores de carbono orgânico variam de baixos a médios, entre os valores de 3,1 a 16,7 g kg<sup>-1</sup> de solo e diminui com a profundidade; tem valores de alumínio trocável nulo; os valores de fósforo disponível são baixos ao longo do perfil, menor que 2 mg kg<sup>-1</sup> de solo; solos de fortemente a moderadamente ácidos (4,8 a 5,9) e baixos teores de óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), variando de 34 a 73 g kg<sup>-1</sup> de solo.

Para o ensaio de campo, o instrumento foi primeiramente nivelado com a superfície do solo. Uma bateria de carro com tensão de 12 Vdc, com capacidade de corrente 45 Ah, foi utilizada para suprir potência elétrica à



instrumentação de medida. O computador central utilizado foi um computador portátil marca Acer modelo Extensa 368D, com microprocessador 486 operando em 200 MHz e 32 Mb de RAM.

A coleta de dados foi realizada dentro de uma área de 0,27 m x 0,27 m, com variação de 0,15 m de distância entre elas. As coordenadas de partida fornecidas ao sistema, são as indicadas na tabela 4.10.

Tabela 4.10 : Ensaio de campo - Coordenadas para medida de RSPR.

| Posição inicial |        | Posição final |        | Incremento |        |
|-----------------|--------|---------------|--------|------------|--------|
| X (mm)          | Y (mm) | X (mm)        | Y (mm) | X (mm)     | Y (mm) |
| 0               | 0      | 270           | 270    | 15         | 15     |

A coordenada inicial (0,0) corresponde ao zero de todo o sistema de posicionamento XY. O número de dados gerados com esta base de coordenadas correspondem a uma matriz que envolveu 19 x 19 pontos por 66 níveis de profundidade, o que levou a um total de 23826 registros.

Assim, as coordenadas foram fornecidas ao sistema, através da interface com o usuário instalada no computador *laptop*, no painel *Medir Região* e dado o comando de execução da medida através do botão *Medir Região*.

A figura 4.18 exemplifica uma parte dos resultados obtidos, para a coordenada (120,240), conforme o usuário estaria vendo na medida em campo.

Com o objetivo de se caracterizar o ensaio de campo, bem como devido ao grande número de dados, foram selecionados duas coordenadas, (75,195) e (255,105), para se verificar a variação da resistência do solo à penetração de raízes, representadas na tabela 4.11.

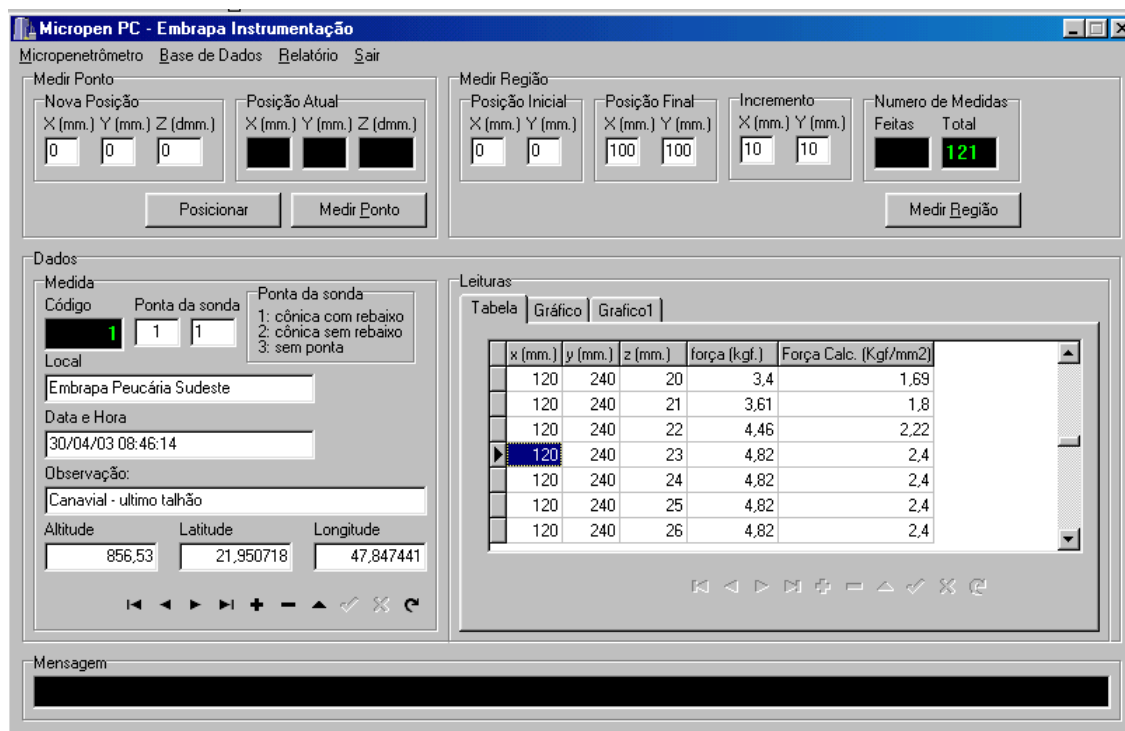


Figura 4.18 : Ilustração de parte dos resultados de coleta de campo, com medidas de resistência do solo à penetração de raízes.

Tabela 4.11 : Dados reais coletados em campo, posição (75,195) e (255,105).

| Leituras |    |    |     |       |      | Medidas  |    |     |     |       |      |
|----------|----|----|-----|-------|------|----------|----|-----|-----|-------|------|
| Cód.     | X  | Y  | Z   | Força |      | Cód.     | X  | Y   | Z   | Força |      |
| Medidas  | Mm | mm | mm  | Kg    |      | Leituras | mm | m   | mm  | Kg    |      |
| 7129     | 1  | 75 | 195 | 0     | 0    | 21781    | 1  | 255 | 105 | 0     | 0,02 |
| 7130     | 1  | 75 | 195 | 0,1   | 0,02 | 21782    | 1  | 255 | 105 | 0,1   | 0,08 |
| 7131     | 1  | 75 | 195 | 0,2   | 0    | 21783    | 1  | 255 | 105 | 0,2   | 0,04 |
| 7132     | 1  | 75 | 195 | 0,3   | 0    | 21784    | 1  | 255 | 105 | 0,3   | 0,02 |
| 7133     | 1  | 75 | 195 | 0,4   | 0,02 | 21785    | 1  | 255 | 105 | 0,4   | 0,08 |
| 7134     | 1  | 75 | 195 | 0,5   | 0,02 | 21786    | 1  | 255 | 105 | 0,5   | 0,08 |
| 7135     | 1  | 75 | 195 | 0,6   | 0    | 21787    | 1  | 255 | 105 | 0,6   | 0,06 |
| 7136     | 1  | 75 | 195 | 0,7   | 0    | 21788    | 1  | 255 | 105 | 0,7   | 0,02 |
| 7137     | 1  | 75 | 195 | 0,8   | 0    | 21789    | 1  | 255 | 105 | 0,8   | 0,06 |
| 7138     | 1  | 75 | 195 | 0,9   | 0    | 21790    | 1  | 255 | 105 | 0,9   | 0,08 |
| 7139     | 1  | 75 | 195 | 1     | 0    | 21791    | 1  | 255 | 105 | 1     | 0,04 |
| 7140     | 1  | 75 | 195 | 1,1   | 0    | 21792    | 1  | 255 | 105 | 1,1   | 0,11 |
| 7141     | 1  | 75 | 195 | 1,2   | 0    | 21793    | 1  | 255 | 105 | 1,2   | 0,04 |
| 7142     | 1  | 75 | 195 | 1,3   | 0    | 21794    | 1  | 255 | 105 | 1,3   | 0,09 |
| 7143     | 1  | 75 | 195 | 1,4   | 0    | 21795    | 1  | 255 | 105 | 1,4   | 0,06 |
| 7144     | 1  | 75 | 195 | 1,5   | 0    | 21796    | 1  | 255 | 105 | 1,5   | 0,04 |
| 7145     | 1  | 75 | 195 | 1,6   | 0    | 21797    | 1  | 255 | 105 | 1,6   | 0,11 |
| 7146     | 1  | 75 | 195 | 1,7   | 0    | 21798    | 1  | 255 | 105 | 1,7   | 0,08 |
| 7147     | 1  | 75 | 195 | 1,8   | 0    | 21799    | 1  | 255 | 105 | 1,8   | 0,04 |
| 7148     | 1  | 75 | 195 | 1,9   | 0    | 21800    | 1  | 255 | 105 | 1,9   | 0,08 |
| 7149     | 1  | 75 | 195 | 2     | 0    | 21801    | 1  | 255 | 105 | 2     | 0,04 |
| 7150     | 1  | 75 | 195 | 2,1   | 0    | 21802    | 1  | 255 | 105 | 2,1   | 0    |
| 7151     | 1  | 75 | 195 | 2,2   | 0    | 21803    | 1  | 255 | 105 | 2,2   | 0    |

|      |   |    |     |     |      |       |   |     |     |     |      |
|------|---|----|-----|-----|------|-------|---|-----|-----|-----|------|
| 7152 | 1 | 75 | 195 | 2,3 | 0    | 21804 | 1 | 255 | 105 | 2,3 | 0    |
| 7153 | 1 | 75 | 195 | 2,4 | 0    | 21805 | 1 | 255 | 105 | 2,4 | 0    |
| 7154 | 1 | 75 | 195 | 2,5 | 0    | 21806 | 1 | 255 | 105 | 2,5 | 0,02 |
| 7155 | 1 | 75 | 195 | 2,6 | 0    | 21807 | 1 | 255 | 105 | 2,6 | 0,02 |
| 7156 | 1 | 75 | 195 | 2,7 | 0    | 21808 | 1 | 255 | 105 | 2,7 | 0    |
| 7157 | 1 | 75 | 195 | 2,8 | 0    | 21809 | 1 | 255 | 105 | 2,8 | 0    |
| 7158 | 1 | 75 | 195 | 2,9 | 0    | 21810 | 1 | 255 | 105 | 2,9 | 0    |
| 7159 | 1 | 75 | 195 | 3   | 0    | 21811 | 1 | 255 | 105 | 3   | 0    |
| 7160 | 1 | 75 | 195 | 3,1 | 0    | 21812 | 1 | 255 | 105 | 3,1 | 0,02 |
| 7161 | 1 | 75 | 195 | 3,2 | 0    | 21813 | 1 | 255 | 105 | 3,2 | 0,02 |
| 7162 | 1 | 75 | 195 | 3,3 | 0    | 21814 | 1 | 255 | 105 | 3,3 | 0,02 |
| 7163 | 1 | 75 | 195 | 3,4 | 0    | 21815 | 1 | 255 | 105 | 3,4 | 0,02 |
| 7164 | 1 | 75 | 195 | 3,5 | 0    | 21816 | 1 | 255 | 105 | 3,5 | 0,02 |
| 7165 | 1 | 75 | 195 | 3,6 | 0    | 21817 | 1 | 255 | 105 | 3,6 | 0,02 |
| 7166 | 1 | 75 | 195 | 3,7 | 0    | 21818 | 1 | 255 | 105 | 3,7 | 0,02 |
| 7167 | 1 | 75 | 195 | 3,8 | 0    | 21819 | 1 | 255 | 105 | 3,8 | 0,02 |
| 7168 | 1 | 75 | 195 | 3,9 | 0    | 21820 | 1 | 255 | 105 | 3,9 | 0,02 |
| 7169 | 1 | 75 | 195 | 4   | 0,02 | 21821 | 1 | 255 | 105 | 4   | 0,06 |
| 7170 | 1 | 75 | 195 | 5   | 0,02 | 21822 | 1 | 255 | 105 | 5   | 0,08 |
| 7171 | 1 | 75 | 195 | 6   | 0,06 | 21823 | 1 | 255 | 105 | 6   | 0,06 |
| 7172 | 1 | 75 | 195 | 7   | 0,06 | 21824 | 1 | 255 | 105 | 7   | 0,04 |
| 7173 | 1 | 75 | 195 | 8   | 0,19 | 21825 | 1 | 255 | 105 | 8   | 0,06 |
| 7174 | 1 | 75 | 195 | 9   | 0,55 | 21826 | 1 | 255 | 105 | 9   | 0,11 |
| 7175 | 1 | 75 | 195 | 10  | 1,02 | 21827 | 1 | 255 | 105 | 10  | 0,25 |
| 7176 | 1 | 75 | 195 | 11  | 1,53 | 21828 | 1 | 255 | 105 | 11  | 0,42 |
| 7177 | 1 | 75 | 195 | 12  | 1,64 | 21829 | 1 | 255 | 105 | 12  | 0,6  |
| 7178 | 1 | 75 | 195 | 13  | 2,02 | 21830 | 1 | 255 | 105 | 13  | 0,6  |
| 7179 | 1 | 75 | 195 | 14  | 2,38 | 21831 | 1 | 255 | 105 | 14  | 0,7  |
| 7180 | 1 | 75 | 195 | 15  | 2,85 | 21832 | 1 | 255 | 105 | 15  | 0,89 |
| 7181 | 1 | 75 | 195 | 16  | 3,42 | 21833 | 1 | 255 | 105 | 16  | 0,93 |
| 7182 | 1 | 75 | 195 | 17  | 3,63 | 21834 | 1 | 255 | 105 | 17  | 1,13 |
| 7183 | 1 | 75 | 195 | 18  | 4,14 | 21835 | 1 | 255 | 105 | 18  | 1,49 |
| 7184 | 1 | 75 | 195 | 19  | 4,31 | 21836 | 1 | 255 | 105 | 19  | 1,74 |
| 7185 | 1 | 75 | 195 | 20  | 4,82 | 21837 | 1 | 255 | 105 | 20  | 2,29 |
| 7186 | 1 | 75 | 195 | 21  | 4,82 | 21838 | 1 | 255 | 105 | 21  | 2,53 |
| 7187 | 1 | 75 | 195 | 22  | 4,82 | 21839 | 1 | 255 | 105 | 22  | 2,7  |
| 7188 | 1 | 75 | 195 | 23  | 4,82 | 21840 | 1 | 255 | 105 | 23  | 2,61 |
| 7189 | 1 | 75 | 195 | 24  | 4,82 | 21841 | 1 | 255 | 105 | 24  | 2,4  |
| 7190 | 1 | 75 | 195 | 25  | 4,82 | 21842 | 1 | 255 | 105 | 25  | 2,78 |
| 7191 | 1 | 75 | 195 | 26  | 4,82 | 21843 | 1 | 255 | 105 | 26  | 2,99 |
| 7192 | 1 | 75 | 195 | 27  | 4,82 | 21844 | 1 | 255 | 105 | 27  | 3,27 |
| 7193 | 1 | 75 | 195 | 28  | 4,82 | 21845 | 1 | 255 | 105 | 28  | 3,27 |
| 7194 | 1 | 75 | 195 | 29  | 4,82 | 21846 | 1 | 255 | 105 | 29  | 3,23 |

A figura 4.19, ilustra a variação da resistência do solo à penetração e raízes para a coordenada X=255 e Y=105, em função da profundidade Z, no intervalo de 0 a 30 mm.

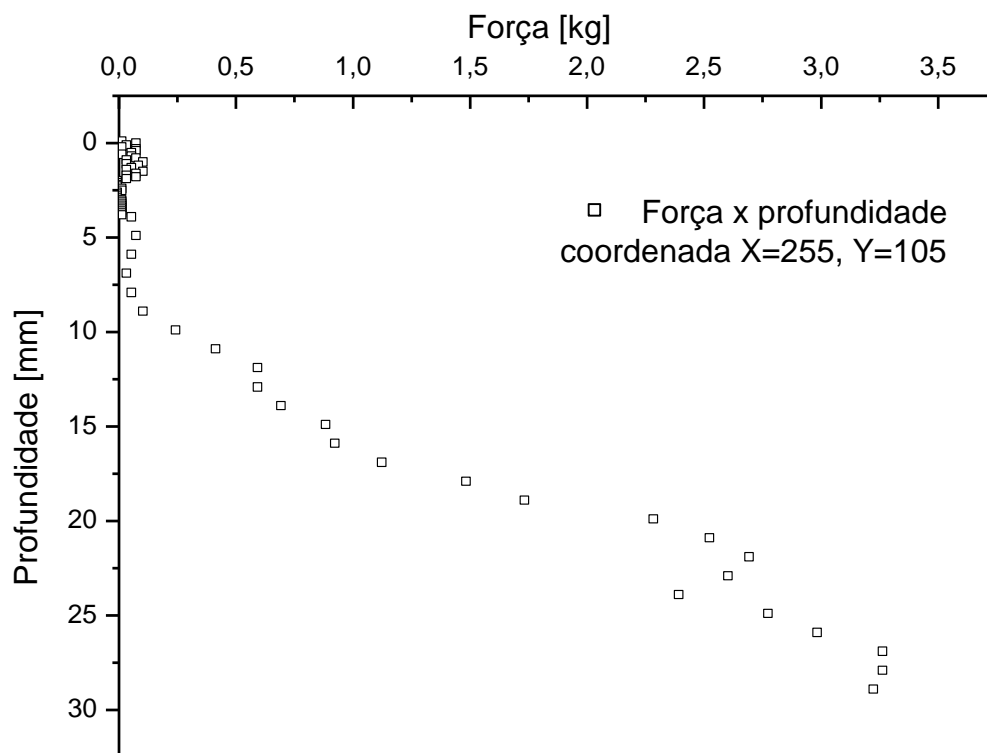










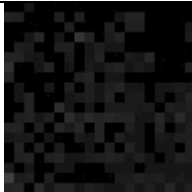




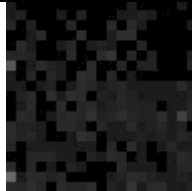
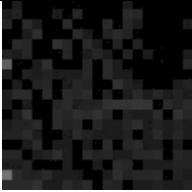
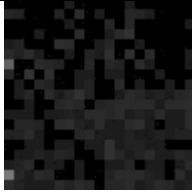
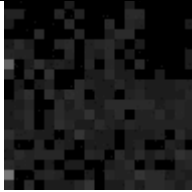
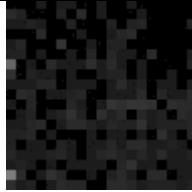
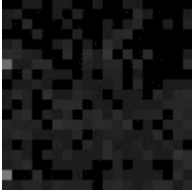
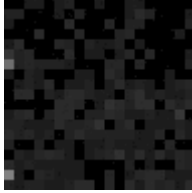
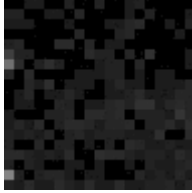



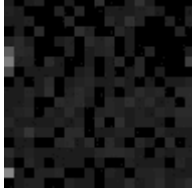



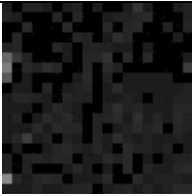
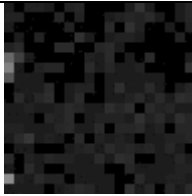
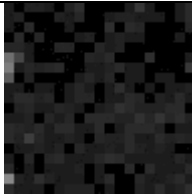
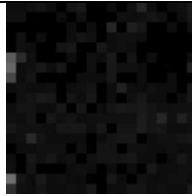
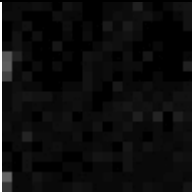
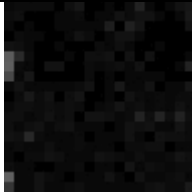
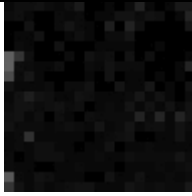




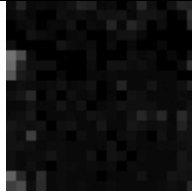


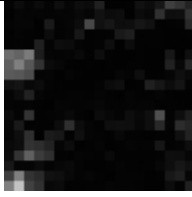
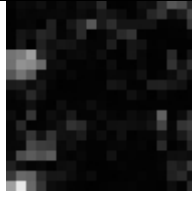
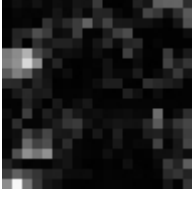
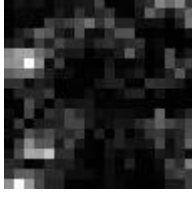
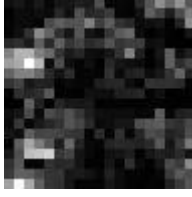
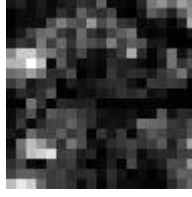
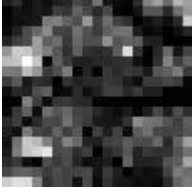
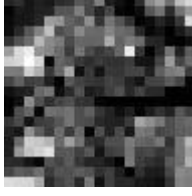
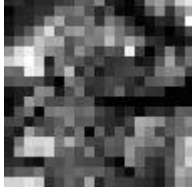
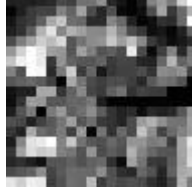
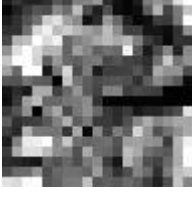
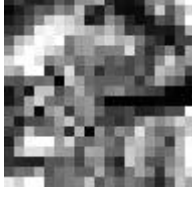
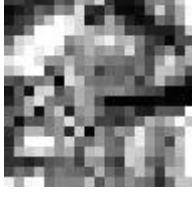
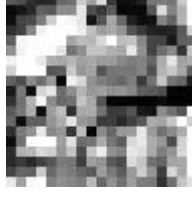
Figura 4.19 : Variação da resistência do solo à penetração de raízes em função da profundidade Z, para as coordenadas X=255 e Y=105.

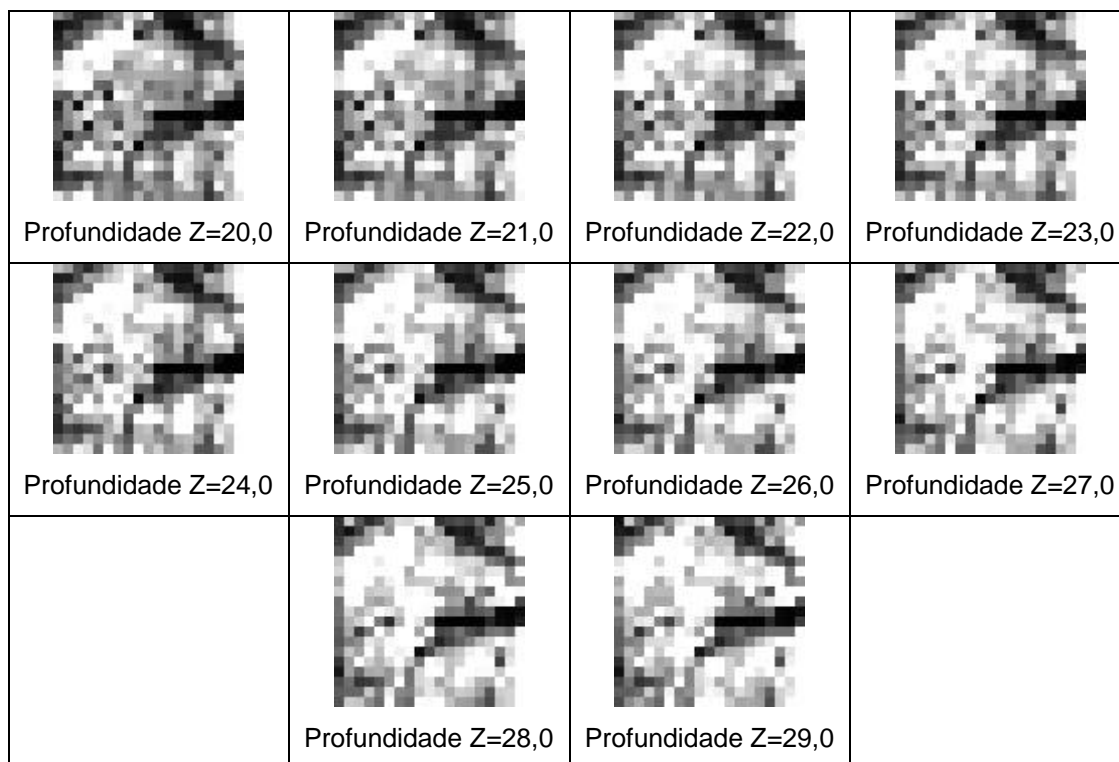
Observa-se, para alguns pontos de profundidade, o valor da força igual a 0,0 kgf, mesmo nas leituras efetuadas em laboratório, isto se deve ao fato da microsonda encontrar no interior da amostra regiões em vazio, o que ocorre, por exemplo, devido a presença de rachaduras internas, ou buracos deixados por materiais como raízes decomposta ou formigueiros ou ainda outras espécies de insetos ou fauna, ou mesmos poros naturais.

A seqüência de mapas bidimensionais, gerados no ensaio, podem ser observadas na tabela 4.12.

Tabela 4.12 : Seqüência de mapas bidimensionais das medidas de resistência do solo à penetração de raízes para os dados coletados em campo, no intervalo de  $Z=0,0$  a  $Z=29,0$ , medidas em milímetros.

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
|    |    |    |    |
| Profundidade $Z=0,0$  | Profundidade $Z=0,1$  | Profundidade $Z=0,2$   | Profundidade $Z=0,3$  |
|    |    |    |    |
| Profundidade $Z=0,4$  | Profundidade $Z=0,5$  | Profundidade $Z=0,6$   | Profundidade $Z=0,7$  |
|   |   |   |   |
| Profundidade $Z=0,8$  | Profundidade $Z=0,9$  | Profundidade $Z=1,0$   | Profundidade $Z=1,1$  |
|  |  |  |  |
| Profundidade $Z=1,2$  | Profundidade $Z=1,3$  | Profundidade $Z=1,4$   | Profundidade $Z=1,5$  |
|  |  |  |  |
| Profundidade $Z=1,6$  | Profundidade $Z=1,7$  | Profundidade $Z=1,8$   | Profundidade $Z=1,9$  |
|  |  |  |  |
| Profundidade $Z=2,0$  | Profundidade $Z=2,1$  | Profundidade $Z=2,2$   | Profundidade $Z=2,3$  |
|  |  |  |  |
|   |   |  |   |

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| Profundidade Z=2,4  | Profundidade Z=2,5  | Profundidade Z=2,6   | Profundidade Z=2,7  |
|    |    |    |    |
| Profundidade Z=2,8  | Profundidade Z=2,9  | Profundidade Z=3,0   | Profundidade Z=3,1  |
|    |    |    |    |
| Profundidade Z=3,2  | Profundidade Z=3,3  | Profundidade Z=3,4   | Profundidade Z=3,5  |
|    |    |    |    |
| Profundidade Z=3,6  | Profundidade Z=3,7  | Profundidade Z=3,8   | Profundidade Z=3,9  |
|  |  |  |  |
| Profundidade Z=4,0  | Profundidade Z=5,0  | Profundidade Z=6,0   | Profundidade Z=7,0  |
|  |  |  |  |
| Profundidade Z=8,0  | Profundidade Z=9,0  | Profundidade Z=10,0  | Profundidade Z=11,0   |
|  |  |  |  |
| Profundidade Z=12,0   | Profundidade Z=13,0   | Profundidade Z=14,0  | Profundidade Z=15,0   |
|  |  |  |  |
| Profundidade Z=16,0   | Profundidade Z=17,0   | Profundidade Z=18,0  | Profundidade Z=19,0   |



No ensaio, a partir da profundidade  $z = 5,0$  mm, observou-se o início da formação de uma área maior resistência ao avanço da microsonda, o que também o seria para raízes de plantas.

O solo onde foram feitas as medidas do ensaio de campo possui características de densidade de acordo com sua profundidade, conforme as apresentadas na tabela 4.13.

Tabela 4.13 : Densidade em função da profundidade do solo de medida.

|  |   |
|--|---|
| Coefficiente de atenuação do Solo a 60 KeV       | 0.296 $\text{cm}^{-1}$                                |
| Número do Recipiente                             | 1.00  |
| Espessura da amostra                             | 6.78 cm   |
| Tempo de Aquisição                               | 90 segundos   |
| Comprimento da Amostra                           | 5.00 cm   |
| Distância entre medidas                          | 0.50 cm   |
| Repetições                                       | 1   |
| Umidade média do solo na área do experimento <0> | 9,83 %  |
| Tipo de solo                                     | Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico – textura média |
| Posição(cm)                                      | Densidade( $\text{g cm}^{-3}$ )                       |
| 0.0  | 0.979   |
| 0.5  | 1.194   |
| 1.0  | 1.287   |
| 1.5  | 1.256   |
| 2.0  | 1.258   |
| 2.5  | 1.212   |
| 3.0  | 1.176   |

---

|     |       |
|-----|-------|
| 3.5 | 1.273 |
| 4.0 | 1.223 |
| 4.5 | 1.224 |

---

A densidade da amostra de solo foi medida utilizando-se um Analisador Granulométrico de Solos (VAZ *et al.*, 1992).

Os valores de densidade mostrados a tabela 4.13, são valores médios na região correspondente a profundidade medida. A densidade mantém-se com valores quase próximos, mas mostrando uma aumento com a profundidade, o que justifica a região que aparece em branco nas seqüências dos mapas apresentados na tabela 4.12, a partir da profundidade Z=4,0 mm.

No intervalo de profundidade Z=0,0 mm a Z=5,0 mm, apresenta o valor de densidade mais baixo,  $\rho=0,979 \text{ g cm}^{-3}$ , e nas seqüências dos mapas, até aproximadamente a esta profundidade, os mapas aparecem com tons de preto, indicando região de baixa resistência à penetração da microsonda. De fato, observado em campo, a camada superior do solo estava com tênue agregação, quase não oferecendo resistência à penetração da microsonda. A figura 4.20, ilustra uma foto que foi obtida durante o ensaio de campo, onde se pode visualizar o perfil do solo que foi amostrado.

Na figura 4.20, pode-se observar a camada superficial mais porosa, arenosa, conforme descendo no perfil, nota-se a massa de solo mais agregada e na figura 4.21, é mostrado a região de medida, após o termino das coletas de dados.

A informação volumétrica da resistência do solo à penetração de raízes obtida no ensaio de campo a partir dos mapas bidimensionais, com seus cortes transversal, coronal, sagital, é vista na figura 4.22.





Figura 4.20 : Ilustração de um perfil do solo amostrado no ensaio de campo, onde se observa menor agregação próxima a região superficial.



Figura 4.21 : Região de medida, após término da coleta de dados, onde se observa à área ensaiada com a microsonda.

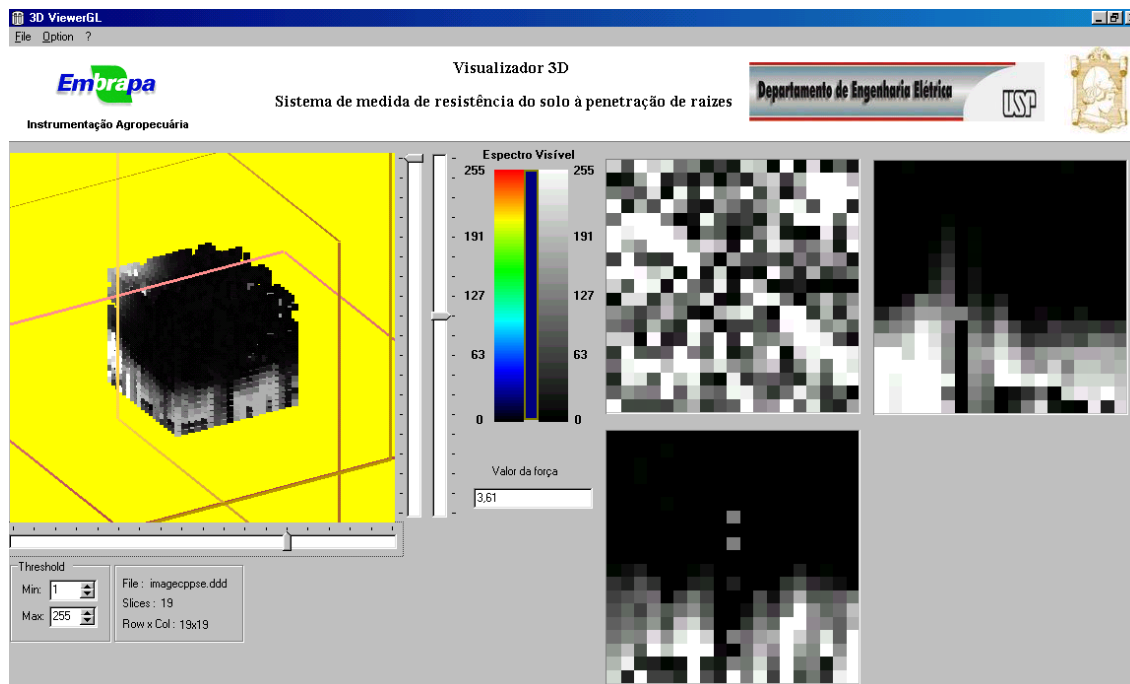


Figura 4.22 : Mapa tridimensional dos dados de resistência do solo à penetração de raízes coletados no ensaio de campo.

As figuras 4.23, 4.24 e 4.25 ilustram situações distintas, da resistência do solo à penetração de raízes, de acordo com a profundidade em que se localizam as regiões. Na figura 4.23 é apresentada a região do ensaio de campo onde há alta resistência do solo à penetração de raízes, ou seja, faixa de 45,11 kgf a 49,03 kgf. Na figura 4.24 é visualizada a região onde houve a ocorrência de médios valores de resistência do solo à penetração de raízes, ou seja na faixa de 22,55 kgf a 25,49 kgf. Na figura 4.25 é visualizada a região do experimento onde ocorreu baixa resistência do solo à penetração de raízes, ou seja, faixa de 0,58 kgf a 3,04 kgf. As regiões analisadas foram selecionadas com o uso de um filtro *threshold*, cujo ajuste de limiar pode ser selecionado pelo usuário.

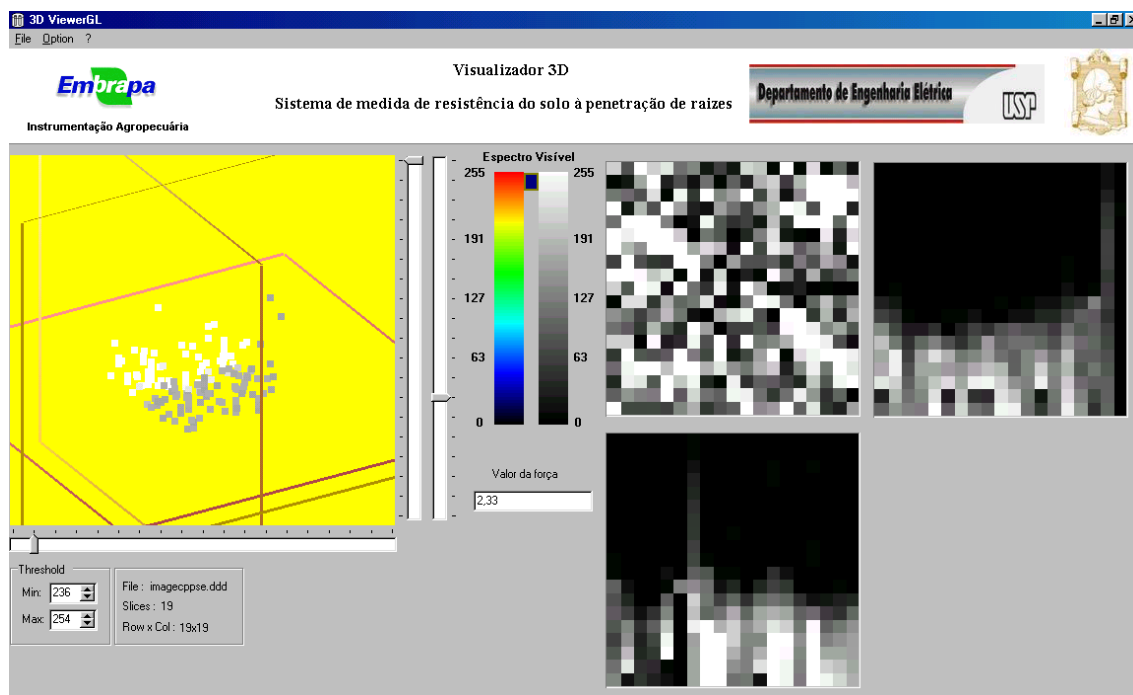


Figura 4.23 : Ensaio de campo : região de alta resistência do solo à penetração de raízes (de 45,11 kgf a 49,03 kgf).

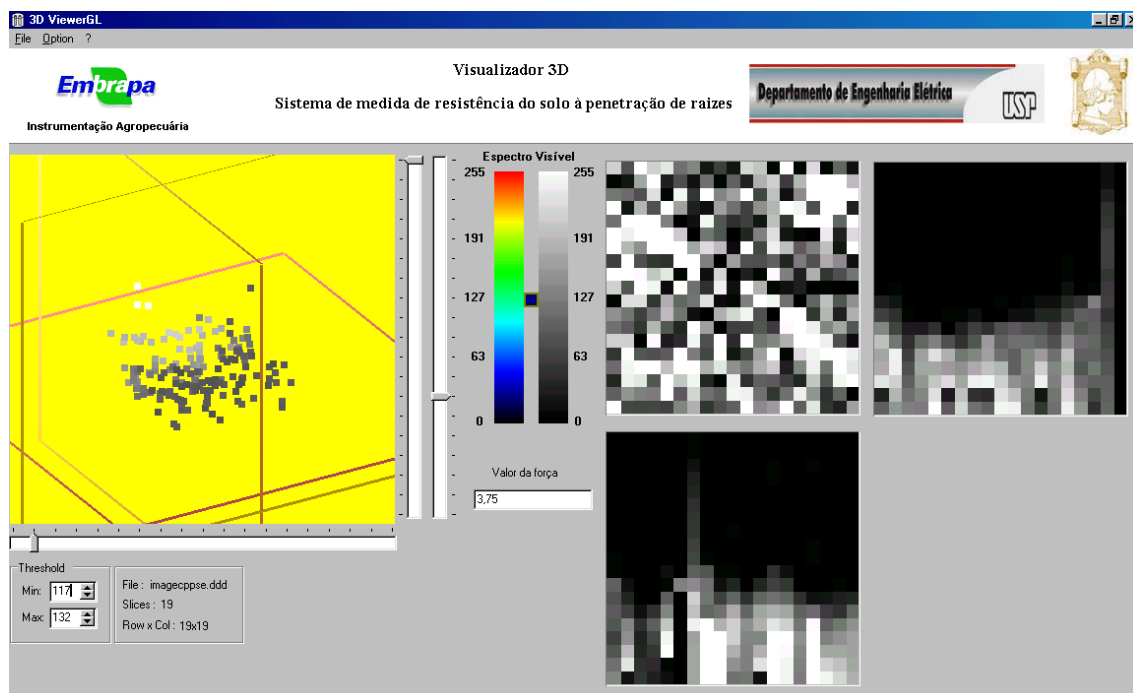


Figura 4.24 : Ensaio de campo : região de valores médios de resistência do solo à penetração de raízes (de 22,55 kgf a 25,49 kgf).

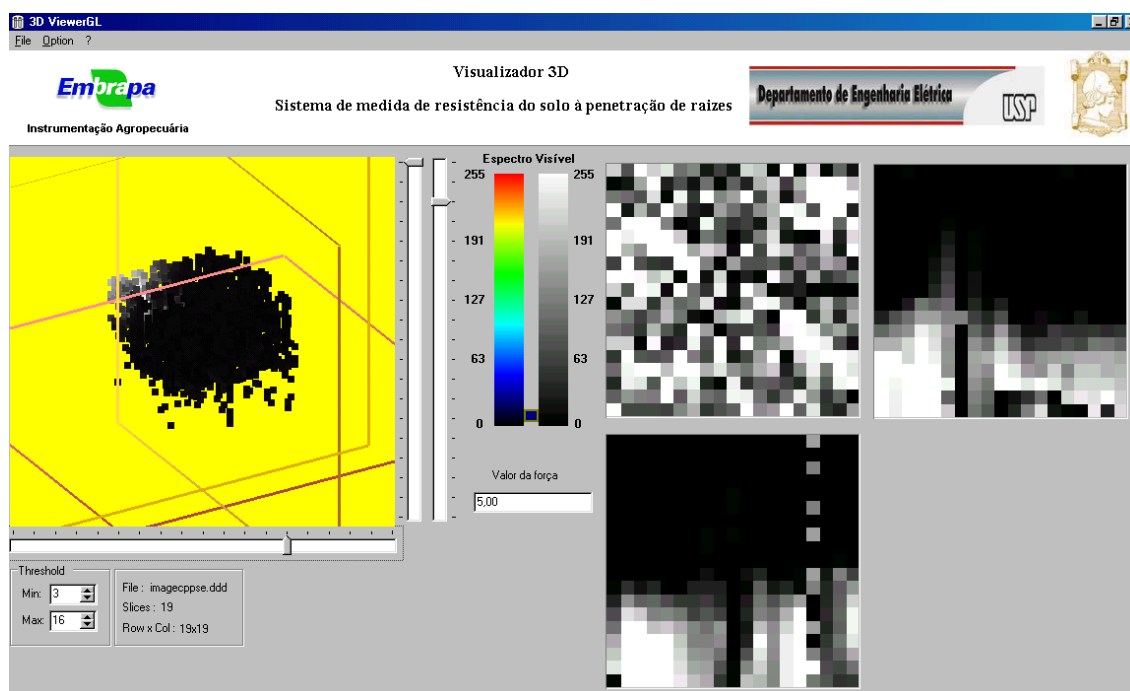


Figura 4.25 : Ensaio de campo : região de baixa resistência do solo à penetração de raízes (de 0,58 kgf a 3,04 kgf).

#### 4.9 Medida de resistência do solo à penetração de raízes em ensaio de campo com uma sonda de 13 cm

Neste ensaio de campo foi utilizado uma sonda de 13 cm projetada sem o rebaixo no corpo da sonda e mantendo-se o ângulo de ponta de cone de  $30^\circ$ . O ensaio teve por objetivo avaliar o comportamento da *Instrumentação Avançada para Tomada de Decisão na Avaliação da Resistência do Solo a Penetração de Raízes* em medidas mais profundas da resistência do solo à penetração de raízes que atinjam essa profundidade, como por exemplo o que ocorre com raízes do milho (*Zea Mays*), que atinge aproximadamente 20 cm de profundidade.

Os ensaios de campo foram realizados em uma área, tendo como coordenadas geofísicas latitude sul igual a  $21^\circ 57' 5,33728''$  e longitude oeste igual a  $47^\circ 50' 45,9429''$ , área esta, também pertencente a Embrapa Pecuária Sudeste.

O solo da região analisada é do tipo *Latosolo Vermelho-Escuro Distrófico (LEd2)* e apresenta textura argilosa, fase cerradão tropical subcaducifólico, são solos profundos, de coloração bruno-avermelhada a bruno-avermelhada-escura. São formados de material muito diverso, o que lhes confere certa variabilidade nas características morfológicas, além de influir nas propriedades químicas. No geral, esses solos, apresentam baixa saturação por bases e baixa saturação por alumínio. Como variações dentro da unidade, são encontrados solos com saturação por bases elevada no horizonte superficial Ap e saturação por alumínio nula nos horizontes subsuperficiais, constituindo solos epieutróficos (perfil complementar 18), ou solos com saturação por alumínio elevada, com valores  $\geq 50\%$  em pelo menos um horizonte. Apresentando as seguintes características analíticas : saturação por bases variando de muito baixa a média (1 a 63%), com menores valores em profundidade; saturação por alumínio variável, com menores valores em profundidade; capacidade de troca de cátions variando de baixo a alto (2,6 a 11,0  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de solo), com menores valores em profundidade; bases trocáveis (S) varia de baixo a alto, de 0,3 a 6,9  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de solo; o carbono orgânico (C) diminui com a profundidade, apresentando valores entre 2,7 a 27,7  $\text{g kg}^{-1}$  de solo; os teores de alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) em superfície são prejudiciais às culturas; o fósforo disponível varia de baixo a muito baixo, menor do que 6  $\text{mg kg}^{-1}$  de solo; são solos de fortemente a moderadamente ácidos (pH) (4,8 a 6,1) e os teores de ferro total ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) são médios a altos, variando de 108 a 17  $\text{g kg}^{-1}$ .

A coleta de dados foi realizada dentro de uma área de 0,16 m x 0,16 m, com variação de 0,10 m de distância entre elas. As coordenadas de partida que foram fornecidas ao sistema, são indicadas na tabela 4.13.

Tabela 4.13 : Ensaio de campo para sonda de 13 cm - Coordenadas para medida de RSPR.

| Posição inicial |        | Posição final |        | Incremento |        |
|-----------------|--------|---------------|--------|------------|--------|
| X (mm)          | Y (mm) | X (mm)        | Y (mm) | X (mm)     | Y (mm) |
| 0               | 0      | 150           | 150    | 10         | 10     |

A coordenada inicial (0,0) corresponde ao zero de todo o sistema de posicionamento XY. O número de dados gerados com esta base de coordenadas correspondem a uma matriz que envolveu 16 x 16 pontos por 66 níveis de profundidade, o que levou a um total de 16896 registros.

A tabela 4.14, sintetiza os parâmetros do ensaio realizado com a sonda de 13 cm.

Tabela 4.15 : Umidade de solo para ensaio com sonda de 13 cm.

|  |   |
|--|---|
| Número do Recipiente                             | 1,00  |
| Espessura da amostra                             | 7,2 cm  |
| Comprimento da Amostra                           | 5,5 cm  |
| Umidade média do solo na área do experimento <0> | 11,3 %  |
| Tipo de solo                                     | Latossolo Vermelho-Escuro Distrófico – textura argilosa |

A umidade da amostra de solo foi medida utilizando-se a medida por volume (REICHARDT, 1985).

A figura 4.27 exemplifica uma parte dos resultados obtidos, para a coordenada (100,150), conforme o usuário estaria vendo na medida em campo.

Com o objetivo de se caracterizar o ensaio de campo, bem como devido ao grande número de dados, foram selecionados duas coordenadas, (80,50) e (140,110), para se verificar a variação da resistência do solo à penetração de raízes, representadas na tabela 4.15.

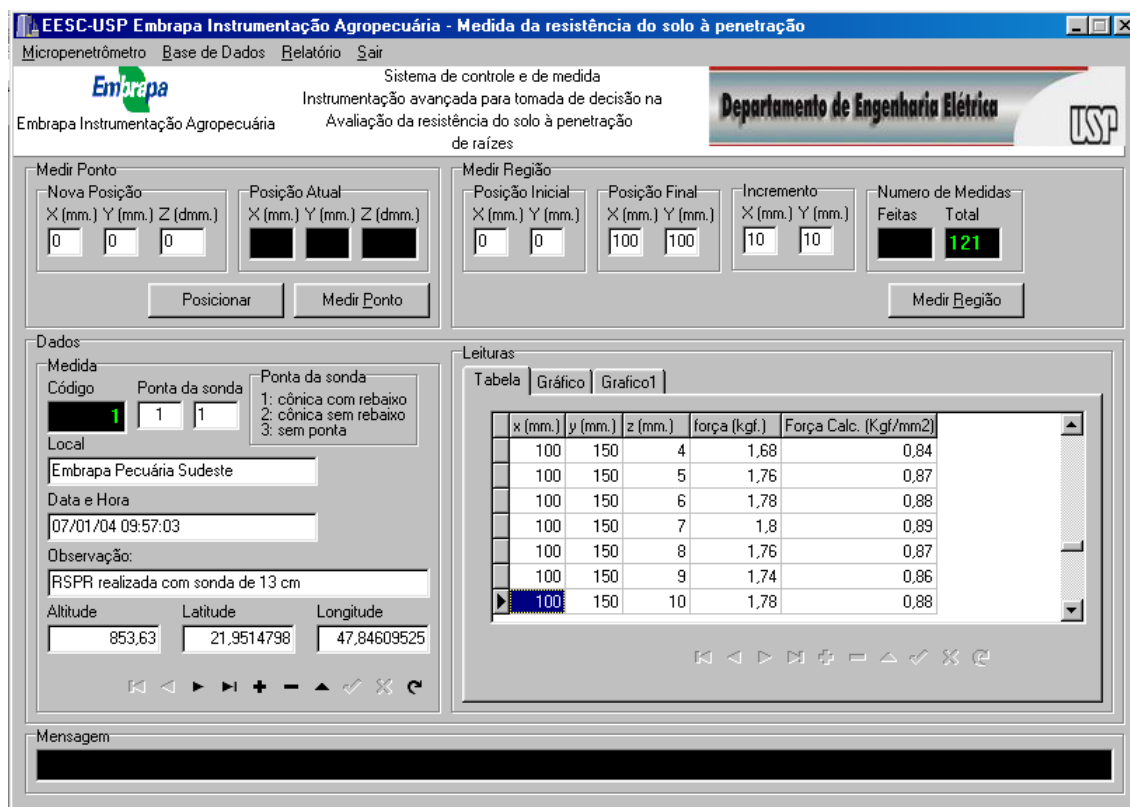


Figura 4.27 : Ilustração de parte dos resultados de coleta de campo para sonda de 13 cm, com medidas de resistência do solo à penetração de raízes.

Tabela 4.15 : Dados reais coletados em campo para sonda de 13 cm, posição (80,50) e (140,110).

| Cód.     | X       | Y  | Z  | Força |      | Cód.     | X       | Y   | Z   | Força |      |
|----------|---------|----|----|-------|------|----------|---------|-----|-----|-------|------|
| Leituras | Medidas | Mm | Mm | mm    | Kg   | Leituras | medidas | mm  | mm  | mm    | Kg   |
| 8779     | 1       | 80 | 50 | 0,0   | 0    | 15511    | 1       | 140 | 110 | 0,0   | 0    |
| 8780     | 1       | 80 | 50 | 2,0   | 0,02 | 15512    | 1       | 140 | 110 | 2,0   | 0    |
| 8781     | 1       | 80 | 50 | 4,0   | 0,02 | 15513    | 1       | 140 | 110 | 4,0   | 0    |
| 8782     | 1       | 80 | 50 | 6,0   | 0,04 | 15514    | 1       | 140 | 110 | 6,0   | 0,02 |
| 8783     | 1       | 80 | 50 | 8,0   | 0,02 | 15515    | 1       | 140 | 110 | 8,0   | 0,02 |
| 8784     | 1       | 80 | 50 | 10,0  | 0,02 | 15516    | 1       | 140 | 110 | 10,0  | 0    |
| 8785     | 1       | 80 | 50 | 12,0  | 0,13 | 15517    | 1       | 140 | 110 | 12,0  | 0,02 |
| 8786     | 1       | 80 | 50 | 14,0  | 0,09 | 15518    | 1       | 140 | 110 | 14,0  | 0    |
| 8787     | 1       | 80 | 50 | 16,0  | 0,11 | 15519    | 1       | 140 | 110 | 16,0  | 0,04 |
| 8788     | 1       | 80 | 50 | 18,0  | 0,11 | 15520    | 1       | 140 | 110 | 18,0  | 0    |
| 8789     | 1       | 80 | 50 | 20,0  | 0,15 | 15521    | 1       | 140 | 110 | 20,0  | 0,04 |
| 8790     | 1       | 80 | 50 | 22,0  | 0,23 | 15522    | 1       | 140 | 110 | 22,0  | 0,02 |
| 8791     | 1       | 80 | 50 | 24,0  | 0,3  | 15523    | 1       | 140 | 110 | 24,0  | 0,09 |
| 8792     | 1       | 80 | 50 | 26,0  | 0,42 | 15524    | 1       | 140 | 110 | 26,0  | 0,25 |
| 8793     | 1       | 80 | 50 | 28,0  | 0,51 | 15525    | 1       | 140 | 110 | 28,0  | 0,38 |
| 8794     | 1       | 80 | 50 | 30,0  | 0,6  | 15526    | 1       | 140 | 110 | 30,0  | 0,45 |
| 8795     | 1       | 80 | 50 | 32,0  | 0,74 | 15527    | 1       | 140 | 110 | 32,0  | 0,55 |
| 8796     | 1       | 80 | 50 | 34,0  | 0,81 | 15528    | 1       | 140 | 110 | 34,0  | 0,66 |
| 8797     | 1       | 80 | 50 | 36,0  | 0,94 | 15529    | 1       | 140 | 110 | 36,0  | 0,7  |
| 8798     | 1       | 80 | 50 | 38,0  | 1,02 | 15530    | 1       | 140 | 110 | 38,0  | 0,68 |
| 8799     | 1       | 80 | 50 | 40,0  | 1,08 | 15531    | 1       | 140 | 110 | 40,0  | 0,79 |

|      |   |    |    |       |      |       |   |     |     |       |      |
|------|---|----|----|-------|------|-------|---|-----|-----|-------|------|
| 8800 | 1 | 80 | 50 | 42,0  | 1,21 | 15532 | 1 | 140 | 110 | 42,0  | 0,89 |
| 8801 | 1 | 80 | 50 | 44,0  | 1,3  | 15533 | 1 | 140 | 110 | 44,0  | 0,93 |
| 8802 | 1 | 80 | 50 | 46,0  | 1,38 | 15534 | 1 | 140 | 110 | 46,0  | 0,94 |
| 8803 | 1 | 80 | 50 | 48,0  | 1,44 | 15535 | 1 | 140 | 110 | 48,0  | 0,98 |
| 8804 | 1 | 80 | 50 | 50,0  | 1,47 | 15536 | 1 | 140 | 110 | 50,0  | 1,04 |
| 8805 | 1 | 80 | 50 | 52,0  | 1,53 | 15537 | 1 | 140 | 110 | 52,0  | 1,08 |
| 8806 | 1 | 80 | 50 | 54,0  | 1,55 | 15538 | 1 | 140 | 110 | 54,0  | 1,13 |
| 8807 | 1 | 80 | 50 | 56,0  | 1,61 | 15539 | 1 | 140 | 110 | 56,0  | 1,21 |
| 8808 | 1 | 80 | 50 | 58,0  | 1,68 | 15540 | 1 | 140 | 110 | 58,0  | 1,27 |
| 8809 | 1 | 80 | 50 | 60,0  | 1,64 | 15541 | 1 | 140 | 110 | 60,0  | 1,3  |
| 8810 | 1 | 80 | 50 | 62,0  | 1,7  | 15542 | 1 | 140 | 110 | 62,0  | 1,29 |
| 8811 | 1 | 80 | 50 | 64,0  | 1,7  | 15543 | 1 | 140 | 110 | 64,0  | 1,27 |
| 8812 | 1 | 80 | 50 | 66,0  | 1,72 | 15544 | 1 | 140 | 110 | 66,0  | 1,27 |
| 8813 | 1 | 80 | 50 | 68,0  | 1,72 | 15545 | 1 | 140 | 110 | 68,0  | 1,32 |
| 8814 | 1 | 80 | 50 | 70,0  | 1,74 | 15546 | 1 | 140 | 110 | 70,0  | 1,34 |
| 8815 | 1 | 80 | 50 | 72,0  | 1,76 | 15547 | 1 | 140 | 110 | 72,0  | 1,34 |
| 8816 | 1 | 80 | 50 | 74,0  | 1,78 | 15548 | 1 | 140 | 110 | 74,0  | 1,34 |
| 8817 | 1 | 80 | 50 | 76,0  | 1,78 | 15549 | 1 | 140 | 110 | 76,0  | 1,34 |
| 8818 | 1 | 80 | 50 | 78,0  | 1,72 | 15550 | 1 | 140 | 110 | 78,0  | 1,42 |
| 8819 | 1 | 80 | 50 | 80,0  | 1,76 | 15551 | 1 | 140 | 110 | 80,0  | 1,44 |
| 8820 | 1 | 80 | 50 | 82,0  | 1,76 | 15552 | 1 | 140 | 110 | 82,0  | 1,4  |
| 8821 | 1 | 80 | 50 | 84,0  | 1,72 | 15553 | 1 | 140 | 110 | 84,0  | 1,47 |
| 8822 | 1 | 80 | 50 | 86,0  | 1,72 | 15554 | 1 | 140 | 110 | 86,0  | 1,42 |
| 8823 | 1 | 80 | 50 | 88,0  | 1,68 | 15555 | 1 | 140 | 110 | 88,0  | 1,55 |
| 8824 | 1 | 80 | 50 | 90,0  | 1,7  | 15556 | 1 | 140 | 110 | 90,0  | 1,57 |
| 8825 | 1 | 80 | 50 | 92,0  | 1,76 | 15557 | 1 | 140 | 110 | 92,0  | 1,55 |
| 8826 | 1 | 80 | 50 | 94,0  | 1,91 | 15558 | 1 | 140 | 110 | 94,0  | 1,63 |
| 8827 | 1 | 80 | 50 | 96,0  | 2,08 | 15559 | 1 | 140 | 110 | 96,0  | 1,57 |
| 8828 | 1 | 80 | 50 | 98,0  | 2,06 | 15560 | 1 | 140 | 110 | 98,0  | 1,64 |
| 8829 | 1 | 80 | 50 | 100,0 | 2,17 | 15561 | 1 | 140 | 110 | 100,0 | 1,91 |
| 8830 | 1 | 80 | 50 | 102,0 | 2,27 | 15562 | 1 | 140 | 110 | 102,0 | 2    |
| 8831 | 1 | 80 | 50 | 104,0 | 2,44 | 15563 | 1 | 140 | 110 | 104,0 | 2,1  |
| 8832 | 1 | 80 | 50 | 106,0 | 2,48 | 15564 | 1 | 140 | 110 | 106,0 | 2,08 |
| 8833 | 1 | 80 | 50 | 108,0 | 2,46 | 15565 | 1 | 140 | 110 | 108,0 | 2,1  |
| 8834 | 1 | 80 | 50 | 110,0 | 2,61 | 15566 | 1 | 140 | 110 | 110,0 | 2,1  |
| 8835 | 1 | 80 | 50 | 112,0 | 2,53 | 15567 | 1 | 140 | 110 | 112,0 | 2,06 |
| 8836 | 1 | 80 | 50 | 114,0 | 2,46 | 15568 | 1 | 140 | 110 | 114,0 | 2,02 |
| 8837 | 1 | 80 | 50 | 116,0 | 2,4  | 15569 | 1 | 140 | 110 | 116,0 | 2,02 |
| 8838 | 1 | 80 | 50 | 118,0 | 2,29 | 15570 | 1 | 140 | 110 | 118,0 | 2    |
| 8839 | 1 | 80 | 50 | 120,0 | 2,25 | 15571 | 1 | 140 | 110 | 120,0 | 2,08 |
| 8840 | 1 | 80 | 50 | 122,0 | 2,25 | 15572 | 1 | 140 | 110 | 122,0 | 2,06 |
| 8841 | 1 | 80 | 50 | 124,0 | 2,23 | 15573 | 1 | 140 | 110 | 124,0 | 2,17 |
| 8842 | 1 | 80 | 50 | 126,0 | 2,32 | 15574 | 1 | 140 | 110 | 126,0 | 2,4  |
| 8843 | 1 | 80 | 50 | 128,0 | 2,46 | 15575 | 1 | 140 | 110 | 128,0 | 2,57 |
| 8844 | 1 | 80 | 50 | 130,0 | 2,76 | 15576 | 1 | 140 | 110 | 130,0 | 2,7  |

A figura 4.28, ilustra a variação da resistência do solo à penetração e raízes para a coordenada X=110 e Y=60, em função da profundidade Z, no intervalo de 0 a 130 mm.



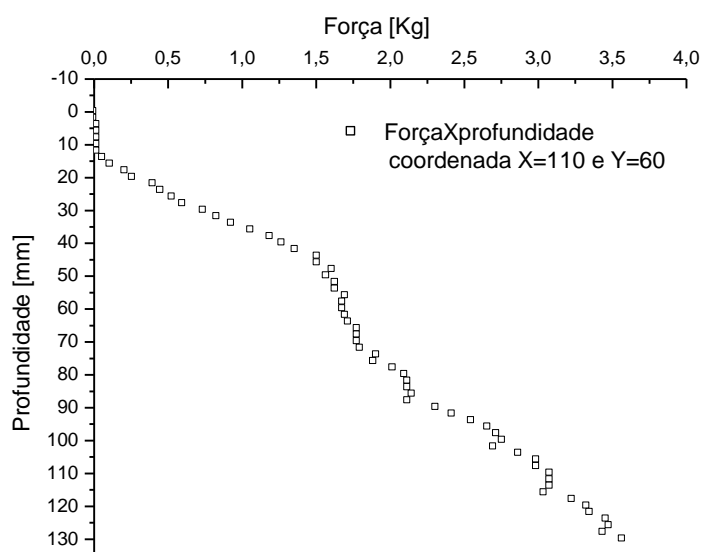




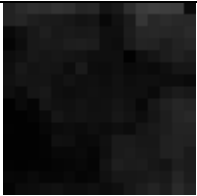
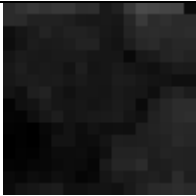
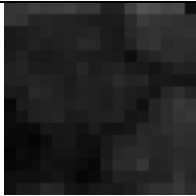
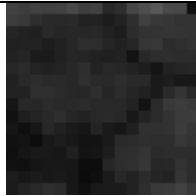
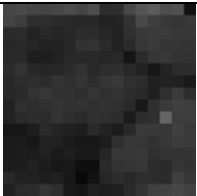
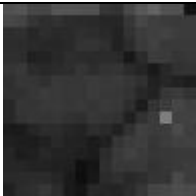
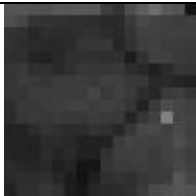
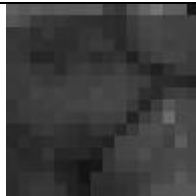
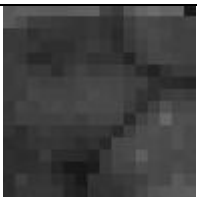
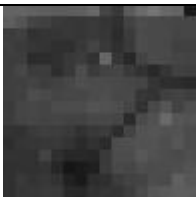
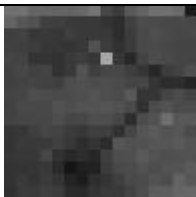
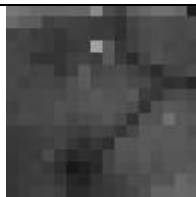
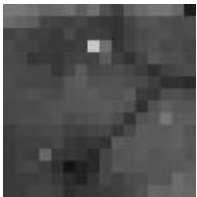
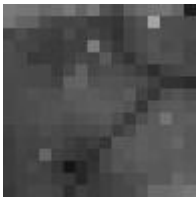
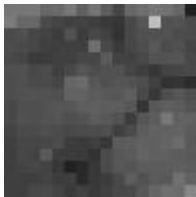
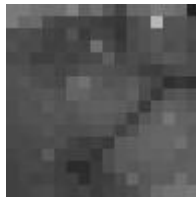
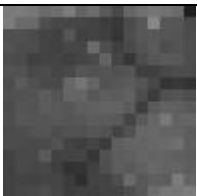
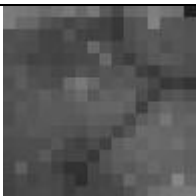
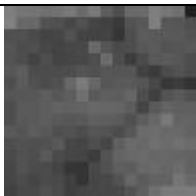
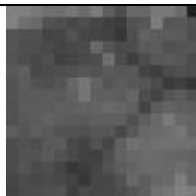
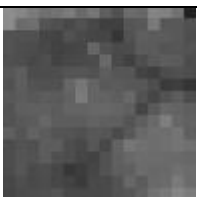
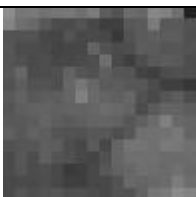
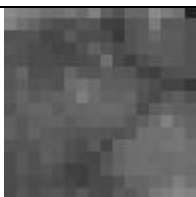
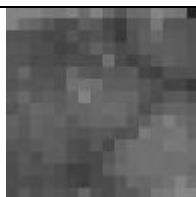


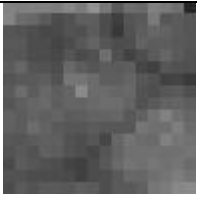
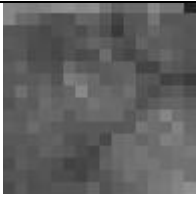
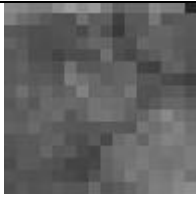
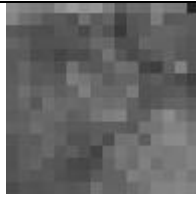
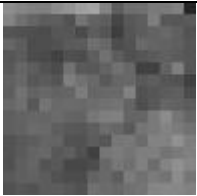
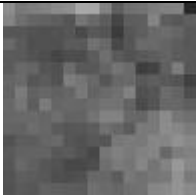
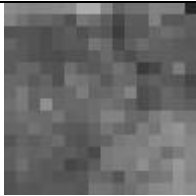
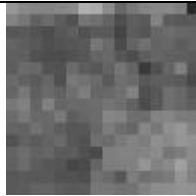
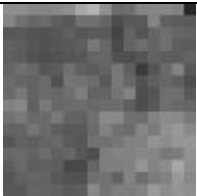
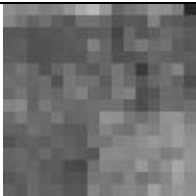
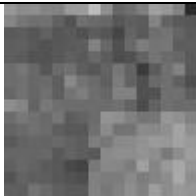
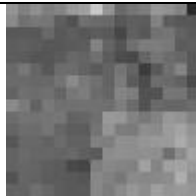
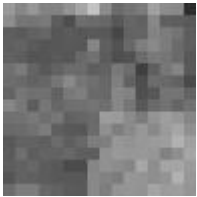
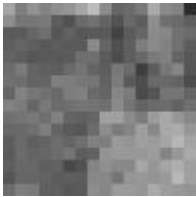
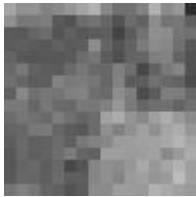
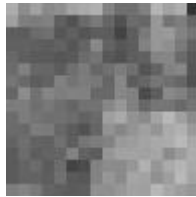
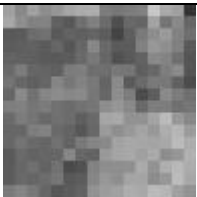
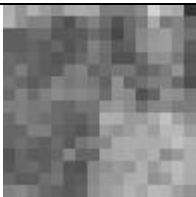
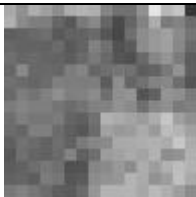
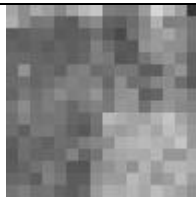
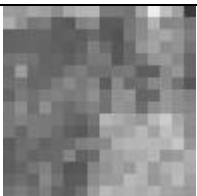
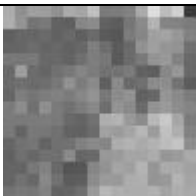
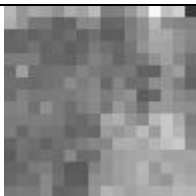
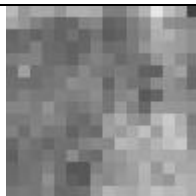
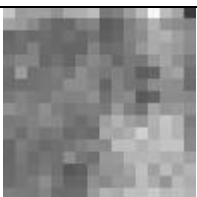
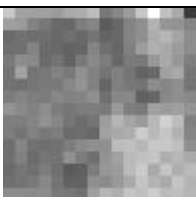
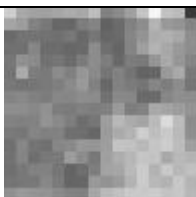
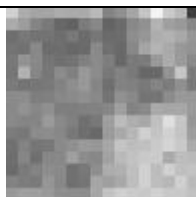
Figura 4.28 : Variação da resistência do solo à penetração de raízes para a sonda de 13 cm em função da profundidade Z, para as coordenadas X=110 e Y=60.

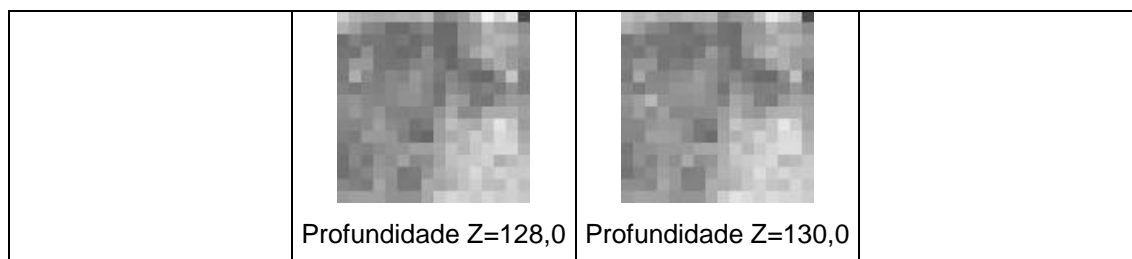
A seqüência de mapas bidimensionais, gerados no ensaio, podem ser observadas na tabela 4.16.

Tabela 4.16 : Seqüência de mapas bidimensionais das medidas de resistência do solo à penetração de raízes para os dados coletados em campo para a sonda de 13 cm, no intervalo de Z=0,0 a Z=130,0, medidas em milímetros.

|                    |                     |                     |                     |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                    |                     |                     |                     |
| Profundidade z=0,0 | Profundidade Z=2,0  | Profundidade Z=4,0  | Profundidade Z=6,0  |
|                    |                     |                     |                     |
| Profundidade Z=8,0 | Profundidade Z=10,0 | Profundidade Z=12,0 | Profundidade Z=14,0 |

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
|    |    |    |    |
| Profundidade Z=16,0   | Profundidade Z=18,0   | Profundidade Z=20,0  | Profundidade Z=22,0   |
|    |    |    |    |
| Profundidade Z=24,0   | Profundidade Z=26,0   | Profundidade Z=28,0  | Profundidade Z=30,0   |
|    |    |    |    |
| Profundidade Z=32,0   | Profundidade Z=34,0   | Profundidade Z=36,0  | Profundidade Z=38,0   |
|   |   |   |   |
| Profundidade Z=40,0   | Profundidade Z=42,0   | Profundidade Z=44,0  | Profundidade Z=46,0   |
|  |  |  |  |
| Profundidade Z=48,0   | Profundidade Z=50,0   | Profundidade Z=52,0  | Profundidade Z=54,0   |
|  |  |  |  |
| Profundidade Z=56,0   | Profundidade Z=58,0   | Profundidade Z=60,0  | Profundidade Z=62,0   |
|  |  |  |  |
| Profundidade Z=64,0   | Profundidade Z=66,0   | Profundidade Z=68,0  | Profundidade Z=70,0   |

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| <br>Profundidade Z=72,0    | <br>Profundidade Z=74,0    | <br>Profundidade Z=76,0    | <br>Profundidade Z=78,0    |
| <br>Profundidade Z=80,0    | <br>Profundidade Z=82,0    | <br>Profundidade Z=84,0    | <br>Profundidade Z=86,0    |
| <br>Profundidade Z=88,0    | <br>Profundidade Z=90,0    | <br>Profundidade Z=92,0    | <br>Profundidade Z=94,0    |
| <br>Profundidade Z=96,0   | <br>Profundidade Z=98,0   | <br>Profundidade Z=100,0  | <br>Profundidade Z=102,0  |
| <br>Profundidade Z=104,0 | <br>Profundidade Z=106,0 | <br>Profundidade Z=108,0 | <br>Profundidade Z=110,0 |
| <br>Profundidade Z=112,0 | <br>Profundidade Z=114,0 | <br>Profundidade Z=116,0 | <br>Profundidade Z=118,0 |
| <br>Profundidade Z=120,0 | <br>Profundidade Z=122,0 | <br>Profundidade Z=124,0 | <br>Profundidade Z=126,0 |



No ensaio para a sonda de 13 cm, observou-se ao longo de toda a profundidade uma variação praticamente homogênea da resistência ao avanço da sonda, o que também o seria para raízes de plantas.

A informação volumétrica da resistência do solo à penetração de raízes obtida no ensaio de campo a partir dos mapas bidimensionais para a sonda de 13cm, com seus cortes transversal, coronal, sagital, é vista na figura 4.29.

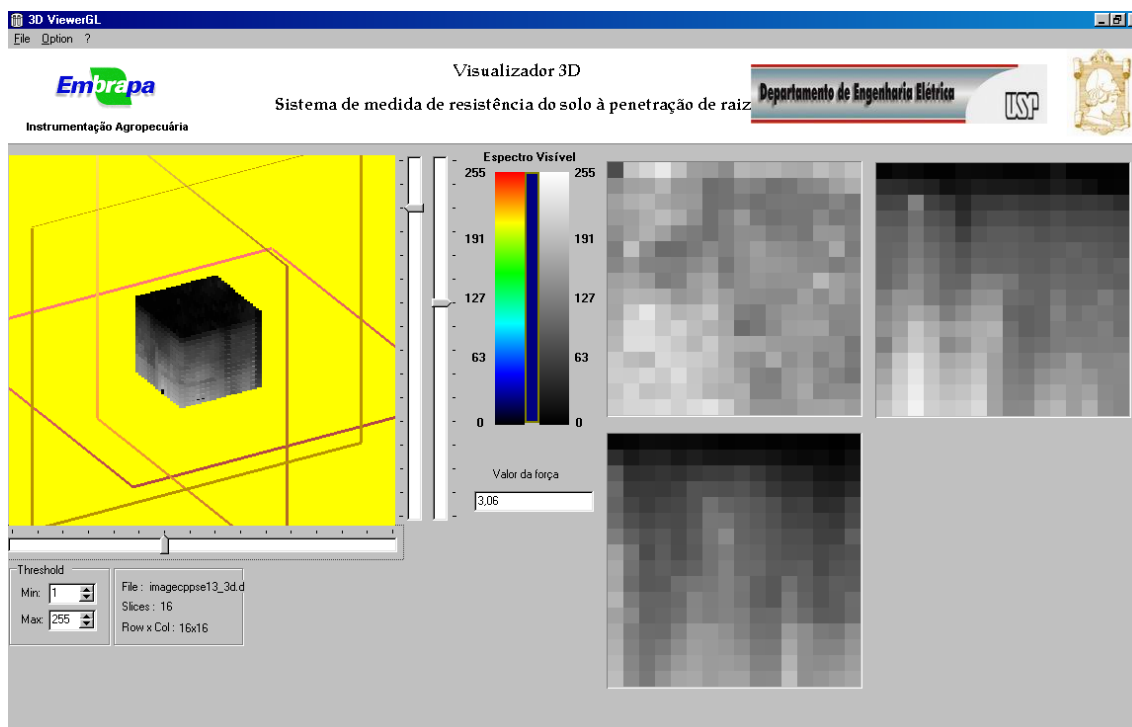


Figura 4.29 : Mapa tridimensional dos dados de resistência do solo à penetração de raízes coletados no ensaio de campo para sonda de 13cm.

As figuras 4.30, 4.31 e 4.32 ilustram situações distintas, da resistência do solo à penetração de raízes, de acordo com a profundidade em que se localizam as regiões. Na figura 4.30 é apresentada a região do ensaio de campo onde há alta resistência do solo à penetração de raízes, ou seja, faixa de 35,60 kgf a 45,20 kgf. Na figura 4.31 é visualizada a região onde houve a ocorrência de médios valores de resistência do solo à penetração de raízes, ou seja na faixa de 19,50 kgf a 27,50 kgf. Na figura 4.32 é visualizada a região do experimento onde ocorreu baixa resistência do solo à penetração de raízes, ou seja, faixa de 0,18 kgf a 8,51 kgf. As regiões analisadas foram selecionadas com o uso de um filtro *threshold*, cujo ajuste de limiar pode ser selecionado pelo usuário.

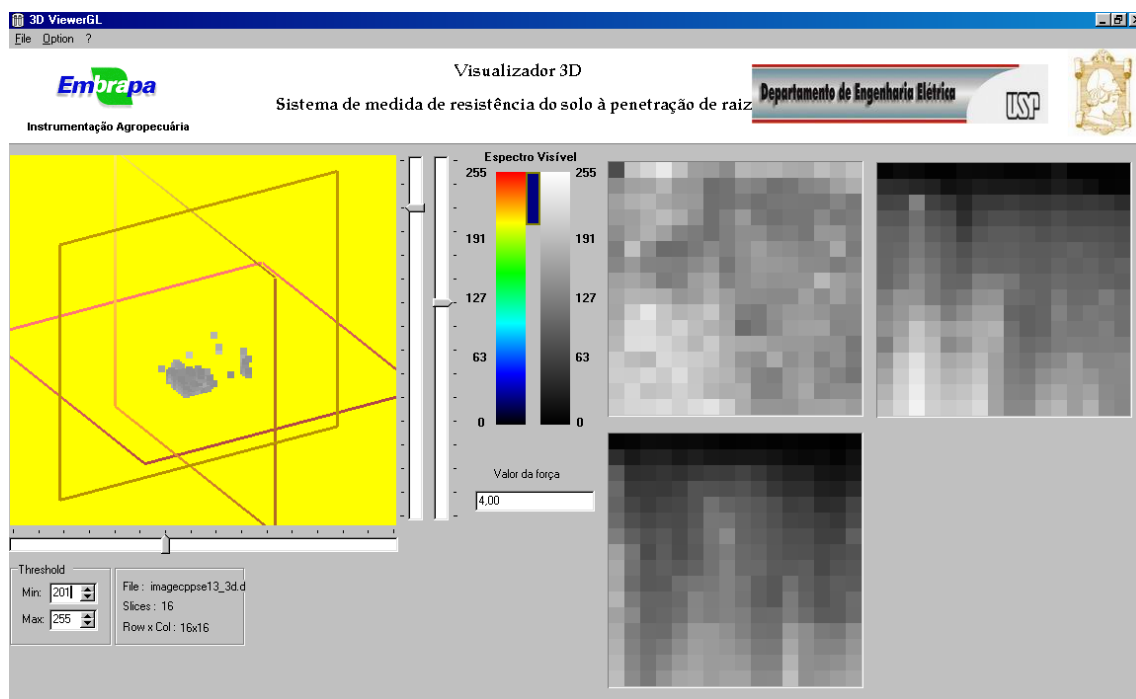


Figura 4.30 : Ensaio de campo para a sonda de 13 cm: região de alta resistência do solo à penetração de raízes (de 35,60 kgf a 45,20 kgf).

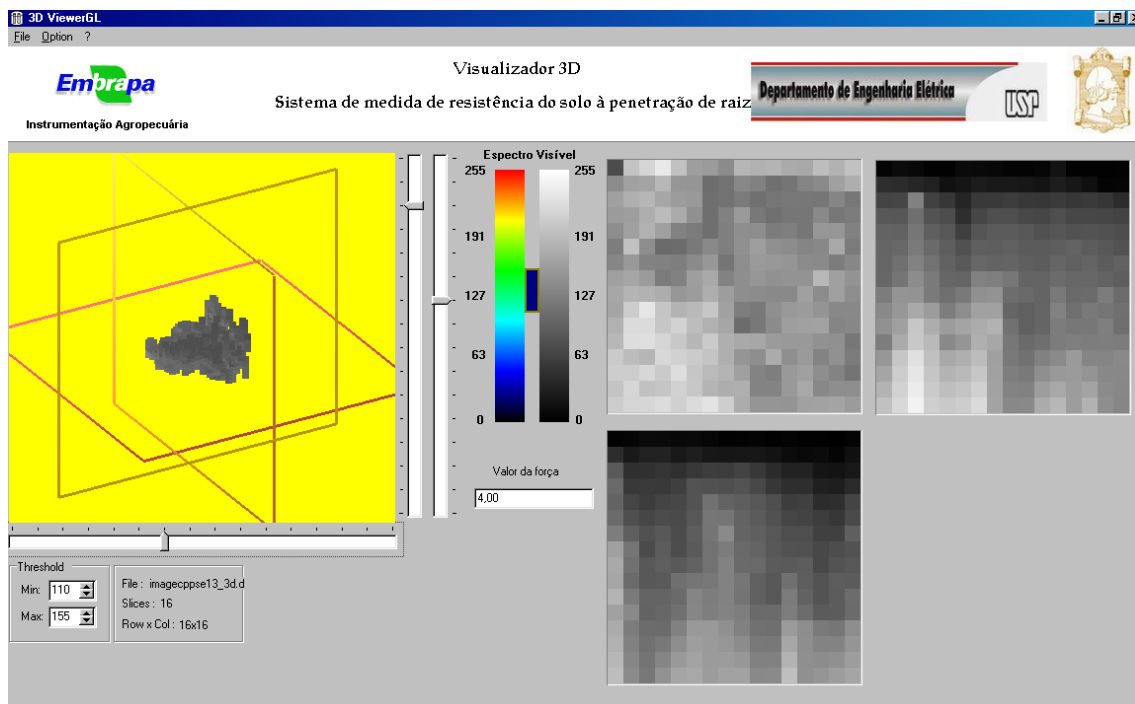


Figura 4.31 : Ensaio de campo para a sonda de 13 cm: região de valores médios de resistência do solo à penetração de raízes (de 19,50 kgf a 27,50 kgf).

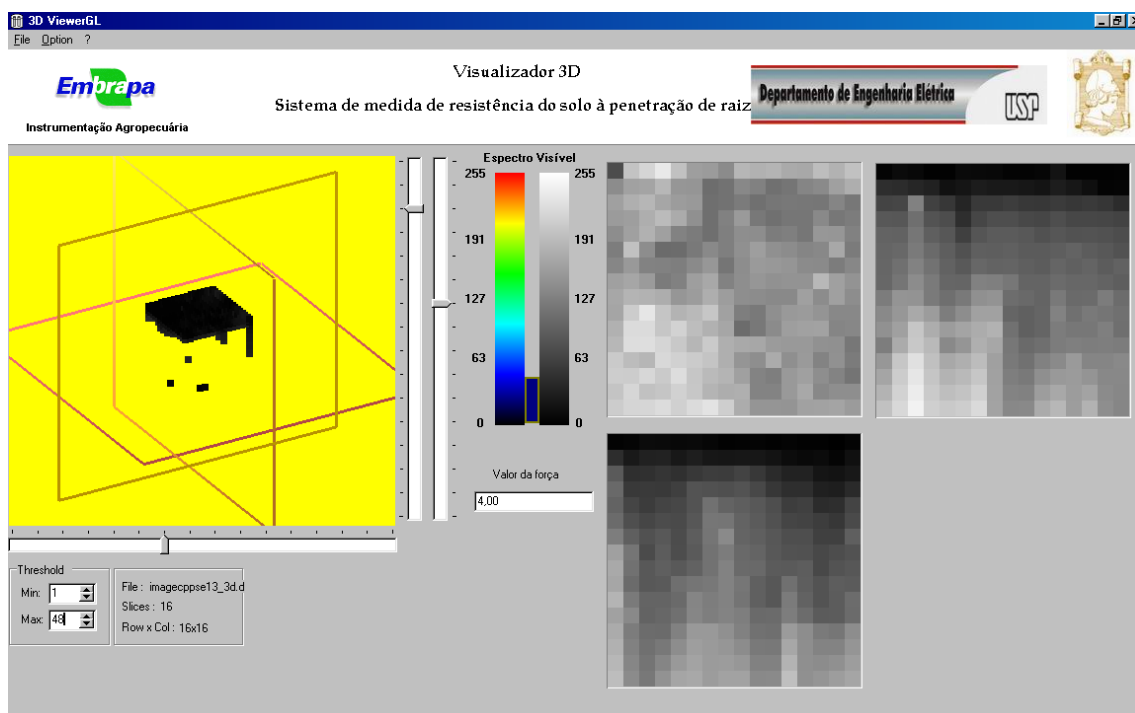


Figura 4.32 : Ensaio de campo para a sonda de 13 cm: região de baixa resistência do solo à penetração de raízes (de 0,18 kgf a 8,51 kgf).

#### **4.10 Avaliação da estrutura mecânica do instrumento em condições de campo**

A estrutura mecânica desenvolvida possibilitou o rápido transporte da instrumentação, facilitando a sua acomodação em um veículo, como também em campo, com o auxílio dos manípulos localizadas nas extremidades da armação. Os três pés de sustentação, que são ajustáveis, possibilitaram o rápido nivelamento do sistema.

O sistema de deslocamento e posicionamento da microsonda, em campo, atuou satisfatoriamente, apesar de ter sido observado a necessidade de um isolamento das guias com uma proteção sanfonado para evitar que agregados de solo possam prejudicar os rolamentos internos, utilizados para o deslizamento nas guias lineares.

O peso de toda a estrutura é de 60,0 kg, o que auxiliou como lastro para a microsonda, permitindo a realização das medidas com estabilidade mecânica.

#### **4.11 Avaliação do sistema eletrônico em condições de campo**

O sistema eletrônico, alojado em uma caixa de blindagem EK/EKF de alumínio com sistema de vedação que assegura compatibilidade eletromagnética, marca TAUNUS, profundidade de 100 mm, comprimento 266 mm e largura de 166 mm, na lateral da estrutura, próxima a origem das coordenadas de localização da microsonda, atuou de forma satisfatória em todo o tempo de medida, não havendo sobre aquecimento ou algum outro dano, estando bem isolado das condições ambientais a que foi submetido, tal como temperatura, umidade e impurezas do ar.

O sistema eletrônico de processamento com o microcontrolador 80535, executou satisfatoriamente as instruções e comandos a ele enviado, atribuindo ao sistema a configuração de um sistema inteligente com atributos de capacidade de comunicação remota, tanto de transmissão como de recepção

por via serial; a facilidade de calibração e de diagnóstico, realizada em conjunto com o computador central, possibilitado através dos comandos da interface com usuário; a informação de estado, realizado com as respostas aos comandos a ele transmitido; visualização das coordenadas de localização da microsonda no ato das medidas e transmissão e visualização em tempo real das medidas realizadas.

A fixação do sistema eletrônico na caixa, atrás da placa de potência, dificultou em parte o seu manuseio quanto aos ajustes do programa residente instalado na memória EPROM 27256. Assim, com vista a facilitar trabalhos de futuras manutenções, inclusive as preventivas, esta fixação poderá ser adequada a um outro desenho que proporcione melhor flexibilidade mecânica.

#### **4.12 Avaliação da interface com o usuário**

Conforme descrito atrás, a interface foi desenvolvida usando o ambiente visual *C++ Builder 5.0* da *Borland*, buscando uma flexibilidade operativa para maior interação com o usuário.

A tela principal do sistema, possui todas as instruções de menu e de controle do sistema, possibilitando ao usuário uma rápida interação com o sistema, possuindo também visualização das coordenadas em que se encontra a microsonda na realização das medidas e também dos dados, tal como, em tabelas ou em gráfico em tempo real.

O sistema mantém o usuário informado sobre o que se está fazendo e quando termina de executar alguma ordem ou tarefa, através de uma barra de mensagem.

A organização dos dados foi feita em forma de um banco de dados, sendo utilizado o banco de dados *PARADOX*, que já vem incorporado no ambiente de desenvolvimento do *C++ Builder 5.0*.



Para a comunicação entre o computador central e o sistema microcontrolado, foram desenvolvidos programas computacionais usando as ferramentas de programação chamadas de *THREAD*, que são programas que rodam paralelo ao programa principal, mas não aparecendo para o usuário.

Estes programas computacionais ficam monitorando a porta serial continuamente, um para a recepção e outro para a transmissão, independente do programa principal, deixando-o livre para outras funções e não paralisando o computador central exclusivamente para monitorar a porta serial.

A visualização viabilizada em forma de tabela ou de gráficos, é obtido em tempo quase real. Entretanto uma outra interface possibilita a visualização desses dados em forma de mapas bidimensionais que apresentam informações pela profundidade da camada de medida, conforme observado na tabela 4.12, facilitando a visualização das regiões de maior ou menor resistência do solo à penetração de raízes.

A partir dos mapas bidimensionais é possível através de outra interface com o usuário, a visualização volumétrica, possibilitando ao usuário conhecer o interior da região de medida. A interface fornece tanto o mapa tridimensional como os cortes transversal, coronal e sagital da região de medida, como a possibilidade de navegar no volume visualizado.

#### **4.13 Sínteses dos resultados obtidos e Conclusões**

A partir dos resultados e das discussões apresentadas, as seguintes conclusões parciais relativas ao desenvolvimento da instrumentação para o auxílio a tomada de decisão na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração de raízes, podem ser enumeradas :

Conforme resultado apresentado, pode-se concluir que a interface com o usuário foi desenvolvida visando ser amigável viabilizando ferramenta de análise para a leitura de resultados sobre resistência do solo à penetração de

raízes em forma de tabela, gráfico ou mapas bidimensionais e tridimensionais, bem como viabilizando a impressão de relatórios de ensaio.

Conforme resultado apresentado e discussões, pode-se concluir que para a palavra do A/D do conversor analógico digital  $\geq 0$  e  $< 20$  o erro médio percentual foi da ordem de 12,73% e palavras  $\geq 20$  e  $\leq 255$ , o erro médio percentual foi da ordem de 4,29%. Estes resultados indicam a acuracidade eletrônica nos intervalos das palavras consideradas. O erro médio percentual de 12,73% encontrado para avaliação da acuracidade eletrônica entre as palavras  $\geq 0$  e  $< 20$  é atribuído à figura de mérito do sinal adquirido da ponte de Wheatstone com a célula de carga da microsonda;

Conforme resultado, pode-se concluir que há linearidade no processo de conversão, com baixo erro observado ao longo de toda a faixa, o que envolve relacionar linearmente a tensão lida como decorrência da força mecânica aplicada a célula de carga a palavra de A/D e a medida de resistência do solo à penetração de raízes. Os erros percentuais observados nas tabelas 4.2 a 4.6, tomados pelas médias dos valores apresentados foram respectivamente de 28,9 % para a faixa entre 0,00 kg a 0,10 kg (0,00 kgf a 0,98 kgf), 2,2 % para a faixa de 0,20 kg a 0,50 kg (1,96 kgf a 4,90 kgf), abaixo de 1% para a faixa de 0,60 kg a 5,00 kg (5,88 kgf a 49,03 kgf). Observou-se que para valores de conversão iguais ou acima de 0,16 kg o erro percentual médio ficou abaixo de 5%. Logo a resolução do instrumento é caracterizado como 0,16 kg (1,57 kgf).

Conforme resultado apresentado, com o ensaio de uma amostra coletada com cilindro amostrador, pode-se concluir que o instrumento flexibiliza o levantamento da variação da resistência do solo à penetração de raízes no perfil do solo considerando um sítio de coordenada (x,y), com informação em tempo quase real, tanto em forma de tabela como em formato gráfico e relatório fornecido em folha normalizada;

Conforme resultados apresentados e discussões, pode-se concluir que a geração de mapas bidimensionais RSPRxPosição, a uma dada profundidade,

demonstram o potencial do sistema para a avaliação da resistência do solo à penetração de raízes em ambiente que envolve variabilidade espacial, o que auxilia a tomada de decisão no manejo baseado no conceito da agricultura de precisão;

Conforme resultados apresentados e discussões, pode-se concluir que a geração de mapas tridimensionais de RSPRxPosiçãoxProfundidade, demonstram o potencial do sistema para avaliação da resistência do solo à penetração de raízes em ambiente que envolve variabilidade espacial na área e no perfil do solo, de amostras laboratoriais, o que auxilia a tomada de decisão na avaliação laboratorial fundamentada nos aspectos reais da heterogeneidade, ou não, de amostras de solos não deformadas;

Conforme resultados apresentados e discussões, pode-se concluir que a geração de mapas tridimensionais de RSPRxPosiçãoxProfundidade, demonstraram o potencial do sistema para avaliação da resistência do solo à penetração de raízes em ambiente de campo, que envolve variabilidade espacial na área e no perfil do solo, o que auxilia a tomada de decisão em manejo baseado no conceito da agricultura de precisão;

A opção pelo uso de *Thread*, mostrou-se adequada à aplicação para o Win32, onde, devido, a utilização de um sistema de sincronismo eficiente, mesmo em face aos múltiplos acessos a regiões críticas de memória, garantiu-se estabilidade, repetitividade e confiabilidade operativa ao sistema;

A integração do sistema de programação com as suas diferentes partes, envolvendo o algoritmo de controle do microcontrolador 80535 e do aplicativo Win32, viabilizou a execução de tarefas necessárias ao funcionamento da instrumentação para a medida da resistência do solo à penetração de raízes;

Conforme resultados apresentados, decorrente da validação instrumental, pode-se concluir que a opção pelo uso de um microcontrolador da família 8051, o N80535 e o desenvolvimento de sua programação em ambiente

Reads51, viabilizou a maximização dos recursos disponibilizados nesta plataforma e programação estruturada.

Adicionalmente, como conclusão geral, considera-se, a partir do conjunto de conclusões parciais, acima mencionadas, que o presente desenvolvimento de um instrumento para o auxílio a tomada de decisão em processos que envolve a avaliação da resistência do solo à penetração de raízes, constitui-se em uma nova e avançada ferramenta, que viabiliza mediante análise em tempo quase real, incluindo programações, informações que levam em conta a variabilidade espacial na área e no perfil, da compactação natural ou artificial, de amostras de solos de laboratório ou diretamente no campo agrícola.

Através das ferramentas de visualização dos cortes sagitais e coronais, torna-se possível, não só a avaliação da resistência do solo à penetração de raízes com o avanço da microsonda no sentido vertical, como seu desenvolvimento no sentido horizontal. Através destes cortes as possíveis regiões que oferecem maior ou menor resistência à penetração de raízes podem ser observadas..

Os resultados com o uso desta instrumentação viabilizam a diminuição das várias fontes de incertezas nos métodos de medidas de resistência do solo à penetração de raízes, o que é de fundamental importância na otimização dos riscos dos processos agrícolas.

#### **4.14 Sugestões de trabalhos futuros**

- Desenvolvimento de um sistema de movimento do instrumento, com rodas ou pernas mecânicas, para uso em terrenos acidentados e baseado nos princípios da robótica e da visão artificial;
- Desenvolvimento de sistema de acoplamento do instrumento a uma máquina agrícola para deslocamento e medidas em campo;

- Desenvolvimento de sistema de sensores para medida de umidade do solo, pH e condutividade elétrica em conjunto com a medida da resistência do solo à penetração de raízes.

---

## Referências Bibliográficas.

- ADAMS, B.A.; YOUNG, B.D.; TOPP, G.C. (1998). Simultaneous measurement soil resistance and water content. *ASA-CSSA-SSSA Annual meeting*, Baltimore, Maryland, v.18, p.181, oct.1998.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, ASAE R 313.1 (1978), St. Joseph, MI, *Agricultural Engineers Yearbook os Standarts*, 2p.
- ASADY, G.H.; SMUCKER, A.J.M.; ADAMS, M.W. (1985). Seedling test for the quantitative measurement of root tolerances to compacted soil. *Crop Sci.*, Madison, v.25, p.290-293.
- ATKINSON, J. K. (1987) Communication protocols in instrumentation. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, London, v. 20, p. 484 491.
- AUBERTIN, G.M.; KARDOS, L.T. (1965). Root growth through porous media under controlled conditions. I. Effect of pore size and rigidity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, v.29, p.290-293.
- AYERS, P.D.; BOWEN, H.D. (1987). Predicting soil density using cone penetration resistance and moisture profile. *ASAE Trans*, v.30, p.1331-1336.
- AYERS, P.D.; PERUMBAL, J.V. (1982). Moisture and density effects on cone index. *ASAE Trans.*, v.25(5), p.1169-1172.
- BALASTREIRE, L.A. (1987). *Máquinas Agrícolas*. São Paulo : Manole, 310p.
- BALASTREIRE, L.A.; AMARAL, J.R. (1994). Desenvolvimento e construção de um penetrógrafo eletrônico. Campinas, SP : SBEA, 12p., paper nr. 94-4-281.
- BALSANI, W. R. (1999) *Desenvolvimento de arquitetura inteligente para o monitoramento de silos agrícolas*. 203p. Dissertação ( Mestrado em

---

Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.(08/08/01)

BAUDER, J.W.; RANDALL, G.W.; SWANN, J.B. (1981). *Effects of four continuous tillage systems on mechanical impedance of a clay loam soil*. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:802-806.

BENGOUGH, A.G. (1992). *Penetrometer Resistance Equation: Its Derivation and the Effect of Soil Adhesion*. J. Agric. Engng Res., v. 53, p. 163-168.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. (1990). *Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses*. Journal of Soil Science, v. 41, p. 341-358.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E.; WILSON, G. (1991). The design, construction and use of a rotating-tip penetrometer. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v.48,p.223-227.

BOONE, F.R.; SMET, L.A.H. de; LOON, C.D. van (1985). The effect of a ploughpan and manure loam soils on potato growth. I. Physical properties and rooting patterns. *Potato Res.*, Wageningen, v.28, p.295-314.

BOWEN, H.D. (1981). Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G.F.; TAYLOR, H.M.; eds. *Modifying the root environment to reduce crop stress*. p.18-57, Michigan. (ASAE monograph, 4).

BRADFORD, J.M. (1980). The penetration resistance in a soil with well-defined structural units. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:601-606.

BRADFORD, J.M. (1986). Penetrability. p. 463-478. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. 2<sup>nd</sup> ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

- BRADLEY, R.A.; DI CHRO, G. (1993). *The FBI Wavelet/Scalar Quantization Standar for Gray-Scale Fingerprint Image Compression*, Tech Report LA-UR-93-659, Los Alamos Nat'l Lab, Los Alamos.
- BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R.; SOJKA, R.E. (1997). Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil Till. Res.*, v.43, p.205-217.
- CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. G. dos; FONSECA, O. O. M. da; SANTOS, R. D.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. (1998) *Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP: levantamento semidetalhado, propriedades e potenciais*. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS; São Carlos: EMBRAPA-CPPSE, 1998. 95 p. (EMBRAPA-CNPS. Boletim de Pesquisa, 7; EMBRAPA-CPPSE. Boletim de Pesquisa, 2).
- CALLEBAUT, F.; GABRIELS, D.; MINJAUW, W.; De BOOT, M. (1985). Determination of soil surface strength with a needle-type penetrometer. *Soil and Tillage Res.* v.5, p.227-245.
- CAMARGO, O.A. (1997). *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas / Otavio Antonio Camargo , Luis Reynaldo Ferracciú Alleoni*. – Piracicaba: O.A. Camargo, L.R.F. Alleoni, 1997. 132p.:il.
- CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. (1991) *The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction, and tillage*. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Ed.) *Soil analysis: physical methods*. New York: Marcel Dekker. Cap. 9, p. 399-429.
- CAMPBELL, R.B.; REICOSKY, D.C.; DOTY, C.W. (1974). *Physical properties and tillage of paleudults in the southeastern coastal plains*. *Journal of Soil and Watter Conservation, Ankeny*, v. 29, p. 200.



- CARTER, L.M. (1967). Portable recording penetrometer measures soil strength profiles. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, MI, v.33, nr.6, p.348-349.
- CASSEL, D.K.; NELSON, L.A. (1979). *Variability of mechanical impedance in a tilled one-hectare field of Norfolk sandy loam*. *Soil Sci. Am. J.* 42:450-455.
- CASTRO NETO, M. de. (2003) *Serviços de informação agrícola na Web*. 7 f. Disponível em <<http://www.agroportal.pt/a/200/mneto.htm>>. Acessado em: 20 maio 2003.
- CIRRUS: 12/14/16-BIT, (2003) self-calibrating A/D converters. 1 f. Disponível em: <http://www.cirrus.com/en/products/pro/detail/P49.html> Acesso em Maio de 2003
- CRESTANA, S. (1985) *A tomografia computadorizada como um novo método para estudos da física da água no solo*. 140 f. Tese (Doutorado em Física Aplicada) – Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- CRESTANA, S.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. (1986) Using a computed tomography miniscanner in soil science. *Soil Science*, Baltimore, v. 142, n. 1, p. 56-61, Jul.
- CRESTANA, S.; GUIMARÃES, M.F.; JORG, L.A.C.; RALISH, R. TOZZI, C.L.; TORRE, A.; VAZ, C.M.P. (1994). Avaliação da distribuição de raízes no solo auxiliada por processamento de imagens digitais. *R. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.18, p.365-371.
- CRUVINEL, P. E. (1987) *Minitomógrafo de raio-X e raio-gama computadorizado para aplicações multidisciplinares*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). 329 f. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade de Campinas, Campinas.

- CRUVINEL, P. E.; PUGSLEY, L.; CARAMORI, P. H. (2002) *Modelagem para otimização de zona de risco em sistemas agrícolas*. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. *Anais...* [Cuiabá: s.n.].
- CRUVINEL, P.E. (1989). Projeto e construção de um micropenetrômetro. Embrapa. São Carlos.
- CRUVINEL, P.E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. (1990) X-ray and gamma-ray computerized minitomograph scanner for soil science. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, New York, v. 39, n. 5, p. 745-750, Oct.
- DAVID, R. (1992). *OpenGL Reference Manual: The Official Reference Document For OpenGL*, release 1, Addison Wesley.
- DONOHO, D. (1993). *Nonlinear Wavelet Method for Recovery Signal, Densities and Spectra form Indirect and Noisy Data*, Proceeding of Symposia in Applied Mathematics, v. 47, Deubechies ed. Amer. Math. Providence, p. 173-205.
- EHLERS, W.; KOPHEV, V.; HESSE, F.; BOHM, W. (1983). *Penetration resistance and root growth of oats in tillage and untilage loess soil*. Soil and Tillage Research, Amsterdam, v.3, p.261-275.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária. INAMASU, R. Y.; SILVA, A. M. da.; RABELLO, L.M.; CRUVINEL, P. E.; CORONA JUNIOR, N. *Módulo principal do coletor de dados para uso em campo*. BR n.MU7602399-0. 19 dezembro 1996.
- FARRELL, D.A.; GREACEN, E.L. (1966). *Resistance to penetration of fine probes in compressible soil*. Australian Journal of Soil Research. v. 4, p. 1-17.

- 
- FOLURONSO, O. A.; ROLSTON, D.E.; PRICHARD, T.; LOUIE, D.T. (1992). Soil surface strength and infiltration rate as affected by winter cover crops. *Soil Technology Cremlingem*, v5, p.189-197.
- GILL, W.R.; VANDERBERG, G.E. (1967). *Soil dynamics in tillage and traction*. Washington : U.S. Department of Agriculture, 511p.
- GRANT, C.D.; KAY, P.H.; GROENEVELT, P.H.; KIDD, G.E. (1985). Spectral analysis of micropenetrometer data to characterize soil structure. *Can. J. Soil Sci.*, v.65, p.789-804.
- GRAPS, A. (1995) *An introduction to Wavelets*, IEEE Computational Science and Engineering, v. 2, num 2, Summer, 18 p.
- HAGG, S.; CUMMINGS, M.; DAWKINS, J. (1998) *Management Information Systems for the Information Age*. Irwin/McGraw-Hill, Boston, Massachusetts.
- HAKANSSON, I.; REEDER, R.C. (1994). Subsoil compaction by vehicles with high axle-load extent, persistence and crop response. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.29, p.277-304.
- HENDRICK, J.G. (1969). Recording soil penetrometer. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v.14, nr.2, p.183-186.
- HOPKINS, R.M.; PATRICK, W.H. (1970). Combined effect of oxygen concentration and soil compaction on root penetration. *Soil Sci.*, Baltimore, v.108, p.408-413.
- HOWELL, S. K.; HAMILTON, T. D. S. (1990) Intelligent instrumentation. *Measurement Science and Technology*, Bristol, v. 1, p. 1265-1273.

---

JEFF MOLOFFE'S *OpenGL Windows Tutorial, Lesson 26* Disponível NeHe Productions (OpenGL) [URL://nehe.gamedev.net/tutorial/lesson26.asp](http://nehe.gamedev.net/tutorial/lesson26.asp) consultado: 23/05/2001.

KIHEL, E.J. (1979). Manual de edafologia. São Paulo, Ceres, 262p.

LARNEY, F.J.; HUFFMAN, R.L.; SCHULER, R.T.; TAYLOR, D.R.; KLADIVKO, E.J.; LOWERY, B. (1989). A portable, self-leveling, constant-rate cone penetrometer with computer-controlled data acquisition for tillage studies. *Soil and Tillage Res.* v.14, p.231-239.

LINS E SILVA, M.L.; SVERZUT, C.B.; MANTOVANI, E.C. (1995). Desenvolvimento e utilização de um penetrógrafo hidráulico com aquisição eletrônica de dados. Viçosa, MG : SBEA, 1995. 27 p., paper n. 95-4-305.

LINS E SILVA, Manfredo Luiz (1999). *Modelagem matemática na estimativa da densidade de um Latossolo Vermelho Escuro textur argilosa, pelo índice de cone*. Campinas. 161p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas.

LOURO, A. H. F. (1995) *Projeto de um sistema inteligente baseado no microcontrolador 80535 para aquisição de dados e controle em ambiente agropecuário*. 158 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Computação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

MACIEL JUNIOR, V.A. (1999) *Sistemas de cultivo de milho (ZEA MAYS L.) e seus efeitos no solo e na planta*. 147f: il. TESE (Mestrado em ciências agrárias e veterinárias) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista de Jaboticabal, São Paulo.

MANTOVANI, E.C. (1987). *Compactação do solo*. Inf. Agropec., Belo Horizonte, v.13, p.52-55, março 1987.

- MCKYES, E. (1985). *Soil cutting and tillage*. Netherlands : Elsevier Science Publishers B.V., Developments in Agricultural Engineering, 292p., v.10
- MCKYES, E. (1989). *Agricultural engineering soil mechanics* : Netherlands : Elsevier Science Publishers B.V., Developments in Agricultural Engineering, 292p.
- MICROCHIP: PIC16C715 device. 2 f. Disponível em: <<http://www.microchip.com/1010/pline/picmicro/category/embctrl/8kbytes/devic.../index.html>>. Acessado em: 26 maio 2003.
- MINATEL, E.R. (1997). *Desenvolvimento de Algoritmo para Reconstruir e Visualização Tridimensional de Imagens Tomográficas com uso de Técnicas Freqüências e Wavelets*. São Carlos, UFSCAR, Dissertação de Mestrado, 148 páginas.
- MIRREH, H.F.; KETCHESON, J.W. (1972). Influence of bulk density bulk density and matric pressure to soil resistance to penetration. *Can. Soil Sci*, v.52, p.477-483.
- MOREIRA, R.F.; DIAS, G.P.; FONTES, L.H.P. (1995). Penetrômetro com transdutor tipo anel para medição de índice de cone. Viçosa, MG : SBEA, 10p., paper nr. 95-4-365.
- NAIME, J.M. (2001) *Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não saturada do solo*. São Carlos. 146p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos (CRHEA). Universidade de São Paulo.
- NEWMAN, S.C; HUMMEL, J.W. (1999). Soil penetration resistance with moisture correction. ASAE/CSAE meeting, paper n.993028, p.18-21, Toronto, July 1999.

- OHU, J.O.; RAGHAVAN, G.S.V.; MCKYES, E. (1988). Cone index prediction of compacted soils. *ASAE Trans.*, v.31(2), p.306-310.
- OPENGL – *HIGH Performance 2D/3D Graphics*, Disponível: OpenGL Web Site (05/06/2001) URL: <http://www.opengl.org>, consultado: 05/06/2001.
- PAYNE, P.C.J. (1956). *A field method of measuring soil/metal friction*. *Journal of Soil Science*. v. 7, p. 235-241.
- PEARSON, R.W. (1966). Soil environment and root development. In : PIERRE, W.H.; KIRKHAM, D.; PESEK, S.; SHAW, R.; ed. *Plant environment and efficient water use*. Madison, *American Society of Agronomy*, 1966. p.95-126.
- PEREIRA, M. F. L. (2001) *Algoritmo paralelo para reconstrução tridimensional de imagens tomográficas de amostras agrícolas em arquitetura DSP com técnicas wavelets*. 179 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- PERUMPAL, J.V. (1987). Cone penetrometer applications – A review. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, MI, v.30, nr.4, p.939-944.
- PIDGEON, J.D.; SOANE, B.D. (1977). *Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley mono-culture system*. *J. Agric. Sci.* 88:43-442.
- PRATHER, O.C.; HENDRICK, J.G.; SCHAFER, R.L. (1970). An electronic hand-operated recording penetrometer. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, MI, v.13, nr.1, p.385-386.
- RABELLO, L. M.; KOENINGKAN, L.V.; PEREIRA, M. F. L.; CHIARI, F.F. ; CRUVINEL, P. E. (2003) *Programa computacional e interface com o usuário para o controle, aquisição de dados e processamento de sinais para medida de resistência do solo à penetração de raízes*. São Carlos: Embrapa

Instrumentação Agropecuária, 2003. 89 p. Embrapa Instrumentação Agropecuária. Comunicado Técnico). No prelo.

RALISH, R.; GUIMARÃES, M. de F.; MEDINA, C. de C.; TAVARES FILHO, J.; DERSIGNY, C.G.; VIZENTIM, L.M.B. (1991). O método de perfil cultural para auxiliar na avaliação dos efeitos do preparo sobre a estrutura do solo. In : Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 20., Londrina, Anais, Londrina, SBEA, v.2, p 1374-1382.

READS51 (2003). *RIGEL CORPORATION*. Disponível em <http://www.rigelcorp.com>. Acesso em 24 jun. 03.

REICHARDT, K. 1985. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. 4<sup>o</sup> ed. rev. e ampliada. Campinas, Fundação Cargill,. viii+466p. il. 25,5cm.

REVATHY, K.; RAJU, G.; PRABHAKARAN, S.R.N. (2000). *Image zooming by wavelets*, *Fractals*, v. 8, num. 3, p. 247-253.

ROLSTON, D.E.; BEDAIWY, N.A.; LOUIE, D.T. (1991). Micropenetrometer for in Situ Measurement of Soil Surface Strength. *Soil Sci. Am. J.*, v.55, p. 481-485.

RUSSEL, R.S.; GOSS, M.J. (1974). Physical aspects of soil fertility. The response of roots to mechanical impedance. *Neth. J. Agric. Sci.*, Wageningen, v.22, p.305-318.

SANDS, R.; GREACEN E. L.; GERARD, C.J. (1979). *Compaction of sandy soils in radiata pine forsts*. I. A penetrometer study. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, v. 17, p. 101-113.

SANTIS JR., J. de. (2000) *Medidor de teor de clorofila em plantas baseado em arquitetura microcontrolada*. 108 f. (Tese de Mestrado: Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP.

- 
- SETEVENSON, F. J. (1994) Humus chemistry: genesis, composition, reactions. New York : John Wiley & Sons, 2. ed.
- SIMMONS, F.W.; CASSEL, D.K. (1989). Cone index and soil physical properties relationships on sloping paleudult complex. *Soil Sci.*, v.147, p.40-46.
- STAFFORD, J.V.; TANNER, D.W. (1977). *The frictional characteristics of steel sliding on soil*. Journal of Soil Science, v. 28, p. 541-553.
- STAFFORD, J.V.; TANNER, D.W. (1983). *Effect of rate on soil shear strength and soil-metal friction*. II. Soil-metal friction. Soil and Tillage Research, v. 3, p. 321-330.
- STMicroeletronics (2003). *L298N dual full-bridge driver*. Disponível em : <http://eu.st.com/stonline/books/pdf/docs/1773.pdf>. Acesso em 24 jun. 03.
- STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V.L. (1983). Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR/STOLF. *STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos*, Piracicaba, v.1(3), p.18-23.
- SYNCRO ELETROMECÂNICA LTDA. *Sistemas de posicionamento*. São Paulo, 199? 22 p.
- TAYLOR, H.M.; GARDNER, H.R. (1963). Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Sci.* v.96: p.153-156.
- TAYLOR, H.M.; PARKER, J.J.; ROBINSON, C.M. (1966). Soil strength and seedling emergence relations. II. A generalized relation for Gramineae. *Agron. J.* v.58, p.393-395.



- TIMONER, A.; MAJORANA, F.S.; LEIDERMAN, G.B. (1976), Noções sobre erros. In : Práticas de física 1, editora Edgard Blucher Ltda. Cap.1, p1-23.
- TORRE-NETO, A.; CRUVINEL, P.E.; SLAETS, J.F.W.; CRESTANA, S. (1997) Remote monitoring of environmental variables for modeling of pesticide transport in soil. *Applied Engineering in Agriculture*, St. Joseph, v. 13 n-1, p.115-122, Jan.1997.
- TRIMBLE NAVIGATION LIMITED. (2000) Precision Agricultura Systems. *AgGPS 114<sup>TM</sup>*: operation manual. Overland Park, 2000. Part number: 38201-00. Revison: A, march 2000.
- VAZ, C. M. P. (1989a) *Tomografia computadorizada aplicada a estudos de compactação de solos*. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- VAZ, C.M.P. ; BASSOI, L.H. ; HOPMANS, J.W. (2001) Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. *Soil e Tillage Research*, V.60 , P.35-42.
- VAZ, C.M.P. ; HOPMANS, J.W. (2001) Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer-TDR moisture probe. *Soil Science Society of America Journal*, V.65, N. 1, jan-feb.
- VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P.E.; REICHARDT, K.; STOLF, R. (1989b) Using a computed tomography miniscanner for studying tillage induced soil compaction. *Soil Technology*, Cremlingen, v.2, p.313-321.
- VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. (1992). Tomografia computadorizada na avaliação da compactação de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.16, p.153-159.

- VAZ, C.M.P.; HOPMANS, J.W. (1998). TDR probes for combined use with a cone penetrometer to determine water content influence on soil strength. In : Annual meeting ASA-SSSA-CSSA, Salt Lake city, Utah-USA, Abstracts, p.262, october 31- november 22.
- VAZ, C.M.P.; OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; BACCHI, O.O.S. (1992) Soil Mechanical Analysis through gamma ray attenuation. *Soil Technology*. V.5, p.319-25.
- VAZQUEZ, L.; MYHRE, D.L.; HANLON, E.A.; GALLAHER, R.N. (1991). Soil penetrometer resistance and bulk density relationships after long-term no tillage. *Comum. Soil Plant Anal*, v.22, p.2101-2117.
- WALNUM, C. (1995). *3-D Graphics Programming With Opengl*, QUE Indianapolis, USA.
- WARNAARS, B.C.; EVIS, B.W. (1972). *Soil Physical conditions affecting seedling root growth*. II. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by grain-size distribution and moisture content in silica sands. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 36, p. 623-634.
- WHITELEY, G.M.; DEXTER, A.R. (1981). *The dependence of soil penetrometer pressure on penetrometer size*. *Journal Engineering Research*, v. 26, p. 467-476.
- WIERSUM, L.K. (1957). The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by rootes. *Plant Soil*, The Hague, v.9, p.75-85.
- WILLIFORD, J.R.; WOOTEN, O.B.; FULGHAM, F.E. (1972). Tractor monted field penetrometer. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, MI, v.15, nr.2, p.226-227.

WINSYSTEMS: single board computers, PC/104 (PC104), PC/104-Plus, & STD bus products. Disponível em <<http://www.winsystems.com/>> . Acessado em: 26 maio 2003.

YOUNG, G.D.; ADAMS, B.A.; TOPP, G.C. (1998). A portable cone index and water content penetrometer. *ASA Abstracts*, p.180.

## APÊNDICE A

### Listagem dos protocolos de comandos do 80535

| Comando   | Significado   | Retorno   | Observação   |
|---|---|---|--|
| A   | Ativa ou desativa o modo automático no qual o demais comando descrito pode ser utilizado.   | #A# indica que o modo automático está ativado.<br>#AF# indica que o modo automático está desativado.                    |  |
| T   | Ativa ou desativa o modo de testes.   | #T# indica que o modo testes está ativado.<br>#TF# indica que o modo testes está desativado.                            |  |
| #x:Dist x:Dir x:#<br>(Dist x (mm.))                 | Move x de Dist x na Dir x<br>Dist X Máximo = 820 mm.  | #x#   | Dir = 0 ou 1, sendo 0 em direção a origem e 1 na direção do eixo.                    |
| #y:Dist y:Dir y:#<br>(Dist y (mm.))                 | Move y de Dist y na Dir y<br>Dist y Máximo = 270 mm.  | #y#   | Dir = 0 ou 1, sendo 0 em direção a origem e 1 na direção do eixo.                    |
| #z:Dist z:Dir z:#<br>(Dist z (dmm.))                | Move z de Dist z na Dir z<br>Dist z Máximo = 240 mm.  | #z#   | Dir = 0 ou 1, sendo 0 em direção a origem e 1 na direção do eixo.<br>1 mm. = 10 dmm. |
| #xy:Dist x:Dir x:<br>Dist y:Dir y:#                 | Move x de Dist x na Dir x e y de Dist y na Dir y  | #xy#  | Dir = 0 ou 1, sendo 0 em direção a origem e 1 na direção do eixo.                    |
| #zx#  | Retorna x a origem  | #zx#  |  |
| #zy#  | Retorna y a origem  | #zy#  |  |
| #zz#  | Retorna z a origem  | #zz#  |  |
| #zxyz#  | Retorna x y e z a suas origens.   | #zxyz#  |  |
| #s#   | Avança Z até que a sonda toque em algo ou avance até o limite de segurança.   | #s# se tocou em algo.<br>#e# se atingiu o limite de segurança.  |  |
| #n:medidas:#  | Retorna a média do número especificado de medidas.  | #:valor:#   | Valor é um inteiro com 5 dígitos<br>#:12345:#  |
| #mp#  | Realiza a aquisição de dados, sendo 40 medidas com penetrações de 0.1 mm. e 26 com penetrações de 1mm. As medidas são obtidas realizando se uma média de 15 leituras. | #valor1:valor2:<br>...valor66:#<br>#mp# se a medida foi realizada corretamente ou,<br>#e# se a sonda não tocar em nada. | #e# significa que a sonda atingiu o limite de segurança.                             |
| #mm:X Min:X<br>Inc:X Max: Y<br>Min:Y Inc:Y<br>Max:# | Realiza medidas padrão em uma região definida pelas coordenada Min e Max de X e Y com incremento definido por X e Y Inc.  | #valor1:valor2:<br>...valor66:#<br>## se a medida foi realizada corretamente ou,<br>#e# se a sonda não                  | O caracter enviado para a serial. que será descartado.                               |

---

|      |  |   |  |
|------|--|---|--|
|      |  | tocar em nada ou, ## se foi interrompido durante a aquisição por um caracter enviado para a serial. |  |
| #tc# | Mantém o motor z travado e monitora a célula de carga até que seja interrompido por um caracter enviado para a serial. | #valor1:valor2:<br>...valorN:##tc#  | O caracter enviado para a serial. que será descartado. |

## APENDICE B

### Matriz imagem da camada de penetração.

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 48,19 | 48,19 | 18,14 | 13,23 | 46,68 | 46,30 | 15,87 | 37,42 | 34,21 | 22,87 | 31,18 | 48,19 | 48,19 | 42,33 | 48,19 | 42,33 | 43,28 | 34,96 | 30,43 |
| 30,43 | 0,38  | 0,00  | 2,08  | 47,62 | 36,85 | 31,18 | 29,10 | 27,40 | 20,22 | 33,64 | 42,14 | 48,19 | 27,78 | 47,43 | 48,19 | 38,74 | 48,19 | 37,04 |
| 25,51 | 0,00  | 0,00  | 18,90 | 15,50 | 48,19 | 48,19 | 34,96 | 39,31 | 27,40 | 45,54 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 |
| 48,19 | 48,19 | 48,19 | 41,39 | 18,52 | 14,36 | 19,09 | 17,01 | 48,19 | 28,16 | 31,94 | 48,19 | 48,19 | 46,68 | 44,79 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 |
| 48,19 | 48,19 | 38,55 | 21,73 | 19,65 | 32,69 | 16,63 | 33,83 | 48,19 | 48,19 | 47,25 | 44,79 | 39,50 | 28,73 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 |
| 38,74 | 14,55 | 1,70  | 27,40 | 48,19 | 48,19 | 12,28 | 36,66 | 24,38 | 44,22 | 38,74 | 48,19 | 36,66 | 44,03 | 47,06 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 |
| 41,58 | 22,49 | 23,24 | 43,84 | 43,09 | 48,19 | 27,02 | 19,09 | 36,47 | 48,19 | 33,64 | 48,19 | 44,22 | 29,48 | 48,19 | 48,19 | 43,47 | 47,62 | 48,19 |
| 39,31 | 17,76 | 30,80 | 17,01 | 22,49 | 18,90 | 0,00  | 6,61  | 34,96 | 36,66 | 32,13 | 42,52 | 32,69 | 37,99 | 37,80 | 8,32  | 8,50  | 13,98 | 35,15 |
| 21,35 | 29,29 | 35,15 | 4,72  | 8,88  | 30,24 | 31,37 | 27,40 | 33,07 | 41,01 | 35,91 | 34,58 | 46,87 | 35,91 | 48,19 | 6,80  | 46,30 | 48,19 | 12,66 |
| 17,76 | 21,17 | 19,28 | 12,09 | 31,18 | 42,14 | 48,19 | 35,15 | 29,48 | 39,12 | 20,79 | 38,36 | 33,07 | 29,10 | 37,04 | 20,60 | 39,12 | 48,19 | 30,43 |
| 30,05 | 6,24  | 13,98 | 38,74 | 48,19 | 21,73 | 41,20 | 23,43 | 37,61 | 5,29  | 8,13  | 27,40 | 44,03 | 48,19 | 48,19 | 35,91 | 48,19 | 43,28 | 31,18 |
| 25,13 | 2,83  | 15,50 | 15,87 | 19,28 | 34,02 | 31,75 | 28,91 | 33,26 | 31,18 | 31,75 | 39,69 | 44,41 | 44,03 | 48,19 | 48,19 | 34,96 | 29,29 | 14,17 |
| 30,61 | 39,69 | 37,42 | 31,75 | 11,72 | 28,16 | 34,96 | 48,19 | 41,76 | 42,90 | 26,65 | 36,10 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 23,62 | 34,77 |
| 43,65 | 36,66 | 35,72 | 15,87 | 29,29 | 33,26 | 46,11 | 32,32 | 33,26 | 48,00 | 37,61 | 36,85 | 41,95 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 28,73 |
| 30,05 | 25,51 | 13,80 | 48,19 | 22,68 | 37,61 | 48,19 | 27,21 | 48,19 | 48,19 | 35,15 | 43,84 | 48,19 | 43,65 | 47,06 | 31,18 | 45,54 | 36,85 | 26,46 |
| 33,07 | 30,80 | 14,36 | 40,44 | 46,30 | 47,62 | 41,58 | 33,83 | 32,50 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 29,29 | 44,79 | 48,19 |
| 31,18 | 17,76 | 33,64 | 38,74 | 39,31 | 21,73 | 31,75 | 32,69 | 31,18 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 30,61 | 41,01 | 27,02 |
| 48,19 | 17,01 | 32,88 | 43,09 | 39,69 | 48,19 | 39,87 | 31,94 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 44,41 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 |
| 4,72  | 31,37 | 46,87 | 20,03 | 23,24 | 31,75 | 14,36 | 44,41 | 48,19 | 42,33 | 48,19 | 36,10 | 41,95 | 48,19 | 12,47 | 48,19 | 48,19 | 48,19 | 48,19 |

Números de dados : 361

Maior força : 48,19 Kgf

Menor força : 0,00 Kgf

Coordenadas X: Xinic.: 300 mm - Xfinal: 480 mm

Coordenadas Y: Yinic.: 50 mm - Yfinal: 230 mm

Incremento X: 10 mm

Incremento Y: 10 mm

Local :

Data/Hora : 19/04/02 09:39:19

Coleta nr: 1

## APÊNDICE C

### ERROS EM SISTEMAS DE MEDIDAS

#### 1 – Valor mais provável de uma grandeza

Sejam  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  os resultados obtidos na mensuração de uma grandeza. O valor mais provável dessa grandeza é :

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}, \text{ ou } \bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} (i = 1, 2, 3, \dots, n). \quad \text{C.1}$$

#### 2 – Erro absoluto aparente

Define-se como sendo a diferença entre o resultado obtido na medição da grandeza e o valor verdadeiro da mesma :

$$E_r = x - X \quad \text{C.2}$$

#### 3 – Erro absoluto aparente

Define-se como a diferença entre o resultado obtido ( $x$ ) e o valor mais provável da grandeza ( $\bar{X}$ ), também definido como resíduo ou desvio ( $\delta$ ) :

$$\delta = x - \bar{X} \quad \text{C.3}$$

#### 4 – Erro relativo

Erro para cada unidade na qual se mede a grandeza a determinar.

$$E_r = \frac{E_v}{X} = \frac{\delta}{X} \quad \text{C.4}$$

#### 5 – Erro percentual

---

$$E\% = E_r \cdot 100 \quad \text{C.5}$$

## 6 – Desvio médio (erro médio)

Definido como a média aritmética dos valores absolutos dos desvios :

$$\Delta_x = \frac{\sum |\delta x_i|}{n} \quad \text{C.6}$$

## 7 – Desvio quadrático médio

Definido com sendo o erro cujo quadrado é igual à média aritmética dos quadrados dos desvios :

$$s'(rms) = \sqrt{\frac{\sum \delta x_i^2}{n}} \quad \text{C.7}$$

## 8 – Desvio-padrão

$$s = \sqrt{\frac{\sum \delta x_i^2}{n-1}} \quad \text{C.8}$$

## 9 – Variância

$$\sigma = s^2 \quad \text{C.9}$$

## 10 – Erro tolerável

$$E_{tol} = 3 \cdot \sigma \quad \text{C.10}$$



## APÊNDICE D

### ROTINA PARA CONVERSÃO A/D DE 10 BITS PARA O MICROCONTROLADOR 80535.

Converte a variável analógica conectada à entrada ANX em uma variável binária de 10 bits, armazenadas em AD8 e AD10.

Registradores afetados : ACC e R0;

Argumento de entrada : canal a ser convertido em ANX (porta analógica de entrada AN0 a AN7);

Argumentos de saída : valor de conversão em AD8.

| AD_10_Bit | Proc   |
|-----------|--|
|           | MOV A,ANX ; número do canal                                  |
|           | ORL A,#00010000B ; modo : simples conversão                  |
|           | ANL A,#00111111B   |
|           | MOV R0,A ; salva   |
|           | MOV A,ADCON ; pega palavra antiga                            |
|           | ANL A,#11000000B ; Reset A/D                                 |
|           | ORL A,R0 ; e ajusta nova                                     |
|           | MOV ADCON,A ; e ajusta como modo                             |
|           | MOV DAPR,#00 ; inicia conversão 0 – 5V                       |
|           | JB ADCON.4,\$ ; espera até pronto                            |
|           | MOV A,ADDAT ; pega resultado                                 |
|           | RL A ; desloca bit de alta ordem                             |
|           | RL A ; para bits de baixa ordem                              |
|           | ANL A,#00000011B ; dois bits mais significativos             |
|           | MOV AD10,A ; armazena os mais significativos bits de 10 bits |
|           | MOV DPTR,#tab_conv ; e usa como tabela de ajuste             |
|           | MOVC A,@A+DPTR ; pega nova faixa de conversão                |
|           | MOV DAPR,A ; inicia conversão                                |
|           | JB ADCON.4,\$ ; espera até pronto                            |
|           | MOV A,ADDAT ; pega resultado                                 |

---

MOV AD8,A ;é o byte de baixa ordem dos valores dos 10 bits  
RET

---

AD\_10\_Bit ENDPROC

---

tab\_conv

---

|              |                     |
|--------------|---------------------|
| DB 01000000B | ; 0,00 – 1,25 Volts |
| DB 10000100B | ; 1,25 – 2,50 Volts |
| DB 11001000B | ; 2,50 – 3,75 Volts |
| DB 00001100B | ; 3,75 – 5,00 Volts |

---

---