

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**MÉTODOS AUXILIARES PARA DIAGNÓSTICO DA  
NECESSIDADE DE SUBSOLAGEM DE SOLOS AGRÍCOLAS**

**GILMAR DA SILVA  
ENGENHEIRO AGRÔNOMO**

CAMPINAS  
ABRIL DE 2002

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**MÉTODOS AUXILIARES PARA DIAGNÓSTICO DA  
NECESSIDADE DE SUBSOLAGEM DE SOLOS AGRÍCOLAS**

Dissertação submetida à banca examinadora para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola  
na área de concentração em Máquinas Agrícolas.

**GILMAR DA SILVA**

**Orientador: Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli**

CAMPINAS  
ABRIL DE 2002

*Quando nada parece surtir efeito em minha profissão, eu vou ver o homem que trabalha as pedras e o observo marretando a rocha cerca de uma centena de vezes antes que ela dê o menor sinal de rachar. Mas a centésima primeira marretada a divide em duas, e eu fico sabendo que isso não é obra dessa última marretada – e sim de todas as que vieram antes.*

JACOB RIIS

Agradeço a Deus e dedico este trabalho aos meus pais Aristides e Angela,  
as minhas irmãs Milene e Marciana, pelo incentivo e  
compreensão para a concretização de mais este sonho.

## AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI/UNICAMP.

Ao CNPq.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela bolsa de mestrado concedida, e por possibilitar a realização desse trabalho.

À Usina Santa Lúcia S/A por ceder a área e dar total liberdade para elaboração desse trabalho.

À empresa DLG – Automação Industrial Ltda

À Universidade Federal de São Carlos - UFSCar câmpus de Araras por ceder a balança e a estufa para determinar o teor de água.

Ao meu orientador Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli pela amizade e sugestões valiosas para o aprimoramento do trabalho.

Ao amigo, Eng. M.Sc. Claudio K. Umezu pela amizade e participação no trabalho.

Ao amigo, Eng. Augusto César da Silveira pela colaboração no levantamento topográfico.

Aos professores membros da banca do exame de qualificação, Prof. Dr. Antonio José da Silva Maciel e Prof. Dra. Adriana Cavalieri, pela contribuição e aprimoramento do trabalho.

À amiga Laurimar da Embrapa Informática pelo auxílio referente a geoestatística.

Aos amigos Alexandre Ortega, Aloísio Bianchini, Aristóteles, Jesus, Ronaldo, Iakson, Carlão, Celso, Brenner, Rodrigo, Marcelo Calábria, Renato Laurenti, Mancha, José Luis, Jaime, Juliana, Juliano pelo companheirismo e amizade.

Ao funcionários, Ana Paula Montagner, Marta, André, Silvia, Edgar, Edson, Leandro, José Maria, Fubá, Luiz e Chicão pela gratidão e amizade.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	xi
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - OBJETIVOS .....	2
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 - Solo .....	3
3.1.1 - Perfil do solo .....	4
3.2 - Mecanização da cana-de-açúcar.....	5
3.2.1 – Equipamentos para preparo do solo.....	6
Gradagem .....	6
Escarificação.....	7
Subsolagem.....	7
3.3 - Causas da compactação do solo .....	9
3.3.1 - Pressão de pneus e esteiras.....	13
3.4 - Métodos para identificação .....	14
3.4.1 - Penetrômetros.....	15
3.5 - Resistência mecânica à penetração (RP).....	18
3.6 – Teor de água .....	20
3.7 - Descompactação do solo .....	21
3.8 - Amostragem .....	24
3.9 - Estatística Descritiva .....	24
3.9.1 - Estatística Inferencial .....	25
3.9.2 - Estatística Clássica .....	25
3.9.3 – Teste de normalidade.....	27
3.10 - Geoestatística .....	28
3.10.1 - Objetivos da Geoestatística.....	30
3.10.2 - Variável regionalizada (VR) .....	30
3.10.3 - Semivariograma .....	31
3.10.4 - Ajustamento de modelos matemáticos aos semivariogramas experimentais.....	32
3.10.5 - Modelos com patamar .....	33
3.10.6 - Modelos sem patamar.....	34
3.10.7 - Modelos de semivariogramas.....	35
3.10.8 - Interpolação de dados.....	35
3.11 - Aplicações da geoestatística na agricultura.....	38
4 - MATERIAL E MÉTODOS .....	40
4.1 – Material.....	40
4.1.1 – Área experimental .....	40
4.1.2 – Equipamentos .....	41
Penetrômetro eletrônico.....	41
Sistema de posicionamento geográfico .....	43
Estação total.....	44

Balança .....	45
Estufa .....	45
Computador Pessoal Portátil “Notebook” .....	45
4.1.3 – Programas Computacionais “Softwares” .....	45
4.1.4 – Outros materiais .....	46
4.2 -Métodos .....	46
4.2.1 - Caracterização da área experimental .....	46
4.2.2 - Malha amostral .....	46
4.2.3 - Teor de água do solo .....	48
4.2.4 – Resistência mecânica à penetração .....	50
4.2.5 - Análise da resistência mecânica à penetração .....	51
Primeiro método - probabilístico .....	51
Segundo método - determinístico .....	52
Terceiro método – geoestatístico .....	54
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	56
5.1 – Características da área experimental .....	56
5.2 - Posicionamento dos pontos amostrais .....	57
5.3 – Teor de água do solo .....	58
5.4 – Análise da resistência mecânica à penetração .....	62
5.4.1 – Primeiro método - probabilístico .....	62
5.4.2 – Segundo método - determinístico .....	70
5.4.3 – Terceiro método – geoestatístico .....	77
5.4.4 – Comparação entre os métodos .....	84
Método Probabilístico .....	86
Método Determinístico .....	86
Método Geoestatístico .....	86
6 – CONCLUSÕES .....	88
7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	90
8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91
9 - APÊNDICES .....	96
Apêndice 1 – Coordenadas dos marcos e dos pontos experimentais (sistema WGS84) .....	97
Apêndice 2 – Umidade média do solo (%), em base seca, nas camadas de 0 a 200mm, de 200mm a 400mm e de 400mm a 600mm .....	101
Apêndice 3 – Resistência mecânica à penetração (MPa) obtida nos 121 pontos amostrados relativos à camada de 0 a 150mm de profundidade .....	102
Apêndice 4 – Resistência mecânica à penetração (MPa) obtida nos 121 pontos amostrados relativos à camada de 150mm a 300mm de profundidade .....	105
Apêndice 5 – Resistência mecânica à penetração (MPa) obtida nos 121 pontos amostrados relativos à camada de 300mm a 500mm de profundidade .....	108
Apêndice 6 – Resistência mecânica média à penetração (MPa), obtida nos 121 pontos amostrados, para as camada de 0 a 150mm, 150mm a 300mm e 300mm a 500mm .....	111
Apêndice 7 – Probabilidade de se encontrar RP igual ou superior do que RPc (%) .....	112
Apêndice 8 - Porcentagem de valores encontrados de RP igual ou superior do que RPc (%) .....	112
Apêndice 9 - Volume de solo a ser mobilizado em função da RPc (m <sup>3</sup> ) – método probabilístico .....	113

Apêndice 10 - Volume de solo a ser mobilizado em função da RPc (m <sup>3</sup> ) – método determinístico .....	113
Apêndice 11 - Volume de solo a ser mobilizado em função da RPc (m <sup>3</sup> ) – método geoestatístico .....	114
Apêndice 12 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “A”. 115	
Apêndice 13 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “C”. 116	
Apêndice 14 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “D”. 117	
Apêndice 15 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “E”. 118	
Apêndice 16 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “F”. 119	
Apêndice 17 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “G”. 120	
Apêndice 18 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “H”. 121	
Apêndice 19 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “I”. 122	
Apêndice 20 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “J”. 123	
Apêndice 21 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “K”. 124	

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PERFIL COMPLETO DE UM SOLO. FONTE: REICHARDT (1988).....	5
FIGURA 2 - INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES FÍSICAS DO SOLO SOBRE A PRODUÇÃO AGRÍCOLA E A POPULAÇÃO DE COLMOS DA CANA-DE-AÇÚCAR (ADAPTADA DE FERNANDES ET AL. (1983)). .....	11
FIGURA 3 - RELAÇÃO TRÁFEGO X PRODUTIVIDADE. FONTE: BARBOSA (1997). ....	12
FIGURA 4 - RELAÇÃO TRÁFEGO X PERFILHOS/METRO. FONTE: BARBOSA (1997). ....	13
FIGURA 5 - DIMENSÕES PADRONIZADAS PELA RECOMENDAÇÃO ASAE R313. 2 (1997), PARA HASTES E CONES DE PENETRÔMETROS E PENETRÓGRAFOS. ....	15
FIGURA 6 - ÍNDICE DE CONE EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE PARA UM LATOSSOLO. FONTE: RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 947/83 – CENTRO NACIONAL DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CENEA, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, SOROCABA, SP, 1983. ....	16
FIGURA 7 - CARACTERÍSTICA DE UMA ESTRUTURA DE SOLO COMPACTADA. FONTE: EMBRAPA SOJA. ....	20
FIGURA 8 - CARACTERÍSTICA DE ESTRUTURA DE SOLO NÃO COMPACTADA FONTE: EMBRAPA SOJA. ....	20
FIGURA 9 - EFEITO DA SUBSOLAGEM APLICADA EM DOIS NÍVEIS DE UMIDADE. FONTE: TAYLOR & BELTRAME (1980). ....	21
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DE UM MODELO IDEAL DE SEMIVARIOGRAMA. FONTE: INPE 2002. ....	32
FIGURA 11 - MODELOS DE SEMIVARIOGRAMAS. FONTE: SEIXAS (2000). ....	35
FIGURA 12 - INTERPOLAÇÃO A PARTIR DE QUATRO ESTAÇÕES DE AMOSTRAGEM. FONTE: SEIXAS (2000). ....	36
FIGURA 13 - ATRIBUIÇÃO DE DIFERENTES PESOS AOS VALORES DAS ESTAÇÕES 1, 2 E 3 NO CÁLCULO DO VALOR ESTIMADO DO PONTO P. FONTE: SEIXAS (2000). ....	37
FIGURA 14 - VISTA GERAL DA ÁREA EXPERIMENTAL. ....	40
FIGURA 15 - PENETRÔMETRO ELETRÔNICO. ....	42
FIGURA 16 - POSICIONAMENTO DOS PONTOS AMOSTRAIS NA ÁREA EXPERIMENTAL. ....	47
FIGURA 17 - POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE RETIRADA DE AMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA. ....	49
FIGURA 18 - COLETA DE DADOS COM O PENETRÔMETRO ELETRÔNICO. ....	50
FIGURA 19 – VOLUME DE SOLO CORRESPONDENTE PARA CADA PONTO. ....	53
FIGURA 20 – POSIÇÃO DOS PONTOS EXPERIMENTAIS EM RELAÇÃO AOS MARCOS GEODÉSICOS. ...	57
FIGURA 21- TEOR MÉDIO DE ÁGUA DO SOLO NA CAMADA DE 0 A 200MM. ....	60
FIGURA 22 - TEOR MÉDIO DE ÁGUA DO SOLO NA CAMADA DE 200MM A 400MM. ....	61
FIGURA 23 - TEOR MÉDIO DE ÁGUA DO SOLO NA CAMADA DE 400MM A 600MM. ....	61
FIGURA 24 – DISTRIBUIÇÃO MÉDIA DO TEOR DE ÁGUA DA CAMADA DE 0 A 600MM. ....	62
FIGURA 25 – RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS NA COLUNA “B” .....	64
FIGURA 26 – PROBABILIDADE DE SE ENCONTRAR VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO (RP) IGUAL OU SUPERIOR AQUELA CONSIDERADA CRÍTICA (RPC) NOS PERFIS HORIZONTAIS DE SOLO ESTUDADOS. ....	67
FIGURA 27 - VOLUME DE SOLO A SER MOBILIZADO EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO CONSIDERADA CRÍTICA (RPC) NOS PERFIS HORIZONTAIS DE SOLO ESTUDADOS – MÉTODO PROBABILÍSTICO. ....	69

FIGURA 28 – PORCENTAGEM DE PONTOS ENCONTRADOS COM VALORES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO (RP) IGUAL OU SUPERIOR À CONSIDERADA CRÍTICA (RPC) NOS PERFIS HORIZONTAIS DE SOLO ESTUDADOS. ....	70
FIGURA 29 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE RPC IGUAL OU SUPERIOR À 2,5MPA NA CAMADA DE SOLO DE 0 A 150MM. SISTEMA DE COORDENADAS PLANO-RETANGULARES (UTM-WGS84). ....	71
FIGURA 30 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE RPC IGUAL OU SUPERIOR À 4,5MPA NA CAMADA DE SOLO DE 0 A 150MM. SISTEMA DE COORDENADAS PLANO-RETANGULARES (UTM-WGS84). ....	72
FIGURA 31 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE RPC IGUAL OU SUPERIOR À 2,5MPA NA CAMADA DE SOLO DE 150MM A 300MM. SISTEMA DE COORDENADAS PLANO-RETANGULARES (UTM-WGS84). ....	73
FIGURA 32 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE RPC IGUAL OU SUPERIOR À 4,5MPA NA CAMADA DE SOLO DE 150MM A 300MM. SISTEMA DE COORDENADAS PLANO-RETANGULARES (UTM-WGS84). ....	73
FIGURA 33 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE RPC IGUAL OU SUPERIOR À 2,5MPA NA CAMADA DE SOLO DE 300MM A 500MM. SISTEMA DE COORDENADAS PLANO-RETANGULARES (UTM-WGS84). ....	74
FIGURA 34 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE RPC IGUAL OU SUPERIOR À 4,5MPA NA CAMADA DE SOLO DE 300MM A 500MM. SISTEMA DE COORDENADAS PLANO-RETANGULARES (UTM-WGS84). ....	75
FIGURA 35 - VOLUME DE SOLO A SER MOBILIZADO EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO CONSIDERADA CRÍTICA (RPC) NOS PERFIS HORIZONTAIS DE SOLO ESTUDADOS – MÉTODO DETERMINÍSTICO. ....	76
FIGURA 36 - SEMIVARIOGRAMA DA CAMADA DE 0 A 150MM. ....	77
FIGURA 37 – VARIABILIDADE ESPACIAL DO NÍVEL DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO PARA A CAMADA DE 0 A 150MM. ....	78
FIGURA 38 - SEMIVARIOGRAMA DA CAMADA DE 150MM A 300MM. ....	79
FIGURA 39 – VARIABILIDADE ESPACIAL DO NÍVEL DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO PARA A CAMADA DE 150 A 300MM. ....	80
FIGURA 40 – SEMIVARIOGRAMA DA CAMADA DE 300 A 500MM. ....	81
FIGURA 41 - VARIABILIDADE ESPACIAL DO NÍVEL DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO PARA A CAMADA DE 300 A 500MM. ....	82
FIGURA 42 - VOLUME DE SOLO A SER MOBILIZADO EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO CONSIDERADA CRÍTICA (RPC) NOS PERFIS HORIZONTAIS DE SOLO ESTUDADOS – MÉTODO GEOESTATÍSTICO. ....	83
FIGURA 43 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE VOLUME DE SOLO A SER MOBILIZADO EM FUNÇÃO DO VALOR CRÍTICO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO, OBTIDAS PELOS TRÊS MÉTODOS APRESENTADOS. ....	85

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 1 - CAUSAS RELACIONADAS A COMPREENSÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO. FONTE: SITE- SPECIFIC MANAGEMENT GUIDELINES .....	19
QUADRO 2. CUSTO OPERACIONAL POR HORA TRABALHADA (US\$/HORA). FONTE: AGRIANUAL 2001 .....	22
QUADRO 3 - HISTÓRICO DA ÁREA 1988 A 1995 .....	56
QUADRO 4 - HISTÓRICO DA ÁREA 1997 A 2001 .....	57
TABELA 1 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS REFERENTES AO TEOR DE ÁGUA DO SOLO (%) .....	58
TABELA 2 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA REFERENTES AO TEOR DE ÁGUA DO SOLO .....	59
TABELA 3 – TESTE DE TUKEY REFERENTES AO TEOR DE ÁGUA DO SOLO .....	59
TABELA 4 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS REFERENTES À RESISTÊNCIA MECÂNICA MÉDIA À PENETRAÇÃO [MPA].....	66

## RESUMO

A subsolagem dos solos agrícolas é uma prática utilizada para se minimizar os efeitos causados pela sua compactação. Vem sendo geralmente realizada em todo o campo antes de ser implantada uma nova cultura. Por ser uma operação de preparo de solo que consome uma quantidade elevada de energia deve ser otimizada. Uma forma de otimizar essa operação é realiza-la apenas na área onde ocorre resistência mecânica igual ou superior à considerada crítica em função do tipo de cultura, solo, umidade, etc. Para avaliar os níveis de resistência mecânica à penetração e auxiliar na tomada de decisão quanto a necessidade de se proceder a operação de subsolagem foram propostas três metodologias. As metodologias propostas baseiam-se no volume de solo a ser mobilizado em função da resistência mecânica à penetração considerada crítica para o caso. O primeiro método, denominado probabilístico, utiliza-se de técnicas estatísticas para a definição do volume de solo a ser mobilizado. O segundo, denominado determinístico, utiliza-se do cálculo da porcentagem do volume de solo a ser mobilizado e sua distribuição espacial. Finalmente, o terceiro, denominado geoestatístico, utiliza-se de técnicas geoestatísticas para a determinação do volume de solo a ser mobilizado e da variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração. Por meio da comparação entre as curvas de volume de solo a ser mobilizado, em função do valor crítico de resistência mecânica à penetração, obtidas pelos três métodos, conclui-se que os três métodos, apresentaram uma curva do tipo S, onde as suas curvas praticamente coincidiram uma com a outra, mostrando a confiabilidade de cada método.

**PALAVRAS-CHAVE:** compactação do solo, subsolagem, resistência mecânica à penetração, penetrômetro eletrônico.

## ABSTRACT

Agricultural soils compaction is minimized through subsoiling practices. Its generally applied before a new crop is set. Such an operation should be optimized in the sense of power consumption like similar soil preparation practices. One very efficient optimization procedure is to apply the subsoiling only on the areas where soil mechanical resistance is equal or larger than a critical level taken as a pattern for a specific crop, soil type, soil moisture, etc. It was proposed three methods to evaluate soil mechanical resistance to help in deciding the necessity in performing the subsoiling. These methodologies are based on the volume of mobilized soil as a function of the mechanical resistance considered critical for the specific case. The first proposed method; named probabilistic employs statistical procedures to define the soil volume to be mobilized. The second suggested method, which exhibits deterministic characteristics, employs the percentage of the mobilized soil as well as its spatial distribution. Finally the third suggested method is based on geostatistics techniques to determine the soil volume to be mobilized as well as on the mechanical resistance spatial distribution variability. By comparing the curves representing the mobilized soil volume as function of the critical mechanical resistance value, as generated by the three suggested methods, it is noticed that all the curves exhibit an S shape quite coincident, which indicates a high reliability of the methods.

**KEYWORDS:** soil compaction, subsoiling, mechanical resistance to penetration, electronic penetrometer.

## 1 - INTRODUÇÃO

No decorrer dos anos nota-se que a subsolagem é uma prática agrícola que vem sendo constantemente utilizada para se minimizar os efeitos provocados pelo cultivo excessivo, utilização de máquinas pesadas e manejo inadequado do solo provocado pelo uso excessivo de implementos agrícola que contribuem para um aumento da compactação do solo em algumas culturas.

A técnica de subsolagem é utilizada basicamente para romper camadas de solo que tenham sofrido compactação.

Entretanto essa é uma operação que requer atenção, uma vez que demanda um alto gasto de energia e seu custo é elevado em relação as outras tarefas de preparo do solo.

Visando não somente contribuir com a conservação de solos, mas também com o meio ambiente é importante que se olhe de uma maneira diferenciada para agricultura, principalmente nas atividades relacionadas ao preparo de solo, onde uma área não deve mais ser simplesmente tratada de forma homogênea.

Uma maneira prática de se avaliar a compactação do solo dá-se pela análise da resistência mecânica à penetração obtida por meio de penetrômetros, e por isso deveriam ser amplamente utilizados na agricultura.

Outra maneira é através da criação de metodologias que auxiliem na tomada de decisão quanto ao diagnóstico da necessidade de se proceder a operação de subsolagem. Essas metodologias tem que estarem baseadas na observação da resistência mecânica à penetração, e como ela se distribui ao longo da área a ser estudada, devendo estabelecer a necessidade de subsolagem e localizar a profundidade da camada compactada a ser eliminada

Este trabalho é mais uma contribuição metodológica para fornecer subsídios para uma análise mais apurada da resistência mecânica à penetração.

## **2 - OBJETIVOS**

Os objetivos do presente trabalho são:

- Determinar a resistência mecânica à penetração de um solo agrícola, utilizando-se um penetrômetro eletrônico;
- Propor métodos de análise que possam auxiliar na tomada de decisão quanto a necessidade de se proceder a operação de subsolagem de solos agrícolas;
- Analisar comparativamente os métodos propostos.

### 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O crescimento e desenvolvimento das plantas, que as levam a produzir grãos, fibras e outros produtos comerciáveis, dependem da harmonia de uma série de fatores ambientais. A absorção de nutrientes é um dos fatores importantes para que se tenha boas produções, e qualquer obstáculo que restrinja o crescimento radicular reduz a absorção.

Existem diversos fatores que ocasionam um crescimento deficiente do sistema radicular de plantas cultivadas, podendo ser citados: danos causados por insetos e moléstias, deficiências nutricionais, acidez do solo, drenagem insuficiente, baixa taxa de oxigênio, temperatura imprópria do solo, compactação do solo e dilaceramento radicular. Dentre essas limitações, a compactação do solo atinge, muitas vezes, dimensões sérias, pois ao causar restrições ao crescimento e desenvolvimento radiculares, acarreta uma série de problemas que afetam a produção das plantas. Os problemas de ordem agrônômica são: aumento da resistência mecânica à penetração radicular, redução da aeração, alteração do fluxo de água e calor e da disponibilidade de água e nutrientes.

#### 3.1 - Solo

Segundo REICHARDT (1988) o termo solo refere-se à camada externa e agriculturável da superfície terrestre. Sua origem é a rocha que por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou, no decorrer das eras geológicas, em material poroso de características peculiares. Reconhecem-se cinco fatores na formação do solo: material original (rocha) M, tempo (idade) I, clima C, topografia T e organismos vivos O. Utilizando linguagem matemática pode-se dizer que:

$$\text{Solo} = f (M, I, C, T, O) \dots\dots\dots(1)$$

Da combinação dos quatro últimos fatores atuando em diferentes intensidade sobre o material original M, resultam os diferentes tipos de solo conforme REICHARDT (1988).

### 3.1.1 - Perfil do solo

Como esse trabalho visa determinar as camadas compactadas do solo, onde se determinará a resistência mecânica à penetração nas camadas superpostas, denominadas horizontes, é necessário conhecer e entender como é constituído o perfil do solo.

Um solo completo é formado de quatro horizontes A, B, C, e D, que podem estar ainda subdivididos, e exercem grande influência sobre o crescimento de vegetais superiores.

Para entender como é o perfil de um solo, REICHARDT (1988) relata e aborda uma série de conceitos sobre os horizontes, onde o horizonte A é a camada superficial do solo, exposta diretamente à atmosfera. Ele é conhecido como horizonte de eluviação, horizonte que perde elementos químicos por lavagens sucessivas com a água da chuva. Subdivide-se em A<sub>00</sub> (camadas superficiais em solos de florestas com grande quantidade de material orgânico não decomposto: galhos, folhas e frutos); A<sub>0</sub> (situa-se abaixo do A<sub>00</sub>, constituído de material orgânico decomposto, isto é, humificado); A<sub>1</sub> (já é horizonte mineral, mas com alta porcentagem de matéria orgânica humificada que lhe confere uma cor escura); A<sub>2</sub> (que é o típico horizonte A, de cor mais clara, correspondendo à zona de máxima perda de elementos minerais, isto é, eluviação) e A<sub>3</sub> (é um horizonte de transição entre A e B, possuindo características de ambos). O horizonte B é conhecido como horizonte de iluviação, isto é, horizonte que ganha elementos químicos provenientes do horizonte A, situado acima. Subdivide-se em B<sub>1</sub> (transição entre A e B, possuindo porém, mais características de B); B<sub>2</sub> (formado pela zona máxima de iluviação, ou seja, acúmulos de materiais lixiviados de A, principalmente compostos de Fe, Al e Ca) e B<sub>3</sub> (transição entre B e C). O horizonte C é formado pelo material que deu origem ao solo, em estado de decomposição, e o horizonte D, pela rocha matriz. A Figura 1 situada abaixo apresenta o perfil completo de um solo.

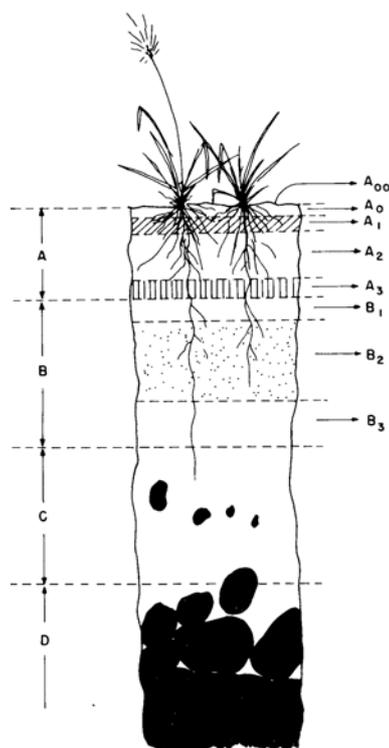


Figura 1 - Perfil completo de um solo. Fonte: REICHARDT (1988).

Vale ressaltar que as espessuras dos horizontes são variáveis e a falta de alguns horizontes em determinados solos é bastante comum. Tudo isto depende da intensidade da ação dos fatores de formação I, C, T e O sobre M.

Já que a produtividade de um solo é determinada em grau acentuado pela natureza do seu subsolo, ou seja, o subsolo exerce uma influência favorável ou desfavorável sobre a superfície, é importante entender como é um perfil do solo.

### 3.2 - Mecanização da cana-de-açúcar

Sabe-se que em todas as etapas do seu estabelecimento e desenvolvimento a cultura da cana-de-açúcar envolve o uso de máquinas agrícolas, as quais são empregadas desde o preparo até a colheita.

Pelo fato da cana-de-açúcar ser considerada uma gramínea semiperene, é importantíssimo um plantio bem feito, já que o sucesso econômico dos cortes subsequentes dependerá do mesmo, portanto o preparo de solo torna-se de grande importância para manutenção e produtividade da cultura em todo seu ciclo vegetativo.

A principal função do preparo do solo é propiciar condições para que a cultura de cana-de-açúcar possa produzir ao máximo, melhorando os atributos físicos (aeração, temperatura e resistência mecânica do solo à penetração), químicos (disponibilidade dos nutrientes) e biológicos (condições para desenvolvimento de microorganismos) do solo.

O efeito do preparo do solo não depende apenas do implemento empregado mais também da forma e intensidade de seu uso. Em muitas ocasiões o efeito benéfico de determinado implemento pode ser anulado pelo seu uso inadequado ou excessivo. O preparo intenso do solo, além de ocasionar a aceleração do processo erosivo, resulta em sérios prejuízos às suas características físicas, relata Castro (1985).

Na maioria das usinas em todo o Brasil os implementos mais comumente utilizados no preparo de solo são: grade, escarificador e subsolador.

Segundo CASTRO (1985) quando o preparo do solo é efetuado com o solo muito úmido, este pode sofrer danos físicos na sua estrutura (compactação) e aderir com maior força aos implementos (em solos argilosos) até o ponto de impossibilitar a operação desejada. Por outro lado quando o solo é preparado estando muito seco, não ocorrem danos físicos na estrutura, mas serão necessárias maior número de passagens para obter suficiente destorroamento que permita efetuar a operação de semeadura. A demanda de energia neste caso também será maior.

A verificação da regulagem, tipos e modelos de implementos adequados para a execução da operação é imprescindível para instalação ou manutenção da cultura.

### **3.2.1 – Equipamentos para preparo do solo**

#### ***Gradagem***

Cada vez mais a utilização das grades na maioria das Usinas, vêm sofrendo algum tipo de restrição, devido implantações do cultivo mínimo.

As principais funções das grades são de desagregar os torrões, nivelar a superfície do solo para facilitar o plantio, diminuir os vazios que resultam entre os torrões e destruir os sistemas de vasos capilares que se formam na camada superior do solo, a fim de evitar a

evaporação de água das camadas mais profundas. Podem ser ainda utilizadas para a inversão de uma camada superficial do solo para a incorporação de fertilizantes ou defensivos, enterrio de sementes miúdas semeadas a lanço, eliminação de ervas daninhas BALASTREIRE (1990).

### ***Escarificação***

A escarificação é uma operação de mobilização do solo até uma profundidade máxima de 30 cm, através de implementos de hastes, denominados escarificadores. As hastes dos escarificadores rompem a camada superficial do solo sem promover a inversão do perfil mobilizado, mantendo entre 50 e 75% da cobertura vegetal existente sobre o solo antes do preparo, BOLLER (2001).

Através do processo de escarificação se mantém uma maior porcentagem de cobertura do solo com restos culturais, em contrapartida, os escarificadores não controlam com eficiência as plantas daninhas.

### ***Subsolagem***

A subsolagem é uma operação que objetiva a descompactação do solo, quando houver uma camada compactada a profundidades que ultrapassem 30 cm, BOLLER (2001).

CASTRO (1985) relata que subsolador é um implemento que consta de várias hastes montadas numa armação de aço a uma distância geralmente não inferior a 50 cm, às vezes chegando a um metro de distância ou mais, capaz de penetrar a uma profundidade maior de 30 a 35 cm, mantendo essa profundidade durante o trabalho sem que ocorram embuchamentos.

BALASTREIRE (1990) descreve que a correta utilização de subsoladores pressupõe conhecimentos suficientes sobre características do solo trabalhado, tais como compactação existente na superfície, textura e estrutura e, ainda, das características necessárias para a operação com o equipamento, como a profundidade de trabalho, espaçamento entre hastes, dimensões e formatos de hastes, potência necessária, etc..

Além da cultura de cana-de-açúcar os solos cultivados com culturas anuais principalmente com trigo/soja apresentam-se, em sua maior parte, degradados pela intensa mecanização e erosão que vem sofrendo há vários anos. Por isso apresentam, entre 15 e 25 cm de profundidade, uma camada compactada que dificulta a infiltração da água e o crescimento das raízes. CASTRO (1985) aborda que a origem das camadas compactadas está relacionada a

três fatores principais: mecanização irracional do solo caracterizada por um excesso de movimentação e utilização de implementos inadequados à função que exercem, com a conseqüente degradação da estrutura do solo; diminuição do conteúdo de matéria orgânica pelas perdas sucessivas por erosão e queima de resíduos, matéria orgânica esta, indispensável para a atividade biológica do solo, que por sua vez, é responsável pelas transformações e recomposição das suas características; e, incidência de chuvas torrenciais sobre a superfície descoberta do solo, desagregando a sua estrutura pela energia de impacto das gotas.

Segundo TAYLOR & BELTRAME (1980), o rompimento das camadas compactadas do solo traz como benefícios imediatos:

- a redução da densidade do solo, que diminui a resistência à penetração das raízes;
- aumento no volume dos macroporos, que melhora a aeração e a drenagem interna do solo;
- permite um fluxo vertical mais rápido da água, que diminui o escoamento superficial e o tempo de encharcamento do solo, em áreas com declividade e planas respectivamente.

É importante se levar em consideração dois fatores a serem analisados antes da subsolagem, o primeiro é o tipo de solo a ser subsolado, já que a subsolagem não apresenta a mesma eficiência para diferentes tipos de solo, sendo necessário verificar também as camadas compactadas, o segundo é se estudar o custo em relação ao benefício que a subsolagem irá proporcionar futuramente.

Ainda de acordo com TAYLOR & BELTRAME (1980), em resumo os seguintes pontos devem ser observados para que se obtenha o máximo de eficiência do tratamento de subsolagem:

- estabelecer a necessidade de subsolagem e localizar a profundidade da camada compactada a ser eliminada;
- certificar-se da profundidade da operação, para não trabalhar abaixo da profundidade crítica;
- verificar se o espaçamento lateral entre os dentes está correto, para proporcionar uma reestruturação completa do solo;
- certificar-se de que o subsolador esteja de acordo com o tamanho do trator;

- trabalhar sempre na profundidade mínima exigida, para remover a compactação, de modo a maximizar a taxa de trabalho.

A subsolagem é uma operação que implica em elevado consumo de energia e somente se justifica em condições especiais, quando for detectada uma camada impeditiva ao fluxo de água e/ou ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, em profundidades maiores de 30cm, BOLLER (2001).

### **3.3 - Causas da compactação do solo**

Em termos de abrangência a compactação pode ocorrer em camadas contínuas ou em pontos isolados e descontínuos, conhecidos como área de influência.

A ocorrência em camadas é sempre mais grave, pois prejudica toda a atividade do perfil do solo em termos de infiltração d'água, trocas gasosas, atividade biológica e penetração das raízes e é tanto mais prejudicial quanto mais espessa e superficial, RALISCH (2001).

Segundo CAMARGO & ALLEONI (1997) as forças que atuam no solo podem ser classificadas em externas e internas. Forças externas resultam do tráfego de veículos, animais ou pessoas, assim como do crescimento de raízes grandes que empurram as partículas do solo para forçar sua passagem, podendo até causar compactação. As forças internas resultam de ciclos, como congelamento e degelo, umedecimento e secamento, e expansão e contração da massa do solo. Quando expressas como pressão, essa força provavelmente tem a mesma ação no sistema, não sendo necessária distinção entre elas.

Ainda de acordo com CAMARGO & ALLEONI (1997) o rearranjo de partículas primárias e de agregados por implementos de tração e cultivo, principalmente a compressão causada por tráfego de veículos, processa-se em duas fases que, em condições de campo, ocorrem separadamente:

- Fase 1 – Preparo do solo: nesta fase, grande parte da energia é consumida para destruir os agregados, sendo os implementos de cultivo especificamente desenhados com esta finalidade, desagregando o solo em diferentes graus;
- Fase 2 – Tráfego posterior de máquinas e implementos: os veículos e implementos que trafegam sobre um solo bem preparado aplicam quase a totalidade de sua energia no sentido de empurrar as partículas do solo umas

contra as outras, gerando um arrançamento compacto. Quanto maior a pulverização do solo por ocasião de preparo, maior será o potencial da compactação posterior.

Para JORGE (1983), até 1940, um trator pesava, em média, menos que três toneladas, enquanto as máquinas que trafegam atualmente pelos solos cultivados podem pesar mais de quinze toneladas como é o caso das colhedoras e caminhões carregados. Na cultura de citros, a mecanização é muito intensa, havendo pomares que acumulam, ao longo de sua existência, trezentas passadas de máquinas por entrelinha STOLF (1987). Quando o solo encontra-se úmido, há uma tendência de os valores de densidade do solo serem cada vez maiores com o aumento do número de passadas. Além disso, o efeito se manifesta em camadas mais profundas do solo à medida que esse número aumenta.

Em culturas perenes ou semiperenes, como a cana-de-açúcar, um preparo inadequado do solo pode ocasionar decréscimos na produção que serão extensivos a todo ciclo de cultura, já que, via de regra, a produção das soqueiras é intimamente ligada à produção do corte anterior. O decréscimo na produção de cana-de-açúcar num campo de demonstração foi obtido por FERNANDES et al. (1983). Após o primeiro corte, um latossolo vermelho-escuro argiloso com 32% de água foi compactado com diferentes níveis: uma, duas e três passadas de um caminhão com apenas um eixo traseiro e 16000kg de massa (Figura 2). Nota-se que, embora a população de colmos tenha aumentado, talvez devido ao maior contato de terra úmida com o tolete, houve queda de aproximadamente 10t/ha entre o nível máximo de compactação e a testemunha sem compactação.

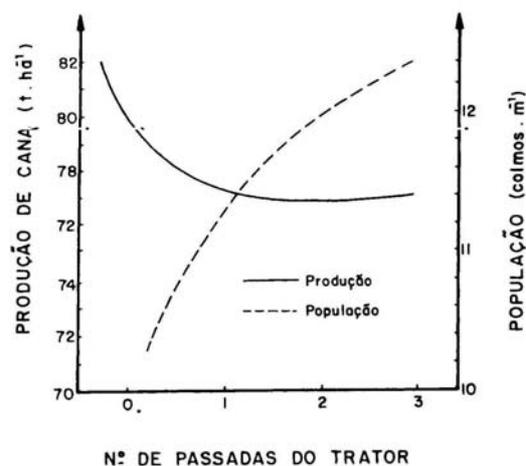


Figura 2 - Influência das condições físicas do solo sobre a produção agrícola e a população de colmos da cana-de-açúcar (adaptada de Fernandes et al. (1983)).

TROUSE (1978) afirma que quando as condições de umidade são ótimas e a pressão de contato é elevada, uma única passada de determinado veículo pode ser suficiente para dificultar, ou até impedir, o crescimento das raízes. Considera-se que a maior parte dos danos causados pela compactação ocorre nas primeiras passadas das máquinas e implementos. À medida que o número de passadas no mesmo local aumenta, há aumento cada vez menos acentuado na compactação, seguindo uma escala logarítmica JAKOBSEN & GREACEN (1985).

Mediante alguns experimentos realizados na Usina Santa Elisa, verifica-se o efeito da compactação na cultura da cana e a relação tráfego x produtividade, conforme ilustra a (Figura 3).

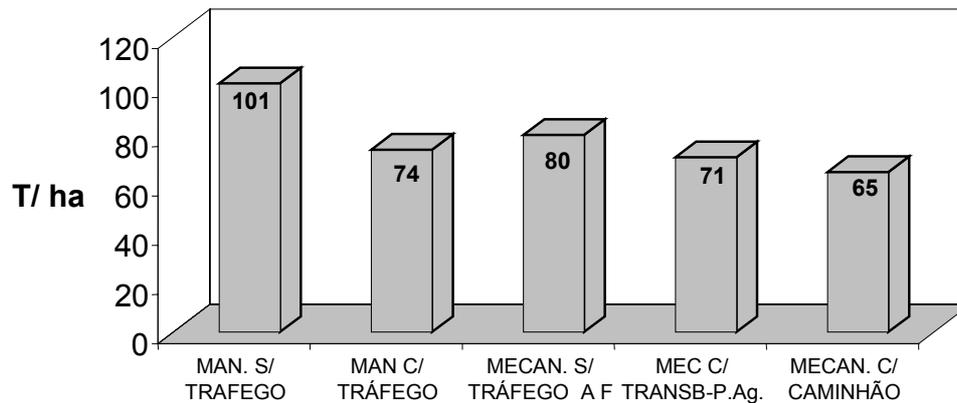


Figura 3 - Relação Tráfego X Produtividade. Fonte: BARBOSA (1997).

A seguir os tipos de colheita ao qual estão relacionados as Figuras 3 e 4:

- **Manual sem tráfego:** nenhum tráfego de caminhões, somente carregadeira.
- **Manual com tráfego:** carregadeira e caminhões.
- **Mecânica sem tráfego:** realizada mediante a utilização de pneus de alta flutuação pelos transbordos.
- **Mecânica com tráfego:** realizada mediante a utilização de pneus agrícolas (convencional), nos transbordos.
- **Mecânica com caminhão:** realizada com a entrada de caminhão no talhão, substituindo o transbordo.

Outro efeito da compactação é observado na (Figura 4), só que agora relacionado à número de perfilho/metro.

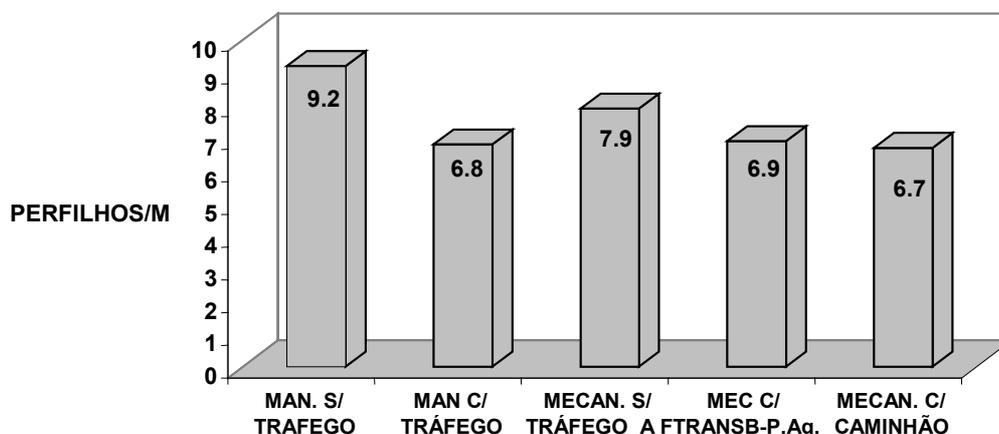


Figura 4 - Relação Tráfego X Perfilho/Metro. Fonte: BARBOSA (1997).

### 3.3.1 - Pressão de pneus e esteiras

CAMARGO & ALLEONI (1997) afirmam que as características dos pneus e esteiras e as da superfície do solo determinam a pressão que será ali exercida. A distribuição da pressão na massa do solo é determinada muito mais pela configuração das pressões na superfície do que pelas suas características físicas. Pode-se considerar, basicamente, as pressões causadas por pneus e as causadas por esteiras.

Mediante alguns experimentos realizados por CAMARGO & ALLEONI (1997) comparando-se um pneu com uma esteira de mesma largura e mesma carga, pode-se afirmar que, a dada profundidade no solo, a tensão causada pelo pneu é sempre maior que a causada pela esteira.

REAVES & COOPER (1960) mostram que a 25cm de profundidade no eixo vertical de carga, a pressão causada no solo por um trator de pneu com 0,8 MPa de pressão de insuflação e de 0,096 MPa, enquanto para uma esteira de 30,5cm de largura, essa pressão é de aproximadamente 0,035 MPa, ou seja, quase três vezes menor.

Discos de arados e grades utilizados em operações de aração e gradeação, caso não estejam bem afiados e suas inclinações devidamente ajustadas, contribuem para agravar ainda mais esse problema de compactação.

Os principais fatores que maximizam a compactação são:

- operações em momento impróprio;
- montagem incorreta e modelo inadequado dos implementos;
- cultivos excessivos;
- restrição ao movimento de água.

RIPOLI & MIALHE (1985) afirmam que a compactação influi, ainda, na erosão de solos. A erosão superficial arrasta partículas de solos de áreas de maior para menor cota, fenômeno responsável pelas perdas das características agrícolas do solo. Sua ocorrência ou não depende, basicamente, do índice de infiltração de água no perfil e da capacidade de armazenamento desse solo, que é função de sua porosidade. Assim, se a água não infiltra na mesma proporção com que é depositada na superfície é inevitável seu escoamento devido à saturação. Portanto, é fácil perceber que a existência das camadas compactadas devido à utilização dos implementos agrícolas e a compactação por tráfego concorrem para aumento da erosão superficial. E mais, a drenagem do solo dificultada, com menos reposição de água do subsolo, faz com que o nível freático abaixe, havendo menos fluxo de água capilar ascendente.

### **3.4 - Métodos para identificação**

Vários são os métodos para identificação de camadas compactadas ou adensadas. Os mais grosseiros são os métodos visuais, onde se podem constatar problemas de compactação quando, via de regra, a área apresenta os seguintes aspectos: sulcos de erosão; resíduos vegetais não decompostos; encrostamento superficial; falhas localizadas de germinação; sintomas de falta de N e P mesmo com adubações adequadas; sintomas de toxidez de Mn em solos que receberam calagem.

Por sua vez, os métodos mais precisos são os laboratoriais e dentre eles, podem ser citados:

- densidade do solo ou massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Quanto maior a compactação, maior esse valor, para cada tipo de solo;
- determinação de porcentagem de macroporos, os quais são reduzidos à medida que é maior a compactação;

- determinação da taxa de difusão de oxigênio ( $\text{gO}_2/\text{cm}^2.\text{min}$ ). É menor em maior compactação e condutividade hidráulica saturada ( $\text{cm/h}$ ) que também se reduz com a compactação e trata-se de medição do fluxo de água através de amostra.

Entre estes dois níveis de precisão existe um método intermediário que se utiliza de aparelhos chamados penetrômetros ou penetrógrafos.

O princípio de funcionamento desses aparelhos é: tendo-se uma força aplicada sobre um cone de diâmetro conhecido, obtém-se o valor da resistência à penetração desse cone no perfil do solo.

Existem dois tipos de cones padronizados pela American Society of Agricultural Engineers (ASAE), conforme mostra a (Figura 5). O menor deles é utilizado para solos que oferecem maior resistência à penetração.

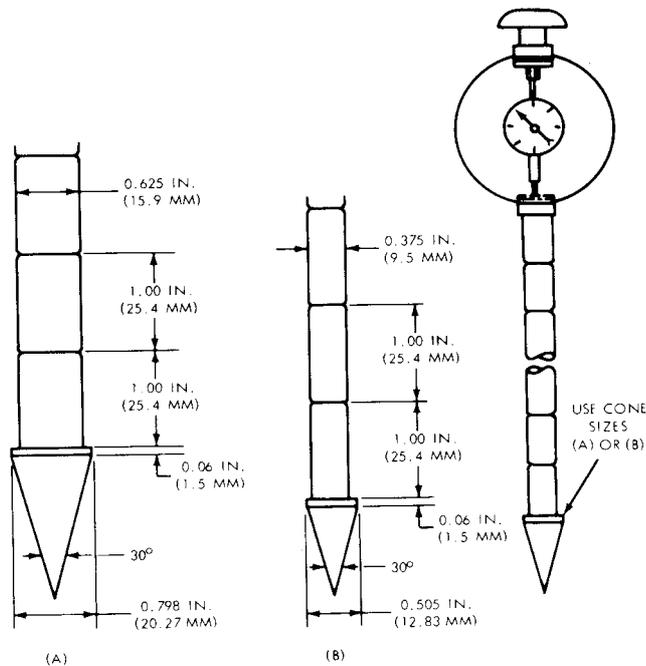


Figura 5 - Dimensões padronizadas pela recomendação ASAE R313. 2 (1997), para hastes e cones de penetrômetros e penetrógrafos.

### 3.4.1 - Penetrômetros

Os penetrômetros utilizados na determinação da resistência à penetração são basicamente de dois tipos: de impacto ou estático. O de impacto possui uma sonda de forma e seção conhecidas e é introduzido no solo através de impactos de energia conhecida.

O número de impactos necessários para introduzir a sonda até uma dada profundidade (10cm por exemplo) é o parâmetro utilizado para expressar a resistência à penetração. O penetrômetro estático é um instrumento mais simples que o de impacto, desta maneira, a maioria dos penetrômetros é do tipo estático.

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

A Figura 6 ilustra o gráfico obtido para um Latossolo Vermelho Escuro Orto, com teor de umidade de 23,6% (base seca) e de massa específica de 1,45g/cm<sup>3</sup>.

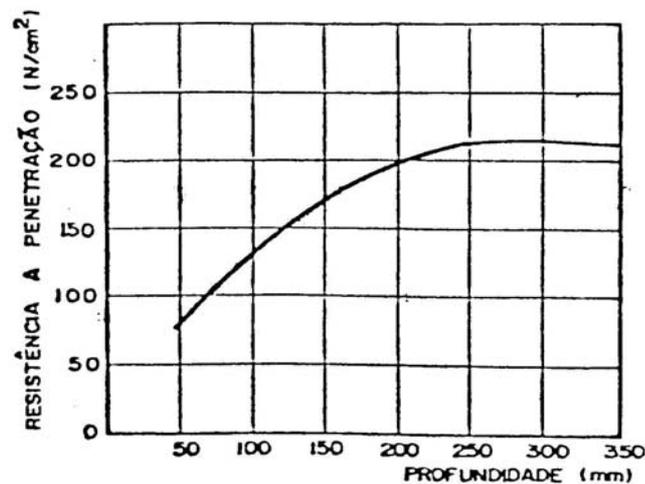


Figura 6 - Índice de cone em função da profundidade para um latossolo. Fonte: Relatório de Ensaio nº 947/83 – Centro Nacional de Engenharia Agrícola – CENEA, Ministério da Agricultura, Sorocaba, SP, 1983.

Diversos autores, tais como: CARTER (1967); HENDRICK (1969); PRATHER et al. (1970); CARTER (1969); WILFORD et al. (1972); SMITH & DUMAS (1978); WILKERSON et al. (1982); PHILLIPS & PERUMPRAL (1983); WOODRUFF & LENKER (1984) reportam o desenvolvimento de penetrômetros e penetrógrafos utilizadas para a mensuração das camadas de solo compactadas.

Alguns dos penetrômetros não são versáteis pois apresentam problemas de padronização, oferecem dados primários e/ou indiretos que exigem trabalho manual de contabilização para obtenção e compilação dos resultados ou geram gráficos mecanicamente, quase sempre de forma imprecisa. Outros possuem sistemas de aplicação de força e de aquisição de dados, mas não são portáteis. Todos porém não possuem geo-referenciamento de sua posição, pois quando foram desenvolvidos não havia a disponibilidade do sistema GPS.

No Brasil existe reportado o desenvolvimento de dois penetrômetros eletrônicos, não geo-referenciados, para identificação e quantificação de camadas compactadas de solos agrícolas.

O primeiro foi idealizado por BALASTREIRE & AMARAL (1994) na ESALQ - USP. Os autores observaram que os penetrômetros nacionais eram mecânicos e necessitavam de leitura visual e anotação manual dos dados, o que além de pouco prático poderia induzir a erros.

Construíram, então, um penetrômetro eletrônico composto basicamente por um microprocessador Z-80, um conversor A/D de 8 bits, uma célula de carga de 100kgf e um sensor de posição potenciométrico. Segundo os autores, o penetrômetro possui capacidade de armazenagem de dados de até 99 curvas com 200 pares de dados cada que, posteriormente, podem ser transferidos a um microcomputador para processamento.

O segundo desenvolvimento foi realizado por CAPPELLI et al. (1995) na FEAGRI-UNICAMP. Os autores apresentaram um penetrômetro eletrônico para a determinação do índice de cone de solos agrícolas desenvolvido com a finalidade de facilitar e agilizar a aquisição de dados no campo. O penetrômetro eletrônico consiste de um sensor de força e de posição que permitem a obtenção do índice de cone a cada centímetro de profundidade. Os sinais analógicos correspondentes à força e posição são eletronicamente condicionados, transformados em digitais, processados e armazenados. Um software em linguagem ASSEMBLER controlava a aquisição de dados, enquanto outro, em BASIC, processava e

armazenava os resultados. O sistema de aquisição de dados é composto de um módulo constituído por: microprocessador Z-80, condicionadores de sinais, conversor A/D, memórias RAM e EPROM, interface serial e por um microcomputador do tipo “palm-top” HP-95LX. O microcomputador HP-95LX funciona com o sistema operacional DOS e permite a transferência de dados, via interface serial, para microcomputadores compatíveis com o PC-IBM. Este penetrômetro mostrou-se versátil e de fácil utilização, porém, necessita de baterias de capacidade elevada para operação contínua em um período de oito horas, possui uma placa de circuitos eletrônicos com componentes com baixo índice de integração e apresentou custo final relativamente elevado, principalmente devido à “palm-top” HP-95LX.

Nenhum dos dois últimos penetrômetros reportados possui a capacidade de geo-referenciar os pontos de medição, o que torna pouco prático o mapeamento das camadas compactadas.

CAPPELLI et al. (1999) projetaram e construíram um protótipo de um penetrômetro eletrônico geo-referenciado em conjunto com a empresa DLG – Automação Industrial Ltda., apoiado pelo Programa de Inovação Tecnológicas em Pequenas Empresas - PIPE da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, capaz de mensurar o índice de penetração até 600mm de profundidade, geo-referenciar a medição e armazenar os dados.

### **3.5 - Resistência mecânica à penetração (RP)**

TORRES & SARAIVA (1999), descreve que o ideal seria que as medidas, para quantificar a resistência do solo, fossem feitas por métodos diretos, ou seja, através do próprio sistema radicular. Porém esses métodos são de difícil aplicação prática, principalmente na cultura de cana-de-açúcar, onde se cultivam milhares de hectares e o planejamento do preparo do solo na maioria das vezes é feito às pressas. Mesmo assim, os penetrômetros, apesar das limitações, ainda são um meio importante para avaliar a resistência do solo.

As dicotiledôneas são mais sensíveis ao impedimento mecânico do que as monocotiledôneas BRUSSARD & VAN FAASSEN (1994).

Trabalhos realizados pela Embrapa Soja, considera-se para os latossolos roxos, valores de resistência em torno de 2,5 MPa (solo na consistência friável) como baixos para serem restritivos ao crescimento radicular. Ainda por TORRES & SARAIVA (1999) afirmam que resistências em torno de 3,5 a 6,5 MPa, aparentemente, são as mais corretas para considerar

que um solo está com possíveis problemas de impedimento mecânico, onde deve-se considerar as resistências em torno de 3,5 MPa como um indicativo baixo de compactação e 6,5 MPa, como alto.

Na cultura da aveia EHLERS et al. (1983), verificaram que o crescimento radicular decresceu linearmente com o aumento da resistência à penetração.

No momento da determinação da resistência mecânica à penetração no campo, deve-se ter uma atenção redobrada com a umidade, pois ela pode interferir nos resultados ao longo do perfil do solo.

STOLF et. al. (1983), relatam que abaixo de 20cm a 30cm no perfil do solo, a amplitude de variação da umidade é menor e compromete menos os resultados referentes à resistência mecânica à penetração.

No monitoramento da compactação é necessário estudar o histórico de produção e de manejo da área, no caso da cultura de cana-de-açúcar por talhão. Faz-se necessário também observar algumas causas que estão relacionadas a compreensão da compactação do solo (Quadro 1). Há necessidade da verificação do que possa causar um decréscimo da produção, problemas climáticos, pragas ou doenças, deficiências nutricionais, acidez do solo, além de outras. Feito tudo isso e concluindo-se que a queda da produtividade não está relacionada a estes fatores mencionados anteriormente, o penetrômetro torna-se imprescindível para avaliar a compactação através das medidas de resistência mecânica à penetração (RP).

Quadro 1 - Causas relacionadas a compreensão da compactação do solo. Fonte: Site- Specific Management Guidelines

<b>Causas da Compactação</b>	<b>Questão</b>
Intensidade	Como está compactado? Com uma densidade elevada ou suave? Baixa compactação não pode inibir o crescimento da colheita ou causar problemas gerenciais
Extensão	A compactação distribue-se através do campo inteiro ou somente em áreas selecionadas? É a mesma em toda parte?
Profundidade	A que profundidade faz a compactação ocorrer de maneira mais elevada no campo?
Espessura	Como é densamente a camada compactada?
Tempo	Como a compactação muda ao longo de um ano?

Na Figura 7 observa-se uma estrutura de solo compactada.



Figura 7 - Característica de uma estrutura de solo compactada. Fonte: Embrapa Soja.

Na Figura 8 verifica-se uma característica de estrutura de solo não compactada, com torrões apresentando distribuição de agregados.



Figura 8 - Característica de estrutura de solo não compactada Fonte: Embrapa Soja

### **3.6 – Teor de água**

No momento do preparo do solo, o teor de água do solo deve ser baixo e na sua consistência friável. Altos índices de água não permitem uma boa reestruturação do solo, conforme mostra a Figura 9.

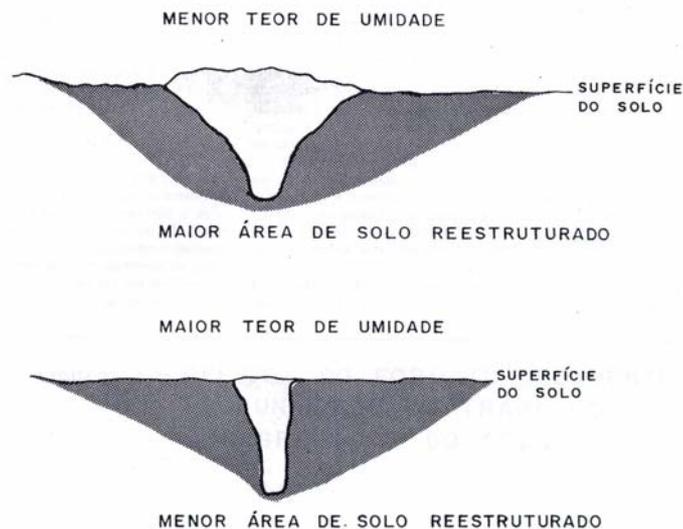


Figura 9 - Efeito da subsolagem aplicada em dois níveis de umidade. Fonte: TAYLOR & BELTRAME (1980).

Segundo SEIXAS (2000), os testes realizados no plantio de *Eucalyptus* spp, durante a época de chuvas resultaram em maior compactação do solo, em termos de incremento na condição inicial, refletindo a influência da umidade do solo em termos de rearranjo das partículas. A maior parte dos testes em condição úmida resultou na compactação do solo.

### 3.7 - Descompactação do solo

Segundo CASTRO (1985) a subsolagem é uma prática agrícola cujo único objetivo é soltar camadas compactadas do solo, abaixo daquela considerada arável (20 a 25 cm), alcançando profundidade de trabalho de pelo menos 30 a 35 cm. Os implementos especiais empregados são os subsoladores. Via de regra a subsolagem não deve ser repetida no mesmo local, em período menor do que a cada 3 anos.

A operação de subsolagem é uma prática agrônômica que deve ser aplicada apenas sob determinadas condições, não se constituindo em atividade obrigatória no preparo periódico de solo.

RIPOLI & MIALHE (1985) afirmam ainda, que a principal função da operação de subsolagem deverá ser a de romper as camadas de solo compactadas, possibilitando a infiltração da água, melhor penetração do sistema radicular para maior área de exploração no solo, melhor aeração e trocas gasosas, melhor drenagem e diminuição da erosão superficial.

Porém, para que esse trabalho torne-se eficiente, o solo a ser subsolado deve conter baixos teores de umidade a fim de que a operação não seja ineficiente, além de correr-se o risco de se aumentar à compactação pelo próprio tráfego da fonte de potência ou pelo órgão ativo do subsolador.

No decorrer dos anos a operação de subsolagem vem sendo amplamente utilizada nas regiões de agricultura intensiva, principalmente nas áreas de culturas anuais e nas de cana-de-açúcar. Apesar de sua intensa utilização resultados de pesquisa mostram que, na grande maioria dos casos a subsolagem vem sendo feita sem necessidade, e é aí que esse trabalho espera contribuir de forma significativa a minimizar esse problema, principalmente porque hoje as operações mecanizadas, têm que serem realizadas com máxima eficiência a um baixo custo, sempre tratando a área de maneira heterogênea (agricultura de precisão), e não como antigamente de maneira homogênea.

Segundo dados do AGRIANUAL 2001, a subsolagem representa o segundo maior custo por valor unitário das operações mecanizadas na cultura de cana-de-açúcar, só perdendo para gradagem pesada. Uma subsolagem realizada com um trator de HM Tp 126cv. 4x4 tem seu custo ao redor de US\$18,10/ha, correspondendo esse valor a 20% do custo das operações mecanizadas para fundação da cultura.

O dados sobre a relação custo hora-máquina – implemento, fornecidos por AGRINUAL 2001, estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Custo Operacional por Hora Trabalhada (US\$/hora). Fonte: Agrianual 2001

IMPLEMENTO	US\$	HORAS TRAB./ANO				
		100	200	300	400	500
Subsolador SP 5x5, 5 hastes/Piccin	739	0,98	0,49	0,33	0,24	0,20
Subsolador SP 9x5, 5 hastes/Piccin	850	1,13	0,56	0,38	0,28	0,23
Subsolador SP 9x9, 5 hastes/Piccin	1.111	1,47	0,74	0,49	0,37	0,29
Obs: Taxa de câmbio utilizada R\$1,80/US\$						

Estudos de vários autores demonstram que em Terra Roxa Estruturada com densidade aparente entre 1,00 a 1,05g/cm<sup>3</sup> ocorre uma redução na quantidade de raízes e elas se apresentam distorcidas. Entre 1,30 g/cm<sup>3</sup> a 1,40g/cm<sup>3</sup> as raízes não conseguem penetrar.

RIPOLI & MIALHE (1985) enfatizam que do ponto de vista fisiológico, a compactação afeta o crescimento das plantas devido a:

- redução do volume de macroporos, dificultando a taxa de infiltração de água, diminuindo as trocas gasosas na massa do solo, portanto, diminuindo o oxigênio disponível as raízes;
- certos elementos como o Manganês (Mn) e o Ferro (Fe) podem passar a formas reduzidas em meio pobre de oxigênio (O<sub>2</sub>) tornando-se tóxico às raízes e sendo de difícil correção;
- os enrugamentos e torções das raízes em camada compactada dificultam a absorção e translocação da solução nutritiva para a parte aérea das plantas, devido aos danos causados nos vasos vasculares das raízes. Numa situação como esta, por exemplo, de pouco valerão adubações, se o aproveitamento estiver comprometido.

Em determinadas culturas a compactação leva a planta desenvolver um maior número de raízes, porém mais finas e mais curtas.

Em outras, como a cana-de-açúcar, ocorrem prejuízos na multiplicação das raízes secundárias e emissão de radículas, antes de influir no alongamento das raízes principais.

CASTRO (1985) enfatiza que os solos cultivados com culturas anuais principalmente com trigo/soja apresentam-se, em sua maior parte, degradados pela intensa mecanização e erosão que vem sofrendo há vários anos. Por isso apresentam, entre 15 e 25 cm de profundidade, uma camada compactada que dificulta a infiltração de água e o crescimento das raízes. A origem das camadas compactadas está relacionada a três fatores principais: mecanização irracional do solo caracterizada por um excesso de movimentação e utilização de implementos inadequados a função que exercem, com conseqüente degradação da estrutura do solo; diminuição do conteúdo de matéria orgânica pelas perdas sucessivas por erosão e queima de resíduos, matéria orgânica esta, indispensável para a atividade biológica do solo, que por sua vez, é responsável pelas transformações e recomposição das suas características; e incidência de chuvas torrenciais sobre a superfície descoberta do solo, desagregando a sua estrutura pela energia de impacto das gotas.

É importante salientar que quando o agricultor faz a subsolagem a uma profundidade maior do que a necessária, estará ele desperdiçando dinheiro, pois além de exigir maior potência do trator, gasta-se um maior volume de combustível e conseqüentemente a operação apresenta um baixo rendimento de trabalho.

### **3.8 - Amostragem**

Segundo GUERRA (1988), os métodos estatísticos utilizam os dados obtidos pela amostragem. Esta operação é muito importante uma vez que com ela se tentará obter o máximo de informações do campo amostral.

A amostragem está ligada ao conceito de representatividade, já que para um fragmento ser qualificado como amostra de resistência mecânica à penetração (RP), deve ser representativa do corpo de onde foi extraída. O grau de representatividade depende do caráter homogêneo da (RP), ou seja, da maior ou menor discrepância que existe entre um ponto de (RP) e outro adjacente. Uma amostra no sentido estatístico, é a parte de uma dada população. Quando a população consiste em unidades bem misturadas e semelhantes, como é o caso de grãos de milho em um saco, qualquer amostra por menor que seja, representará o todo com grande aproximação. Entretanto quando a população é heterogênea e não está bem misturada, como sucede no caso de (RP), uma pequena amostra diferirá radicalmente do todo GUERRA (1988).

Quando os dados não estão espacializados ou geo-referenciados, ou seja, não se leva em conta a posição ou as coordenadas, faz-se necessário a utilização da amostragem baseando-se nos conceitos de estatística clássica, tais como média, variância e desvio padrão.

Por outro lado quando se obtém as coordenadas geodésicas ou topográficas, faz-se necessário a utilização da amostragem baseando-se nos conceitos de geoestatística, tais como grids, semivariogramas, modelos ajustados, krigagem, etc..

Cabe ressaltar que existem diversos tipos de esquemas amostrais, onde para se adotar o melhor tipo tem-se que levar em consideração o tipo de solo, a topografia, a uniformidade do terreno e as características físicas, químicas e biológica dos solos.

### **3.9 - Estatística Descritiva**

Em um sentido mais amplo, a Estatística Descritiva pode ser interpretada como uma função cujo objetivo é a observação de fenômenos de mesma natureza, a coleta de dados numéricos referentes a esses fenômenos, a organização e a classificação desses dados observados e a sua apresentação através de gráficos e tabelas, além do cálculo de coeficientes (estatísticas) que permitem descrever resumidamente os fenômenos TOLEDO & OVALLE (1987).

Quando se possui uma amostra representativa da população inicial, os 121 pontos (no caso, a resistência mecânica à penetração) passam, a partir deste momento, a ser tratados como dados e podem dar origem a diversas relações estatísticas, como, por exemplo, média aritmética, mediana, moda, variância, desvio padrão etc..

Segundo COSTA (1998), essas relações estatísticas possibilitam descrever, sob diversos ângulos, o conjunto de dados representado pela amostra. Por essa razão, o estudo dessas relações pertence ao campo da Estatística Descritiva.

### **3.9.1 - Estatística Inferencial**

O processo de generalização, que é característico do método inferencial, está associado a uma margem de incerteza. A existência da incerteza deve-se ao fato de que a conclusão, que se pretende obter para o conjunto de todos os pontos amostrais analisados quanto a determinadas características comuns, baseia-se em uma parcela do total de observações TOLEDO & OVALLE (1987).

COSTA (1998) descreve que a parte da estatística que se interessa pelas generalizações, ou seja, pelas transferências de conclusões dos pontos amostrais para a área, chama-se Estatística Inferencial.

Ainda por COSTA (1998), na transferência de conclusões (dos pontos amostrais para a área), o pesquisador vale-se de um poderoso recurso que é a Teoria das Probabilidades. Essa teoria permite avaliar (e controlar) o tamanho do erro que ele estará cometendo ao fazer generalizações (=inferências).

### **3.9.2 - Estatística Clássica**

A resistência mecânica à penetração de um solo cultivado com a cultura de cana-de-açúcar através de Estatística Clássica está baseada na teoria das probabilidades, ou seja, no estudo das variáveis aleatórias ou independentes.

Entende-se por variável aleatória aquela que pode tomar valores diferentes em diferentes lugares de observação, mostrando desta forma uma determinada independência de um lugar para outro, GUERRA (1988).

Subtende-se que para aplicar esta técnica na área de ciência do solo, as variáveis tais como a resistência mecânica à penetração (RP), o teor de umidade, etc., são variáveis

aleatórias, o que na realidade não ocorre, de modo que tais parâmetros variam de forma contínua ou descontínua de um ponto para o outro, de acordo com a presença ou ausência do fenômeno natural.

Ainda segundo GUERRA (1988) o fato de se considerar a resistência mecânica à penetração (RP) como uma variável aleatória, implica em que se deve realizar uma amostragem de forma tal a conciliar o caráter “independente” da RP.

Segundo LEVIN (1987), utiliza-se a estatística como um instrumento de descrição ou de decisão.

A estatística clássica, pode ser definida como sendo um conjunto de técnicas para a redução de dados quantitativos a um número menor de técnicas descritivas que sejam mais convenientes, e facilmente comunicáveis.

A moda, a mediana e a média, são as medidas de tendência central mais conhecidas. Prestam-se a apresentar o que é “médio” ou “típico” num conjunto de dados. A média é uma medida da tendência central exata; pode ser usada em operações estatísticas mais avançadas, tais como os testes para tomada de decisões.

A estatística para tomada de decisões pode ser determinada como um conjunto de técnicas que auxiliam na tarefa de se fazer inferências de amostras para populações e, a partir daí, auxiliam nos testes das hipóteses levantadas sobre a natureza da realidade LEVIN (1987).

A média aritmética é definida como sendo a soma de um conjunto de dados dividido pelo número de dados desse conjunto KENEDY & NEVILLE (1976):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots(2)$$

onde:  $\bar{x}$  = média

$x_i$  = valor

n = número total de dados

A amplitude total, o desvio padrão médio e o desvio padrão são medidas de variabilidade. Prestam-se a mostrar a maneira como os dados agrupam-se em torno do centro de distribuição LEVIN (1987).

O desvio padrão é uma medida de variabilidade confiável, de nível intercalar, que pode ser utilizada em operações estatísticas avançadas, descritivas ou inferenciais LEVIN (1987).

O desvio padrão é definido como sendo a raiz quadrada da variância da distribuição.

A variância por sua vez é definida como sendo a média quadrática ou média da discrepância ao quadrado, onde as discrepâncias são definidas como a diferença entre o valor do dado ( $x_i$ ) e a média populacional ( $\mu$ ), ou seja:

A variância da população pode ser denotada por:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \dots\dots\dots(3)$$

onde:  $S^2$  = variância da população  
 $n$  = número total dos dados

O desvio padrão da população fica sendo representado pela equação 4.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \dots\dots\dots(4)$$

onde:  $S$  = Desvio Padrão dos dados amostrados

O desvio padrão é expresso na mesma unidade dos dados observados ( $x_i$ ). Para diversos propósitos é conveniente expressar a dispersão dos resultados em termos percentuais KERNEDY & NEVILLE (1976). Para isto, define-se o coeficiente de variação como sendo a relação entre o desvio padrão e a média, ou seja:

$$CV = \frac{S}{x} 100 \dots\dots\dots(5)$$

onde:  $CV$  = Coeficiente de Variação  
 $S$  = Desvio Padrão

### 3.9.3 – Teste de normalidade

A curva normal pode ser usada na descrição de distribuições, na interpretação do desvio padrão e em afirmações relacionadas com a noção de probabilidade. Constitui um ingrediente essencial para a tomada e decisões estatísticas, a partir da qual pode-se generalizar

para populações as conclusões obtidas pela análise de amostras provenientes desta mesma população (LEVIN, 1987).

Segundo LEVIN (1987), a maioria dos fenômenos que ocorrem na natureza possuem distribuição de dados reais que ajustam-se ou se aproximam à curva normal, ou seja, com frequência o “mundo hipotético” da curva normal não difere de forma radical do “mundo real”. Neste sentido, a curva normal tem sido extensivamente usada como modelo de distribuição dos dados amostrais.

Observa-se, porém, que alguns fenômenos simplesmente não se ajustam à noção teórica da distribuição normal. Nestes casos, a curva normal não pode ser usada como “modelo” para os dados experimentais.

Segundo NETO (1977), Kolmogorov e Smirnov desenvolveram um método, em geral mais poderoso que o do  $\chi^2$ , para testar a aderência, em que a variável de teste é a maior diferença observada entre a função de distribuição acumulada do modelo e a da amostra.

O teste de Kolmogorov-Smirnov consta simplesmente da verificação do valor

$$D = \max |F(x) - G(x)| \dots\dots\dots (6)$$

e da comparação com um valor crítico tabelado em função de  $\alpha$  e n. Se d for maior que o valor crítico, rejeita-se  $H_0$ . Mediante o auxílio de tabelas estatísticas, calcula-se os valores críticos, para  $\alpha = 5\%$  e  $\alpha = 1\%$ .

### 3.10 - Geoestatística

De acordo com GUERRA (1988) o nome “Geoestatística” nasceu para se referir à Aplicação da Teoria das Variáveis Regionalizadas na resolução de problemas de Geologia e Mineração, e foi concebida e idealizada por MATHERON (1963) e constitui um critério científico e moderno de interpretação e estudo da maior parte dos fenômenos naturais.

Segundo VIEIRA (1997), a variabilidade espacial de propriedades do solo vem sendo uma das preocupações de pesquisadores, praticamente desde o início do século. Pesquisadores como MONTGOMERY (1971); WAYNICK (1918); HARRIS (1920), tem trabalhado com problemas de variabilidade, mas apenas recentemente surgiu uma ferramenta compreensível para analisar e usar a variabilidade espacial, chamada geoestatística e que ultimamente vem sendo inteiramente utilizada em ciência de solo e outras propriedades agrônômicas.

VIEIRA et al. (1981); VAUCLIN et al. (1983); VIEIRA et al. (1997), citam a geoestatística como o método mais comum de estudar a variabilidade espacial.

Ainda de acordo com VIEIRA (1997) a geoestatística é fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas, segundo a qual os valores de uma propriedade do solo estão de alguma forma relacionados à sua distribuição espacial; logo, as observações tomadas a curtas distâncias devem ser semelhantes do que aquelas tomadas a distâncias maiores. As ferramentas da geoestatística permitem a análise de dependência espacial, como também, a estimativa de dados, para locais não amostrados, através de um estimador sem tendenciosidade. Com a utilização dessas ferramentas podem analisar adequadamente dados de experimentos, com possibilidade de obter informações escondidas para a estatística clássica e efetuar análise do efeito da qualidade do solo no rendimento das culturas.

Abaixo apresentam-se alguns conceitos e definições básicas sobre Teoria das Variáveis Regionalizadas, segundo INPE (2002):

- A partir da introdução da geoestatística, surge nas Ciências da Terra um novo tipo de variáveis denominadas Variáveis Regionalizadas (V.R.);
- Uma Variável Regionalizada : é uma variável distribuída no espaço; usada para representar um fenômeno natural. Ex: o teor de argila contido no solo, pode ser considerado como uma V. R.;
- Os fenômenos naturais, ou as V. Rs., portam sempre consigo um duplo aspecto: um estruturado e um aleatório;
- O aspecto Estruturado : está relacionado com a distribuição global do fenômeno natural. Ex:- Numa área poluída, existem zonas as quais têm, em média, uma maior quantidade de metal pesado que em outras;
- O aspecto Aleatório : está relacionado com comportamento local do fenômeno natural. Ex:- dentro de uma zona, de uma área poluída, o conteúdo de metal pesado apresenta flutuar aleatoriamente. Em outras palavras, é impossível prever com exatidão o teor de metal pesado num determinado ponto.

### **3.10.1 - Objetivos da Geoestatística**

Segundo VIEIRA (1997) quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso pela dependência espacial, a estatística clássica deve ser abandonada e dar lugar a uma estatística relativamente nova: a Geoestatística.

GUERRA (1988) relata que a Geoestatística se propõe estudar dois objetivos principais:

- extrair da aparente desordem dos dados disponíveis, uma imagem da variabilidade dos mesmos, e uma medida da correlação existente entre os valores tomados em 2 pontos do espaço. Este é o objetivo da análise estrutural e se consegue através do Semivariograma que expressa a dependência espacial entre as amostras.
- medir a precisão de toda predição ou estimativa feita através de dados fragmentados, ou seja, havendo dependência espacial, pode-se estimar valores da propriedade em estudo para os locais não amostrados dentro do campo, sem tendenciosidade e com variância mínima, pelo método denominado Krigagem.

### **3.10.2 - Variável regionalizada (VR)**

GUERRA (1988) relata que a Geoestatística está baseada na teoria da Variáveis Regionalizadas (V.R), entendendo como tal uma função que varia de um lugar a outro no espaço com certa aparência de continuidade. Isto é, são variáveis cujos valores são relacionados de algum modo com a posição espacial que ocupam.

SEIXAS (2000) diz que as propriedades são intermediárias entre uma variável totalmente aleatória e uma totalmente determinística, apresentam continuidade de ponto para ponto, mas as mudanças são tão complexas que não são possíveis de descrever por nenhuma função determinística.

Exemplos: cotas topográficas, salinidade de um estuário, potencial de um campo elétrico, teor de um elemento químico.

GUERRA (1988) apresenta os seguintes conceitos:

- A localização: a V.R. somente toma seus valores importantes no campo geométrico em que a mesma foi definida, ou seja, no espaço geométrico onde a

variável é susceptível de tomar valores definidos e no interior do qual será estudada sua variação.

- Embora uma V.R. seja espacialmente contínua, não é normalmente possível saber seu valor em todos os locais. Geralmente, os seus valores são conhecidos apenas através de amostras que são recolhidas em localizações específicas. O tamanho, forma, orientação e arranjo espacial destas amostras constituem o suporte geométrico da variável regionalizada.
- A continuidade: a V.R. que se apresenta com uma continuidade mais ou menos estável em sua variação espacial, pode ser expressa através de uma flutuação mais ou menos importante entre os valores de amostras vizinhas. Esta flutuação reflete por outro lado o grau de dependência ou independência que existe entre um valor e outro. Existem circunstâncias, onde a continuidade raramente existe. Neste caso costuma-se dizer que está diante de um efeito de pepita. Este efeito deriva de dois fatores: possível existência de erros de amostragem, e existência de micro regionalizações que a escala de amostragem não permite detectar.
- Anisotropia: a V.R. pode apresentar uma continuidade espacial diferenciada segundo direções distintas.

### 3.10.3 - Semivariograma

O semivariograma em termos práticos é a ferramenta matemática que permite, estudar a dispersão natural das V.R., e que em nosso caso representa o grau de continuidade da resistência mecânica à penetração (índice de cone).

O semivariograma é, por definição:

$$\gamma(h) = 1/2E\{Z(\chi_i) - Z(\chi_i + h)\}^2 \dots\dots\dots(7)$$

e pode ser estimado por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(\chi_i) - Z(\chi_i + h)]^2 \dots\dots\dots(8)$$

Onde:

$\gamma(h)$  é a semivariância para o intervalo  $h$ ,

$N(h)$  é o número de pares de dados que distam  $h$  entre eles,

$Z(x_i) - Z(x_i+h)$  é o valor da diferença de um par de dados que distam  $h$  entre eles.

Ainda de acordo com SEIXAS (2000), todos os possíveis pares são examinados. Quando a distância entre pares é zero, o valor em cada ponto é comparado com ele próprio, e logo as diferenças são 0 e o valor da semivariância também zero. Se a distância  $h$  é pequena, os pontos a serem comparados são muito semelhantes e estão bastante relacionados entre eles, pelo que o valor da semivariância é reduzido (efeito pepita). À medida que aumenta a distância (alcance), a semivariância estabiliza num valor (patamar) que é igual à variância dos dados da população considerada, significando que já não existe qualquer relação entre os pares de dados considerados a esta distância.

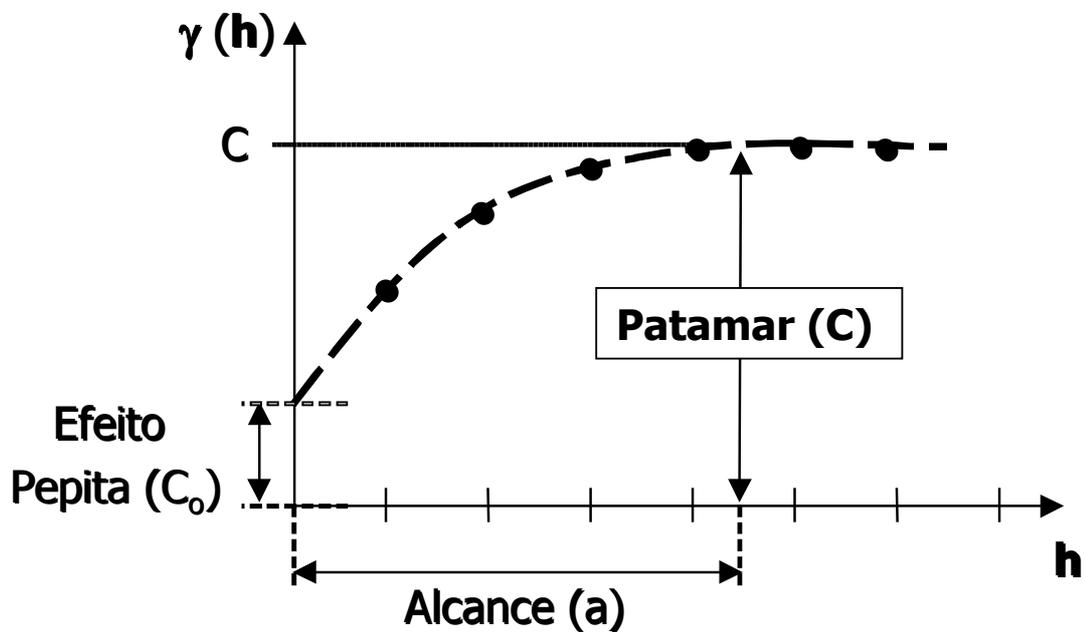


Figura 10 - Representação de um modelo ideal de semivariograma. Fonte: INPE 2002.

#### 3.10.4 - Ajustamento de modelos matemáticos aos semivariogramas experimentais

GUERRA (1988) relata que para se determinar a resistência mecânica à penetração é necessário ajustar semivariogramas teóricos que sejam representativos dos semivariogramas experimentais. Para tal ajuste é necessário a eleição de um modelo intrínseco, que se determina principalmente com a ajuda do aspecto geral do semivariograma experimental e das condições próprias da zona em estudo.

SEIXAS (2000) afirma que é habitual encontrar dois tipos de semivariogramas elementares, semivariogramas com e sem patamares. Entre os semivariogramas com patamares o mais comum é o esquema esférico que apresenta um comportamento linear junto à origem, existindo ainda o semivariograma exponencial e o gaussiano. Quanto aos semivariogramas sem patamar é comum encontrar uma classe de funções que dependem de  $h^\alpha$ , em que o semivariograma linear é um caso particular.

VIEIRA (1997) apresenta uma série de conceitos sobre semivariogramas com e sem patamar abaixo:

### 3.10.5 - Modelos com patamar

Nos modelos seguintes,  $C_0$  é o efeito pepita,  $C_0 + C_1$  é o patamar e  $a$  é o alcance do semivariograma.

a) Modelo Linear:

$$\gamma(h) = C_0 + \frac{C_1}{a} h \quad 0 < h < a \dots \dots \dots (9)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a \dots \dots \dots (9.1)$$

onde  $C_1/a$  é o coeficiente angular para  $0 < h < a$ . Nesse modelo, o patamar é determinado por inspeção; o coeficiente angular,  $C_1/a$ , é determinado pela inclinação da reta que passa pelos primeiros pontos de  $\gamma(h)$ , dando-se maior peso aqueles que correspondem ao maior número de pares; o efeito pepita,  $C_0$ , é determinado pela interseção da reta no eixo  $\gamma(h)$ ; o alcance,  $a$ , é o valor de  $h$  correspondente ao cruzamento da reta inicial com o patamar; e  $C_1 = \text{patamar} - C_0$ .

b) Modelo esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h < a \dots \dots \dots (10)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a \dots \dots \dots (10.1)$$

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita,  $C_0$ , e do patamar,  $C_0 + C_1$ , depois passando-se uma reta que intercepte o eixo  $y$  em  $C_0$  e seja tangente aos

primeiros pontos próximos de  $h=0$ . Essa reta cruzará o patamar à distância,  $a'=2/3 a$ . Assim, o alcance,  $a$ , será  $a=3 a'/2$ . O modelo esférico é linear até aproximadamente  $1/3 a$ .

Modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-3 \frac{h}{a}\right) \right] \quad 0 < h < d \dots \dots \dots (11)$$

onde:  $d$  é a máxima distância na qual o semivariograma é definido. Uma diferença fundamental entre o modelo exponencial e o esférico é que o exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto que o modelo esférico o atinge no valor do alcance. O parâmetro  $a$  é determinado visualmente como a distância após a qual o semivariograma se estabiliza. Os parâmetros  $C_0$  e  $C_1$  para os modelos exponencial e gaussiano são determinados da mesma maneira que para o esférico.

Modelo gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-3 \left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right] \quad 0 < h < d \dots \dots \dots (12)$$

### 3.10.6 - Modelos sem patamar

Esses modelos correspondem a fenômenos que tem uma capacidade infinita de dispersão e, por isso, não tem variância finita e a covariância não pode ser definida. Podem ser escritos da seguinte maneira:

$$\gamma(h) = C + Ah^B \quad 0 < B < 2 \dots \dots \dots (13)$$

O parâmetro  $B$  tem que ser estritamente maior que zero e menor que 2, a fim de garantir que o semivariograma tenha positivamente definida condicional.

Ainda segundo VIEIRA (1997) alguns fenômenos podem ter semivariogramas que mostram estrutura entrelaçada, ou seja, mais de um patamar e mais de um alcance. Isso acontece quando se tem diferentes escalas de variabilidade nos dados.

Em situações como essa é necessário ajustar mais de um modelo, ou um modelo para cada estrutura, pois um modelo único não é suficiente para representar o semivariograma.

### 3.10.7 - Modelos de semivariogramas

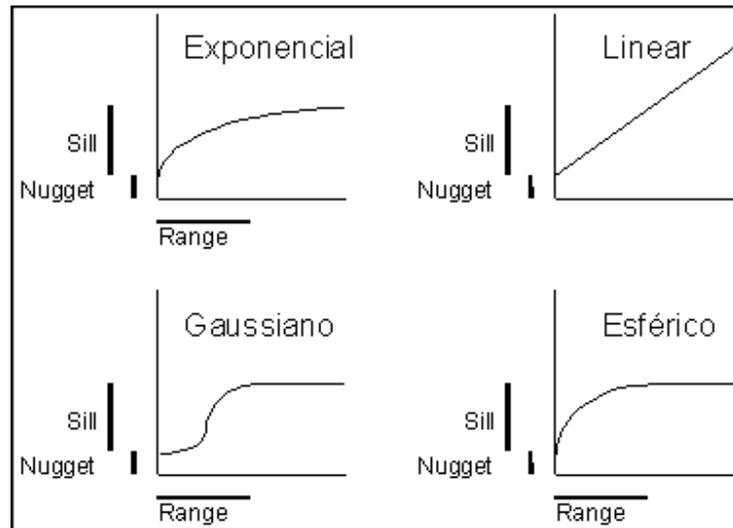


Figura 11 - Modelos de semivariogramas. Fonte: SEIXAS (2000).

### 3.10.8 - Interpolação de dados

VIEIRA (1997) relata que quando conhecido o semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as amostras, pode interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo sem tendência e com variância mínima. O método de interpolação chama-se krigagem, nome dado por Matheron (1963) em homenagem ao matemático sul-africano Krige. Suponha-se, então, que se queira expressar o resultado do trabalho em forma de mapa de isolinhas ou de superfície tridimensional. A precisão da localização das isolinhas entre dois pontos é extremamente dependente da densidade de pontos por área e, conseqüentemente, da distância entre os pontos. A maneira mais comum de localizar uma isolinha entre dois pontos é pela interpolação linear.

De acordo com SEIXAS (2000), quando está estudando um determinado espaço (um estuário, um lago, um aterro sanitário, um determinado tipo de solo), é obviamente impossível recolher um grande número de amostras. Porém o objetivo é geralmente compreender o comportamento da população, a partir dos pontos amostrados. Tradicionalmente um algoritmo de simples interpolação gera um mapa de isolinhas da concentração dos poluentes. Este

algoritmo tem apenas por base os valores de cada um dos pontos e as distâncias relativas entre eles. O desenho das isolinhas não assenta sobre quaisquer princípios estatísticos.

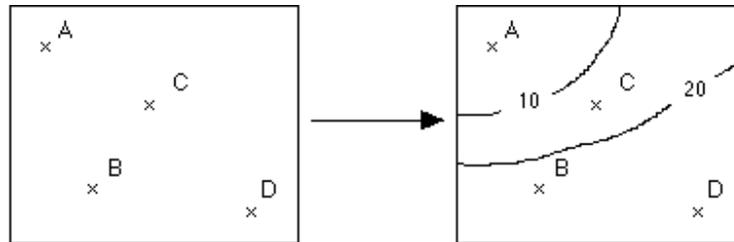


Figura 12 - Interpolação a partir de quatro estações de amostragem. Fonte: SEIXAS (2000).

A técnica de krigagem assume que os dados recolhidos de uma determinada população se encontram correlacionados no espaço. Isto é, se num tipo de solo a concentração sódio é  $x$  num determinado ponto, é muito provável que se encontrem resultados muito próximo de  $x$  quanto mais próximos se estiver do ponto  $x$  (princípio da geoestatística). Porém, a partir de determinada distância de  $x$ , certamente não se encontrarão valores aproximados de  $x$  porque a correlação espacial pode deixar de existir.

SEIXAS (2000) relata que BLUE (best linear estimator) é linear porque as suas estimativas são combinações lineares ponderadas dos dados existentes; é não enviesada pois procura que a média dos erros (desvios entre o valor real e o valor estimado) seja nula; é a melhor porque os erros de estimação apresentam uma variância (variância de estimação) mínima.

A Krigagem é um método de interpolação que permite estimar um valor de  $Z(x)$  num determinado ponto  $x_0$ .

baseado numa média móvel ponderada:  $Z^*(x_0) = \sum_i a_i Z(x_i)$

os pesos ( $a_i$ ) atribuídos as amostras são calculados de forma a minimizar a variância estimada:  $\sigma_k^2 = \text{var}[Z(x_0) - Z^*(x_0)]$ . Esta variância é calculada em função de um modelo selecionado com base num variograma, e a localização de cada uma das amostras em relação as outras e os pontos que se pretendem estimar.

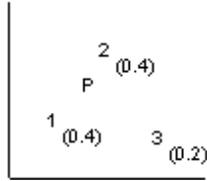


Figura 13 - Atribuição de diferentes pesos aos valores das estações 1, 2 e 3 no cálculo do valor estimado do ponto P. Fonte: SEIXAS (2000).

Os valores dos pesos  $a_i$  são obtidos do sistema de equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_j a_j \gamma(x_i - x_j) = \gamma(x_i - x_0) - \mu \dots\dots\dots(14) \\ \sum_i a_i = 1 \dots\dots\dots(14.1) \end{array} \right.$$

A variância dos erros é dada por:

$$\sigma_k^2 = \mu + \sum_i a_i \gamma(x_i - x_0) \dots\dots\dots(15)$$

Ainda segundo SEIXAS (2000) o termo krigagem abrange um conjunto de métodos, sendo os mais usuais :

- Krigagem simples: assume que as médias locais são relativamente constantes e de valor muito semelhante à média da população que é conhecida. A média da população é utilizada para cada estimaco local, em conjunto com os pontos vizinhos estabelecidos como necessários para a estimaco.
- Krigagem ordinária: as médias locais não são necessariamente próximas da média da populao usando-se apenas os pontos vizinhos para estimaco. É o método mais usado em problemas ambientais.
- Co-krigagem: É uma extensão do anterior a situaes em que duas ou mais variáveis são espacialmente dependentes e a variável que se quer estimar não está amostrada com a intensidade em que as outras variáveis dependentes, utilizando-se os valores destas e as suas dependências para estimar a variável requerida.

### 3.11 - Aplicações da geoestatística na agricultura

DAVIDOFF et al. (1986) verificaram que dados de temperatura do solo seguiram distribuição normal. Para profundidades maiores que 30 cm, a temperatura mostrou estrutura espacial com um alcance de 25 m e uma segunda estrutura espacial, entre 25 e 50m, mostrando o caráter hierárquico dessa propriedade.

LIBARDI et al. (1986) buscaram avaliar a variação espacial da umidade, textura e da densidade de partículas. A partir de amostras retiradas a cada 50 cm, ao longo de uma transeção de 150 m, concluíram através da utilização de semivariogramas, valores de alcance de 16 m para umidade, 15 m para argila, 10 m para areia e 40 m para silte.

LASCANO & HATFIELD (1992) determinaram densidade do solo e textura em cada ponto após irrigação pesada, onde mediram durante 4 dias. Através de duas transeções de 50 m, perpendiculares entre si, e cruzando no início, com espaçamento de 1 m entre pontos, constataram o crescimento do Cv para evaporação com o tempo e normalidade dos dados. Textura mostrou valores de Cv entre 5 e 12%, e densidade do solo da ordem de 6,5%. Os semivariogramas mostraram-se sem estrutura.

Através de medidas de resistência mecânica à penetração feitas ao longo de transeções, para solo seco e para solo úmido, LEY & LARYEA (1994) constataram que a estrutura espacial dessa propriedade apresentou-se igual à identificada para umidade, sendo descrita por semivariograma com crescimento linear para solo seco e com bom ajuste de um modelo esférico para o solo úmido, com alcance variando entre 20 e 30 m. Ainda se tratando de resistência mecânica à penetração, MOOLMANN & Van HUYSSTEEN (1989) mediram resistência mecânica à penetração segundo uma malha irregular e trabalharam os resíduos normalizados obtidos aplicando-se logaritmo aos dados originais. Com os respectivos semivariogramas experimentais obtidos, ajustaram modelos esféricos com alcance entre 8,5 e 10 metros.

Outras propriedades físicas do solo foram estudadas por PATGIRI & BARUAH (1995a), que ao estudarem a porosidade total do solo e o conteúdo de água na saturação através de uma malha retangular com espaçamento de 50 metros verificaram que os semivariogramas apresentaram crescimento constante. Ainda por PATGIRI & BARUAH (1995b) fazem interpolação por krigagem das propriedades estudadas e concluem que essa

técnica permite a estimativa de um valor médio para área com um número de amostras 2,5 vezes menor que aquele identificado de técnica convencional.

GONÇALVES (1997), aborda uma série de observações a cerca das propriedades físicas do solo que geralmente apresentam estrutura espacial com alcances da ordem de poucos metros até algumas dezenas de metros, como se pode constatar nos resultados da maioria dos trabalhos citados, espaçamentos da ordem de poucos metros seriam convenientes para malhas de amostragens para essas propriedades, ao menos como ponto de partida dos estudos. No entanto, as áreas cultivadas assumem, em muitos casos, dimensões que tornariam inviável o esforço amostral nessa pequena escala. Ainda por GONÇALVES (1997), amostragem com grande espaçamento tende a gerar semivariogramas com o efeito pepita muito elevado, ou seja, não detectando a estrutura espacial da propriedade na curta escala. A amostragem com diferentes espaçamentos onde se caracteriza uma malha fina para se monitorar a variação do curto alcance e uma malha mais grossa para a variação de grande alcance, tem sido preocupação de diversos pesquisadores.

## 4 - MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 – Material

A relação dos materiais compreende, basicamente, a área onde foram tomados os dados experimentais e os equipamentos e softwares utilizados.

#### 4.1.1 – Área experimental

A área experimental escolhida para a tomada de dados, foi de renovação da cultura de cana-de-açúcar, pertencente à Usina Santa Lúcia S/A, situada no município de Araras/SP.

O talhão utilizado denomina-se FSL 14 e possui 12,59ha dos quais 1,21ha (110m x 110m) foram demarcados para o levantamento dos dados. O tipo de solo encontrado conforme classificação atual da EMBRAPA (1999) foi o nitossolo vermelho, onde o talhão apresentou uma declividade média de 5%.

O ponto central da área experimental, denominado F6, possui as seguintes coordenadas geodésicas: latitude  $-22^{\circ}20'44,6889''$ , longitude  $-47^{\circ}25'00,9385''$ .

A Figura 14 mostra uma vista geral da área experimental.



Figura 14 - Vista geral da área experimental.

#### **4.1.2 – Equipamentos**

Os equipamentos utilizados no presente trabalho foram adquiridos pelos projetos números 97/14127-8, 98/15042-9 e 98/09182-2, apoiados pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP e estão disponíveis no Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC/FEAGRI: um penetrômetro eletrônico, um GPS portátil e um notebook para processar os dados.

Os principais equipamentos utilizados estão descritos a seguir.

##### ***Penetrômetro eletrônico***

O penetrômetro eletrônico utilizado foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação e Controle da FEAGRI/UNICAMP, juntamente com a empresa DLG – Automação Industrial, localizada em Sertãozinho-SP. Seu desenvolvimento teve apoio da FAPESP, no âmbito do Programa de Inovação Tecnológica em Pequenas Empresas – PIPE. A Figura 15 mostra o penetrômetro eletrônico utilizado para a determinação dos dados de resistência mecânica à penetração em função da profundidade.



Figura 15 - Penetrômetro eletrônico.

O penetrômetro eletrônico tem capacidade para armazenar em sua memória até 1000 pontos amostrais e possui autonomia para operar até oito horas ininterruptas. Possui, ainda, interface serial para comunicação que permite transferir os dados para um microcomputador.

Suas principais características são:

- profundidade máxima de penetração de 600mm;
- sensor de profundidade do tipo ultra-som;
- força máxima de penetração de 100kgf;
- trabalha com 2 tipos de cones de penetração padronizados segundo ASAE R313.2 (1997);
- interface serial padrão RS-232C;
- teclado numérico multifunção;

- *display* de cristal líquido, alfanumérico, 2 linhas x 16 colunas, com *backlight*.
- capacidade de processamento com a utilização de microcontrolador RISC de 16 bits, operando com frequência de *clock* de 4MHz;
- capacidade do banco de memória de armazenamento não volátil para 128kB;
- bateria de Níquel-Metal para alimentação do equipamento, com tensão de 12Vcc e capacidade de 1,2Ah;
- consumo de corrente (aproximadamente 27mA em modo *standby* e 40mA em operação);
- software com a incorporação de menus funcionais.

A célula de carga utilizada é do tipo flexão com capacidade nominal de 100kgf, modelo A-100, fabricada pela Alfa Instrumentos. Suas principais características são:

- sensibilidade nominal:  $2\text{mV/V} \pm 10\%$ ;
- erro combinado:  $< 0,03\%$  da saída nominal;
- temperatura de trabalho útil: -5 a  $+60^{\circ}\text{C}$ ;
- temperatura de trabalho compensada: 0 a  $+50^{\circ}\text{C}$ ;
- máxima sobrecarga sem alterações: 150% da capacidade nominal;
- sobrecarga de ruptura: 300% da capacidade nominal;
- excitação máxima: 15Vcc ou Vca;
- grau de proteção: IP67.

A medição da profundidade de penetração da haste é realizada pela tecnologia de ultrassom, sem a necessidade de medição da distância por contato físico.

O penetrômetro possui uma precisão de cerca de um milímetro na determinação da profundidade de penetração, considerada suficiente para a utilização proposta.

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

Para determinação das coordenadas geodésicas dos marcos utilizou-se um sistema de posicionamento geográfico, operando com correção diferencial, composto pelos seguintes equipamentos:

- **Receptor GPS base** - Receptor GPS marca Trimble, modelo AgGPS 122 Base, com as seguintes características principais: 12 canais paralelos, precisão sub-métrica, taxa de coleta de dados de até 10 pontos/segundo, gera sinal para correção diferencial no padrão RTCM-SC 104, receptor e antenas selados, processamento de informações em tempo real, duas portas padrão RS-232C.
- **Rádio transmissor fixo** - Constituído por um modulador de sinais acoplado a um transmissor de rádio, marca Trimble, modelo Trimmark II Base, com potência de 25W, frequência de transmissão UHF, alcance de até 15 km, com antena externa.
- **Rádio receptor móvel** - Constituído por um receptor móvel de rádio acoplado a um demodulador de sinais, marca Trimble, modelo Trimmark II Rover, frequência de recepção UHF, com antena externa.
- **Receptor GPS móvel** - Receptor GPS marca Trimble, modelo AgGPS 132, com as seguintes características principais: 12 canais paralelos, precisão submétrica, taxa de coleta de dados de até 10 pontos/segundo, recebe sinal para correção diferencial no padrão RTCM-SC 104, receptor e antena selados, processamento de informações em tempo real, duas portas padrão RS-232C.

### *Estação total*

Para a demarcação da área e dos pontos amostrais foi utilizada uma Estação Total da marca Nikon, modelo DTM 521. Suas principais características são:

- Teclado alfa numérico com cursor direcional;
- Memória interna para até 8.000 pontos divididos em até 8 obras;
- Peso reduzido de 4,9kg;
- Leitura mínima de 5 segundos;
- Erro máximo de 0,02mm a cada 10m.

### ***Balança***

Foi utilizada uma balança da marca Metler com precisão de três casas decimais para pesagem das amostras de água.

### ***Estufa***

Utilizou-se uma estufa na temperatura de 105°C, durante 24 horas para secagem e determinação do teor de água das amostras.

### ***Computador Pessoal Portátil “Notebook”***

O processamento dos dados e toda a documentação foram realizados utilizando-se um microcomputador portátil, cujas principais características são:

- marca Compaq;
- modelo Presario 1700;
- processador Pentium III – 700MHz;
- 256MB de memória RAM;
- tela de matriz ativa;
- uma interface PC Card;
- duas interfaces USB;
- uma interface paralela;
- adaptador USB/Serial.

### **4.1.3 – Programas Computacionais “Softwares”**

Foram utilizados softwares diversos no processamento dos dados e na confecção da documentação. Os principais são:

- Pacote Office, versão 2000;
- Surfer 7.0;
- Variowin 2.2.

#### **4.1.4 – Outros materiais**

Foram ainda utilizados outros materiais e equipamentos, tais como: trenas; trados para determinação do teor de água; cápsulas para acondicionamento do solo; estacas de madeira para demarcação dos pontos, equipamentos de fotografia e de informática, etc.

#### **4.2 -Métodos**

Os métodos apresentados são concernentes à caracterização da área experimental, às três metodologias de análises dos dados, denominadas respectivamente de *probabilístico*, *determinística* e *geoestatística* e à comparação entre as metodologias propostas.

##### **4.2.1 - Caracterização da área experimental**

A caracterização da área experimental, relacionada com o tipo de solo, a declividade média e seu histórico de utilização, foi baseada nas informações técnicas fornecidas pela Usina Santa Lúcia S/A, proprietária e usuária da área situada no município de Araras/SP.

##### **4.2.2 - Malha amostral**

A malha amostral constituiu-se de 121 pontos de coleta de dados igualmente espaçados, cada um localizado no centro de uma grade de 10m x 10m, formando uma área quadrada de 110m x 110m, ou seja, de 1,21ha, conforme mostra a Figura 16.

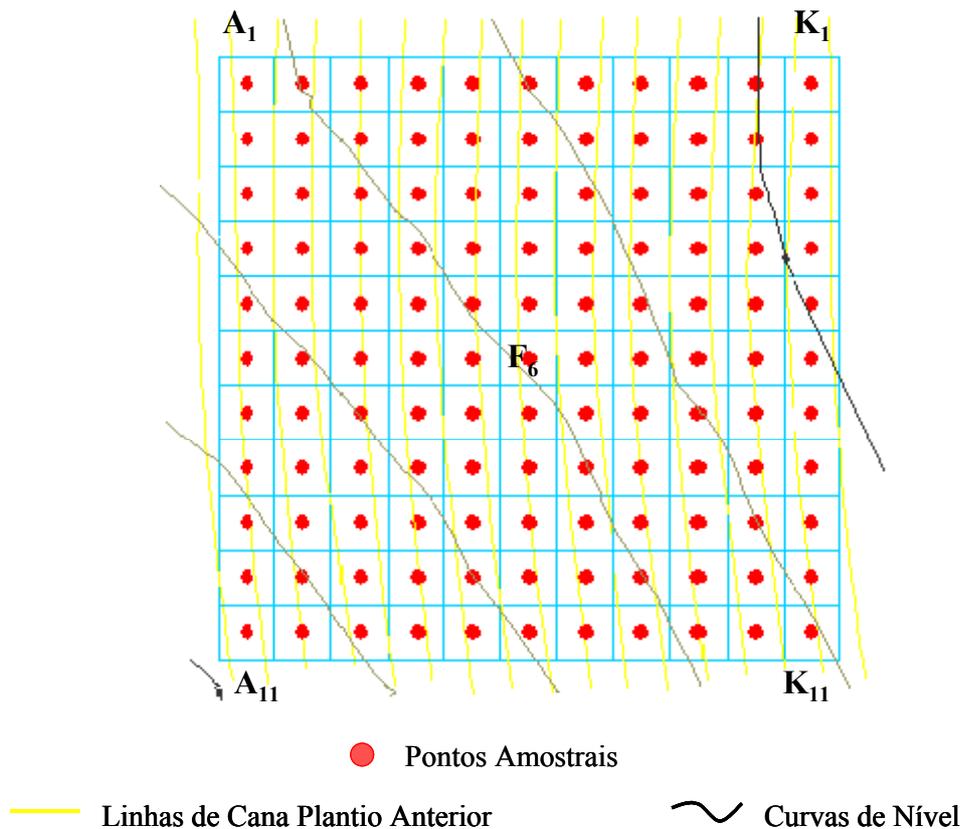


Figura 16 - Posicionamento dos pontos amostrais na área experimental.

A locação dos pontos foi realizada por meio da geo-referenciação de dois marcos próximos à área de estudo e, a partir destes marcos, locou-se os pontos da grade, utilizando-se uma Estação Total.

Para geo-referenciar o marco 1 utilizou-se o receptor GPS base durante 10 horas, passando logo em seguida para o marco 2, onde através do receptor GPS móvel, mediante a utilização de rádio transmissão, transmitiu as informações via rádio do marco 1 para o marco 2, não se fazendo necessário esperar mais 10 horas.

Um sistema de posicionamento global - GPS operando com correção diferencial foi utilizado para a determinação das coordenadas geodésicas dos marcos. O sistema geodésico (datum geodésico) utilizado foi o WGS84 (World Geodetic System 84), já que o equipamento de GPS o utiliza como padrão.

A utilização da Estação Total possibilitou locar os pontos de retirada das amostras, com relação aos marcos, com um erro máximo de 0,02mm a cada 10m.

Os pontos de retirada de amostras foram denominados com as letras de “A” a “K”, representando as colunas da malha, e com os números de 1 a 11, representando as linhas da referida malha.

As coordenadas geodésicas dos pontos da realização das medições foram calculadas a partir das coordenadas geodésicas dos marcos e da linha de base definida pelos referidos marcos.

O software utilizado para a transformação das coordenadas geodésicas dos pontos, bem como a transformação dos marcos foi o Topograph, que é apropriado para esse tipo de tarefa.

#### **4.2.3 - Teor de água do solo**

O teor de água do solo influencia na magnitude da resistência mecânica à sua penetração. Neste trabalho registrou-se o teor de água do solo para possibilitar uma melhor análise da resistência mecânica à penetração, bem como, para serem utilizados em correções futuras, quando a pesquisa disponibilizar métodos confiáveis de correção da resistência mecânica à penetração em função da umidade e do tipo de solo.

No mesmo dia em que foi realizada a medição da resistência mecânica à penetração foram retiradas 36 amostras de solo para a determinação do seu teor de água.

A Figura 17 mostra a localização dos pontos onde foram retiradas as amostras de solo para a determinação do teor de água.

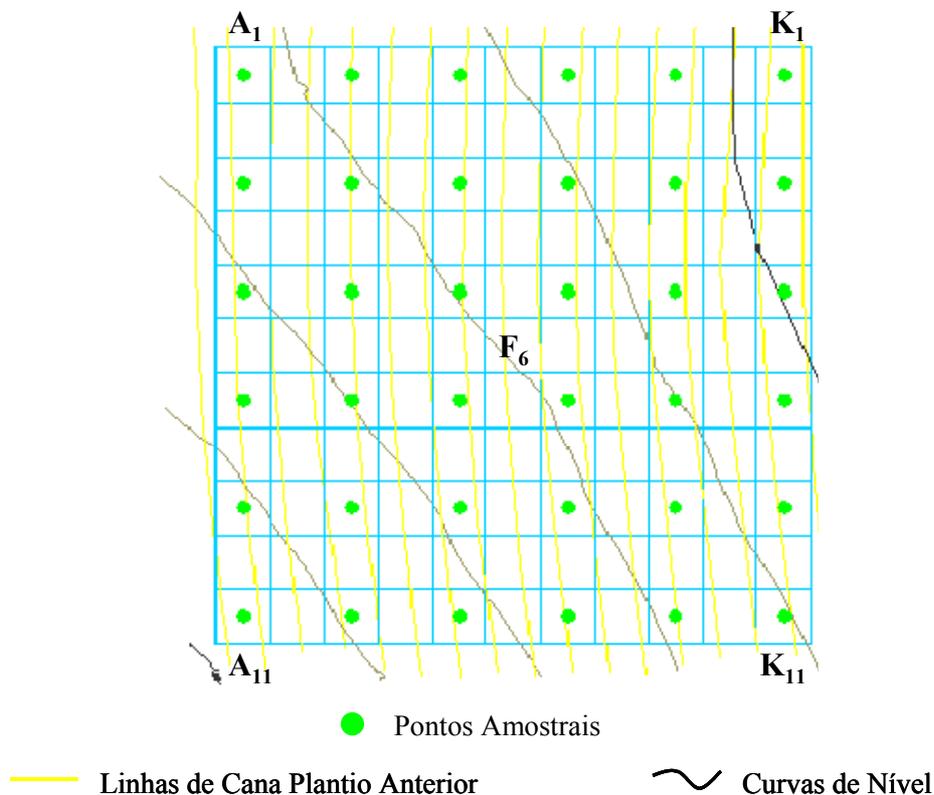


Figura 17 - Posicionamento dos pontos de retirada de amostras para determinação do teor de água.

Em cada um dos 36 pontos foram retiradas três amostras correspondendo respectivamente às camadas de solo de 0 a 200mm, de 200mm a 400mm e de 400mm a 600mm de profundidade. Os teores de água determinados representam o valor médio de cada camada considerada.

As amostras de solo foram acondicionadas em cápsulas e levadas ao laboratório de solos da UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, campus de Araras-SP, onde foram secas na estufa à 105°C por um período de 24 horas. Determinou-se o teor de água de cada uma delas, em base seca. Os dados obtidos estão apresentados no Anexo 2.

Os dados de água foram estatisticamente analisados para cada camada considerada. Inicialmente realizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar se os dados possuíam distribuição normal (ao nível de significância de 1%) e, portanto, poderiam ser analisados pela estatística descritiva, posteriormente, os parâmetros estatísticos descritivos da tendência

central (média e mediana) e de sua variabilidade (valor máximo, valor mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação) foram calculados. A curtose e a assimetria da curva de distribuição dos dados também foram calculadas e analisadas.

#### 4.2.4 – Resistência mecânica à penetração

A coleta dos dados da resistência mecânica à penetração foi realizada no dia 30 de julho de 2001, logo após a área ter sido demarcada com estacas. A Figura 18 mostra a coleta de dados com o penetrômetro eletrônico na área experimental.

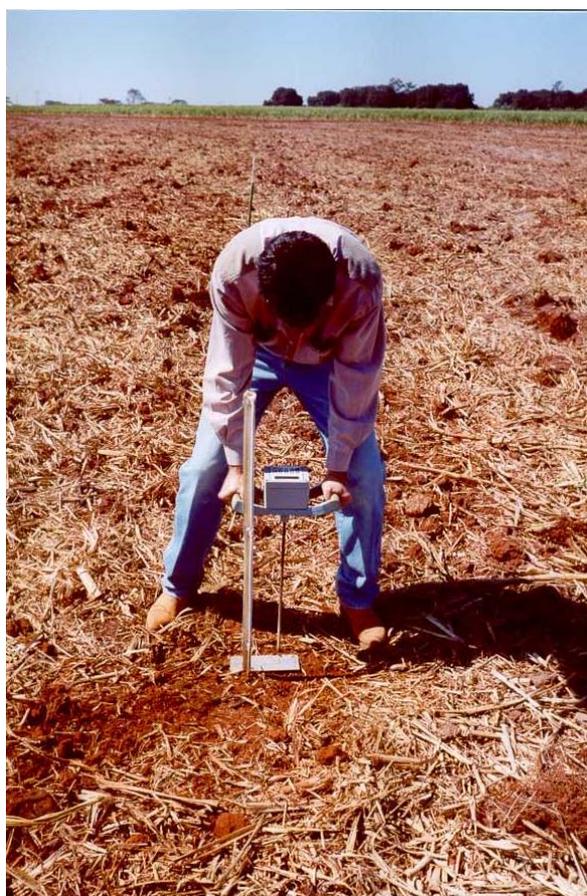


Figura 18 - Coleta de dados com o penetrômetro eletrônico.

Os valores de resistência mecânica à penetração em função da profundidade, coletados pelo penetrômetro eletrônico a cada 10mm de profundidade, foram transferidos do equipamento para o *notebook* na forma de arquivos “ASCII”. Estes dados foram exportados para uma planilha eletrônica Excel onde foram processados.

#### **4.2.5 - Análise da resistência mecânica à penetração**

Uma das formas mais utilizadas para diagnosticar a necessidade de proceder à subsolagem dos solos agrícolas baseia-se na observação da resistência mecânica à penetração, obtida por meio de penetrômetros ou penetrógrafos.

Neste trabalho são apresentados três métodos para análise dos dados, relativos à resistência mecânica à penetração dos solos agrícolas, obtidos por meio de um penetrômetro eletrônico.

##### ***Primeiro método - probabilístico***

Neste método, a resistência mecânica à penetração é obtida em função da profundidade em diversos locais da área em estudo. Posteriormente, confeccionam-se e analisam-se as curvas de resistência mecânica à penetração em função da profundidade conforme Figura 25, verifica-se a normalidade da distribuição dos dados e analisam-se os parâmetros estatísticos referentes à medida da tendência central e de sua variabilidade, e, finalmente, confeccionam-se e analisam-se as curvas de probabilidade de ocorrência de resistências mecânicas à penetração iguais ou superiores à considerada crítica em função do valor crítico de resistência mecânica à penetração.

O penetrômetro eletrônico utilizado registrou, em cada ponto amostral, a resistência à penetração a cada 10mm de profundidade, até atingir a profundidade máxima de 500mm, correspondente à profundidade máxima de operação do penetrômetro.

O comportamento da resistência mecânica à penetração no perfil vertical foi analisado, ponto a ponto, observando-se as curvas confeccionadas resistência mecânica à penetração em função da profundidade. Cada ponto amostrado gerou 50 pares de dados de resistência mecânica à penetração e profundidade de penetração que foram utilizados para a construção das curvas.

Inicialmente pretendia-se dividir o perfil vertical do solo em camadas horizontais coincidentes com aquelas utilizadas para a determinação de água do solo, porém, devido à profundidade máxima de operação do penetrômetro ser de 500mm e, ainda, baseando-se no estudo do perfil vertical do solo, onde se notou três camadas com comportamento semelhante em termos de resistência mecânica à penetração, decidiu-se dividir o perfil do solo em camadas distintas daquelas utilizadas no estudo do teor de água.

Os três perfis horizontais definidos para o estudo da resistência mecânica à penetração foram, em mm: de 0 a 150, 150 a 300 e de 300 a 500. O valor tomado como representativo de cada perfil, em cada um dos 121 pontos amostrais, foi a média das resistências mecânicas à penetração registradas pelo penetrômetro eletrônico nas respectivas camadas.

Esta metodologia foi adotada visando a diminuição do tamanho do banco de dados, já que um pré-estudo mostrou que não havia necessidade de se utilizar os dados obtidos de 10mm em 10mm para o estudo do perfil horizontal e que a média dos dados, de cada ponto da camada estudada, representava melhor o comportamento da resistência mecânica à penetração.

Os dados de resistência mecânica à penetração foram estatisticamente analisados para cada camada considerada. Inicialmente realizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar se os dados possuíam distribuição normal (ao nível de significância de 1%) e, portanto, poderiam ser analisados pela estatística descritiva, posteriormente, os parâmetros estatísticos descritivos da tendência central (média e mediana) e de sua variabilidade (valor máximo, valor mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação) foram calculados. A curtose e a assimetria da curva de distribuição dos dados também foram calculadas.

Foram realizadas inferências estatísticas quanto à probabilidade de se encontrar solos com resistência mecânica à penetração acima da considerada crítica, em cada camada estudada.

Por último, analisando-se as informações que o método oferece, pode-se obter subsídios para estabelecer o diagnóstico quanto à necessidade, ou não, de se proceder à subsolagem.

### ***Segundo método - determinístico***

Neste método, a resistência mecânica à penetração é obtida em função da profundidade nos locais previamente definidos na área sob estudo. O posicionamento para tomada dos dados pode ser realizado por meio de métodos topográficos convencionais ou por posicionamento feito com sistemas de GPS. No presente estudo o posicionamento dos pontos foi realizado como descrito no item 4.2.2 e os dados considerados foram os mesmos utilizados para o desenvolvimento da metodologia denominada *probabilística*.

O valor tomado como representativo da resistência mecânica à penetração foi, a exemplo da metodologia anterior, a média das resistências mecânicas à penetração registradas pelo penetrômetro eletrônico nas respectivas camadas.

Cada um dos 121 pontos experimentais representou uma área e um volume de influência.

O volume de solo correspondente a cada ponto foi representado por um paralelepípedo (Figura 19), cuja área da base foi formada pela área de influência de cada ponto (10m por 10m) e cuja altura correspondia à espessura da camada horizontal sob estudo. As camadas horizontais estudadas foram as mesmas utilizadas na metodologia *probabilística*.

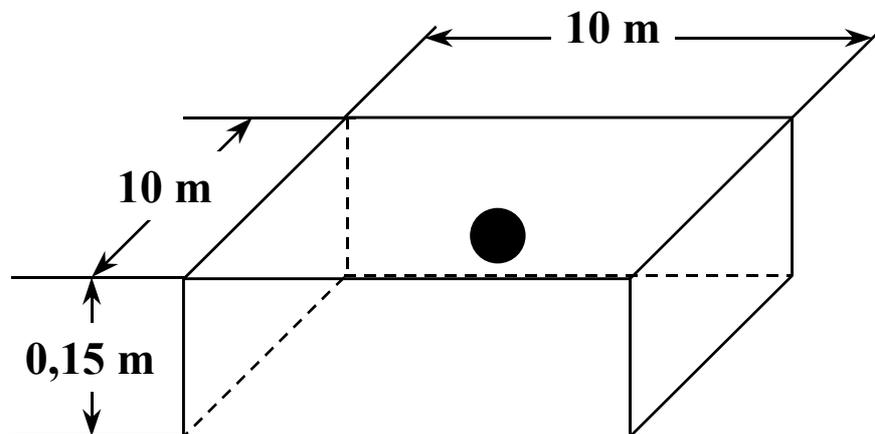


Figura 19 – Volume de solo correspondente para cada ponto.

Neste método, utilizou-se uma planilha eletrônica (Excel) para a realização dos cálculos e confecção dos gráficos.

O método *determinístico* baseia-se na porcentagem do número de pontos, portanto da porcentagem do volume de solo, onde ocorrem níveis de resistência mecânica à penetração acima da considerada crítica e em sua distribuição espacial, tanto no perfil horizontal quanto no vertical.

O volume total de solo estudado ( $6050 \text{ m}^3$ ) foi considerado como o paralelepípedo cuja área da base foi formada pela área total em estudo (110m por 110m) e cuja altura correspondia à máxima profundidade de penetração da haste do penetrômetro (500mm).

Pautado nestas definições, foram construídas curvas de porcentagem de ocorrência de resistência mecânica à penetração igual ou superior à considerada crítica, em função do valor considerado crítico para a resistência mecânica à penetração, para cada uma das camadas estudadas.

Com a planilha eletrônica desenvolvida foi possível fazer simulações, com respeito às camadas estudadas, quanto à localização dos pontos onde ocorreram resistência mecânica à penetração igual ou superior à considerada crítica.

Por meio da mesma planilha, foram construídas as curvas, para cada uma das camadas estudadas, de volume de solo a ser mobilizado em função do valor estabelecido como crítico para a resistência mecânica à penetração. Nestas curvas, o volume de solo a ser mobilizado foi o do paralelepípedo formado pela área de influência do ponto e pela máxima profundidade da camada estudada, já que a profundidade da operação de subsolagem compreende a espessura da própria camada bem como a das camadas que se posicionam acima da considerada.

Finalmente, analisando-se as informações que o método oferece, tais como: porcentagem de ocorrência de pontos com níveis de resistência mecânica à penetração acima do desejável, localização e distribuição espacial dos pontos críticos, bem como, o volume de solo necessário de se mobilizar, pode-se ter subsídios para estabelecer o diagnóstico quanto à necessidade, ou não, de se proceder à subsolagem.

### ***Terceiro método – geoestatístico***

Este método visa identificar e comprovar através da confecção de mapas de iso-resistência mecânica à penetração os dois métodos descrito anteriormente, ou seja, quais as sub-áreas, sofreram um maior ou menor índice de resistência mecânica média à penetração, dentro da malha de 10 x 10m.

Ao iniciar-se essa análise foram tomados como parâmetro a resistência mecânica média à penetração de cada ponto, na sua respectiva camada como descrito anteriormente pelos dois outros métodos, determinado pelo penetrômetro eletrônico e também pelas coordenadas geográficas no Sistema Universal Transversa de Mercator (UTM).

Os dados foram preparados de forma correta para utilização no software Variowin 2.2 que fornece subsídios para construção do semivariograma bem como o melhor ajuste de modelo.

Para a resistência mecânica à penetração pretende-se confeccionar três semivariogramas com o melhor ajuste, sendo um para cada profundidade de 0-150mm, 150-300mm e 300-500mm. Mediante a construção dos semivariogramas, utilizara-se os seus parâmetros para interpolar os pontos amostrais através do método denominado Krigagem e logo em seguida à construção de mapas de isoresistência mecânica à penetração pelo software Surfer.

Já no caso do teor de água utilizará a mesma metodologia descrita no parágrafo anterior para a resistência mecânica à penetração, onde pretende-se adotar um único semivariograma e um único mapa de isoumidade média, compreendendo toda profundidade de 0-600mm.

Contudo analisando-se as informações do método geoestatístico, tais como: construção de semivariogramas, Krigagem, mapas de isoresistência e isoumidade, espera-se mostrar a variabilidade espacial do nível de resistência mecânica à penetração, onde este método servirá de base para um sistema de suporte à decisão, fornecendo subsídios para estabelecer o diagnóstico quanto a necessidade ou não de se proceder a subsolagem.

## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 – Características da área experimental

O levantamento dos dados foi realizado após a erradicação das soqueiras e antes do preparo do solo para a implantação da nova cultura.

Segundo dados fornecidos pela Usina Santa Lúcia S/A o histórico da área, compreende os anos de 1988 a 2001. O plantio da cultura de cana-de-açúcar foi realizado em 01/02/1987, onde a variedade plantada foi SP711406. O Quadro 3 apresenta os dados anuais de produtividade e o tipo de colheita empregado.

Quadro 3 - Histórico da área 1988 a 1995

<b>Ano</b>	<b>Produção (ton/ha)</b>	<b>Tipo de colheita</b>
1988	170,47	manual
1989	112,47	manual
1990	89,73	manual
1991	112,37	manual
1992*	121,15	manual
1993	87,97	Mecanizada / cana inteira
1994	69,90	Mecanizada / cana inteira
1995	56,23	Mecanizada / cana inteira

\*Aplicação de torta de filtro

Após os oito cortes consecutivos realizados nos anos de 1988 a 1995, relatados anteriormente, houve a necessidade de renovação do talhão FSL14, devido à queda expressiva na produção.

Na renovação, como de costume na cultura de cana-de-açúcar, erradica-se a soqueira anterior, por meio do processo convencional: grades leves, intermediárias e pesadas ou ainda, pela eliminação química com herbicidas. Feito isto, havendo necessidade de se romper camadas compactadas, formadas em consequência da mecanização intensiva, realiza-se uma subsolagem e demais operações antes do plantio.

Após o preparo inicial do solo a Usina Santa Lúcia realizou o plantio em 16/02/96 com a variedade RB825336. Cultivou-se esta variedade de 1997 a 2001, com a produção e o tipo de colheita relatados no Quadro 4.

Quadro 4 - Histórico da área 1997 a 2001

Ano	Produção (ton/ha)	Tipo de colheita
1997	164,91	manual
1998	118,71	Mecanizada / cana picada
1999	104,43	Mecanizada / cana picada
2000	114,45	Mecanizada / cana picada
2001	73,50	Mecanizada / cana picada

## 5.2 - Posicionamento dos pontos amostrais

O sistema GPS, operando com correção diferencial, foi utilizado para a determinação das coordenadas geodésicas dos marcos. Para tanto, foram coletados dados num período de 24 horas.

Os resultados dos posicionamentos dos marcos M1 e M2, bem como, as coordenadas geodésicas dos 121 pontos de medição, obtidas com a Estação Total a partir da linha de base formada pelos marcos, estão apresentadas no Apêndice 1.

A Figura 20 apresenta a posição dos pontos experimentais em relação aos marcos geodésicos.

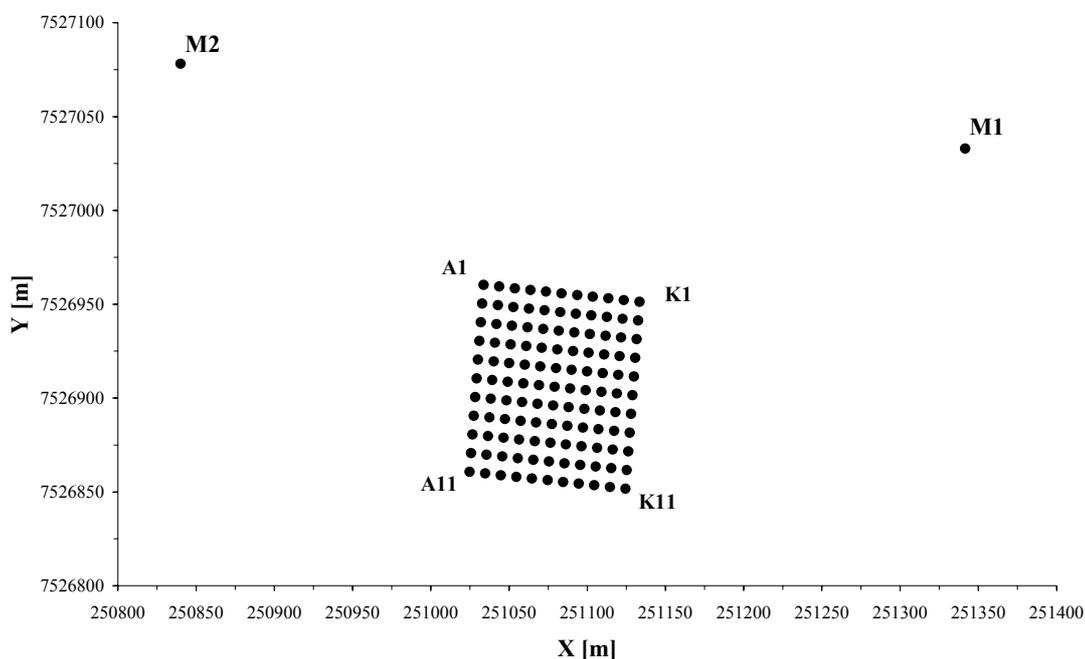


Figura 20 – Posição dos pontos experimentais em relação aos marcos geodésicos.

### 5.3 – Teor de água do solo

O teor de água do solo observado nos pontos amostrais em cada uma das camadas estudadas estão apresentados no Apêndice 2. Já os parâmetros estatísticos obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros estatísticos referentes ao teor de água do solo (%)

Parâmetros estatísticos	Camadas (mm)		
	0 a 200	200 a 400	400 a 600
Número de dados	36	36	36
Valor mínimo	12.900	16.200	18.000
Valor máximo	23.600	24.000	26.200
Média	19.100	20.400	20.700
Mediana	19.500	20.500	20.500
Desvio padrão	2.400	1.600	1.900
Coefficiente de variação	0.130	0.080	0.090
Assimetria	-0.490	-0.228	0.995
Curtose	0.167	0.691	1.003
Estatística Kolmogorov-Smirnov	0.127	0.118	0.129
Valor crítico de K-S, a 1%	0.265	0.265	0.265

O valor calculado da estatística Kolmogorov-Smirnov deve ser menor que o valor crítico tabelado, a um determinado nível de significância, para que possa ser aceita a hipótese que os dados experimentais provém de uma população com distribuição normal. A hipótese de normalidade dos dados deve ser rejeitada se o valor calculado da estatística Kolmogorov-Smirnov for maior que o valor crítico tabelado, a um determinado nível de significância.

Os resultados referentes ao teste de Kolmogorov-Smirnov indicaram uma normalidade dos dados para todas as camadas estudadas, ao nível de significância de 1%, portanto, não se rejeita a hipótese de normalidade na distribuição dos dados relativos ao teor de água do solo.

A hipótese de normalidade dos dados é ainda reforçada pelos valores próximos da média e da mediana obtidos em todas as camadas estudadas.

Os valores calculados de assimetria mostram que as distribuições relativas às camadas de 0 a 200mm e de 200mm a 400mm possuem curvas aceitas como normais, porém ligeiramente deslocadas à esquerda (mediana maior que a média) e a distribuição relativa à

camada de 400mm a 600mm possui sua curva aceita como normal, porém ligeiramente deslocada à direita (mediana menor que a média).

Todas as camadas estudadas apresentaram distribuição do teor de umidade do solo com curtose positiva, ou seja, apresentaram curvas com um pico de distribuição ligeiramente mais agudo do que o modelo de distribuição normal. A curtose foi tanto mais aguda quanto maior a profundidade da camada considerada.

Notou-se que o teor médio de água do solo foi ligeiramente maior quanto mais profunda a camada estudada. No entanto, o valor absoluto do teor de umidade médio do solo variou pouco entre as camadas (respectivamente; 19,1%, 20,4% e 20,7%).

Sob a ótica da análise de variância e do teste F, conclui-se que a um nível de 5 % de significância, as médias referentes ao teor de água, nas profundidades em mm: 0-200, 200-400 e 400-600 apresentaram diferenças significativas entre si, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise de variância referentes ao teor de água do solo

<b>FONTE DE VARIAÇÃO</b>	<b>gl</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fcalc.</b>	<b>Ftab.</b>
Tratamentos (prof. mm)	2	52,524	26,262	6,52	0,0021
Erro	105	422,853	4,027		
Total	107	475,377			

Comprovado pelo Teste F que existe diferenças significativas entre as médias, portanto rejeita-se a hipótese de igualdade entre as médias, partiu-se para o Teste de Tukey para verificar quais as profundidades diferem entre si no que diz respeito ao teor de água, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Teste de Tukey referentes ao teor de água do solo

<b>PROFUNDIDADES (mm)</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>TESTE DE TUKEY</b>
400 a 600	20,7	A
200 a 400	20,4	A
0 a 200	19,1	B

Por meio da análise do Teste de Tukey a um nível de 5% de significância, conclui-se que o teor de água nas profundidades 200 a 400 e 400 a 600mm , não apresentaram diferenças significativas entre si no que diz respeito as médias.

Por outro lado o mesmo não ocorre para a camada subsuperficial de 0 a 200mm, que a um nível de 5% de significância, apresentou diferenças significativas em relação às profundidades 200 a 400 e 400 a 600mm de profundidade.

Os desvios padrão obtidos são relativamente baixos em relação à média, ou seja, os coeficientes de variação obtidos são; 13%, 8% e 9%, respectivamente para as camadas de 0 a 200mm, 200mm a 400mm e 400mm a 600mm de profundidade.

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam o teor médio de água no solo, respectivamente para as camadas de 0 a 200mm, 200mm a 400mm e 400mm a 600mm de profundidade, em função dos 36 pontos amostrais.

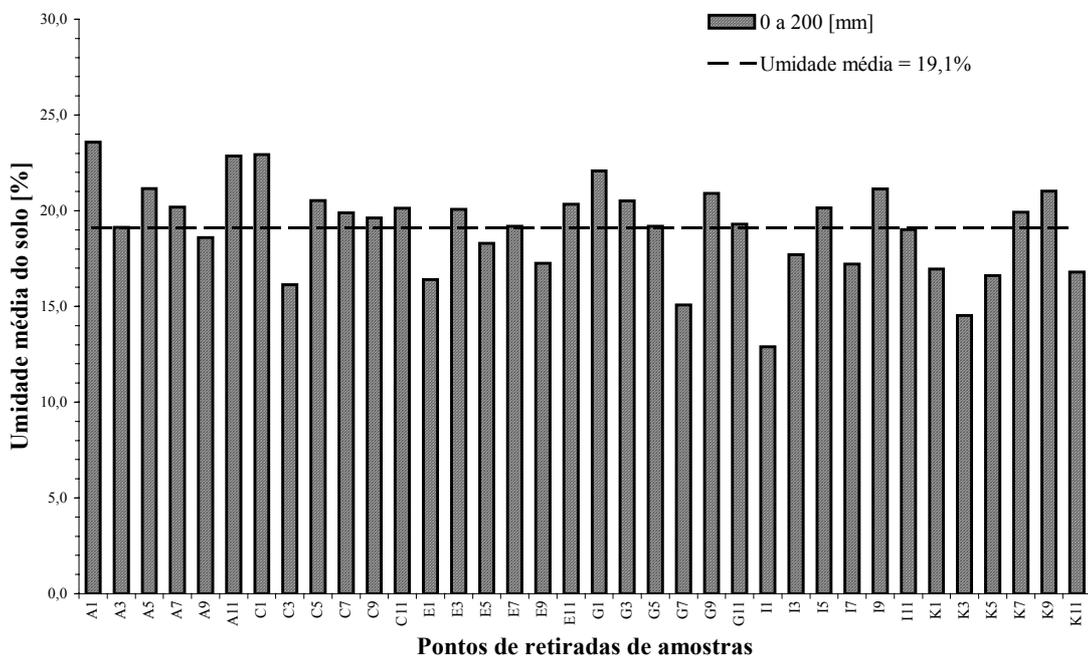


Figura 21- Teor médio de água do solo na camada de 0 a 200mm.

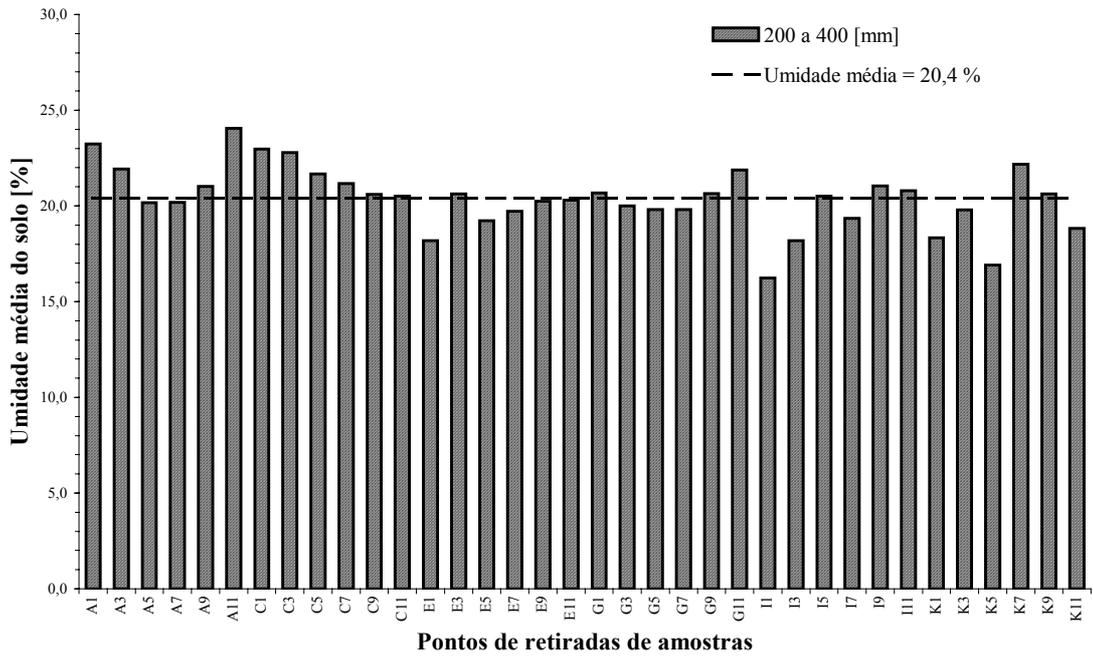


Figura 22 - Teor médio de água do solo na camada de 200mm a 400mm.

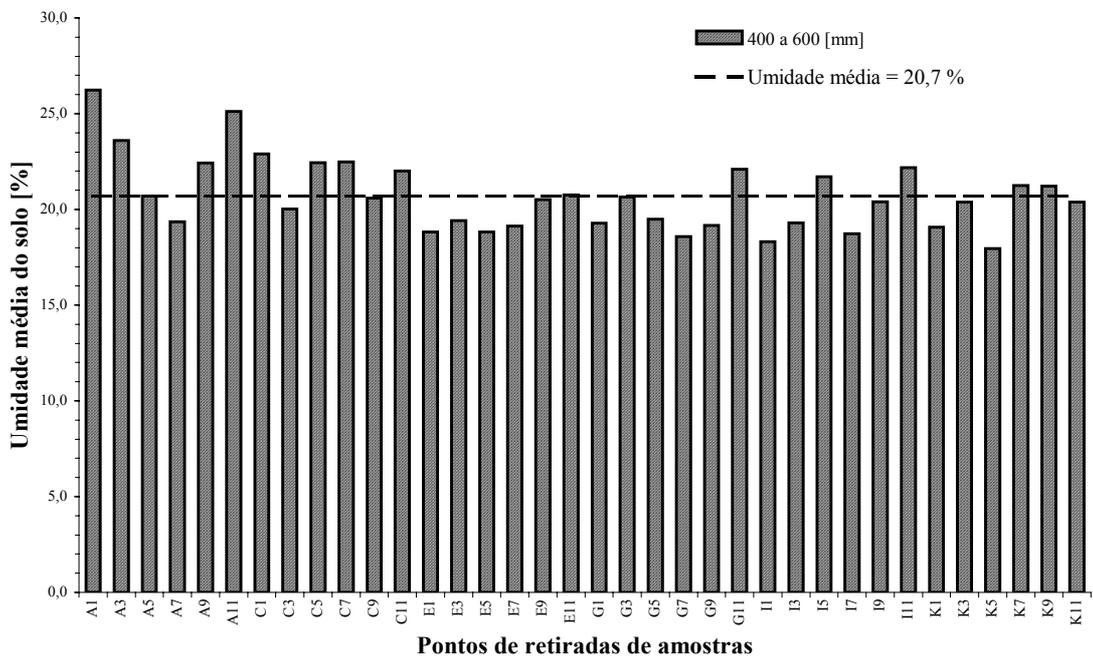


Figura 23 - Teor médio de água do solo na camada de 400mm a 600mm.

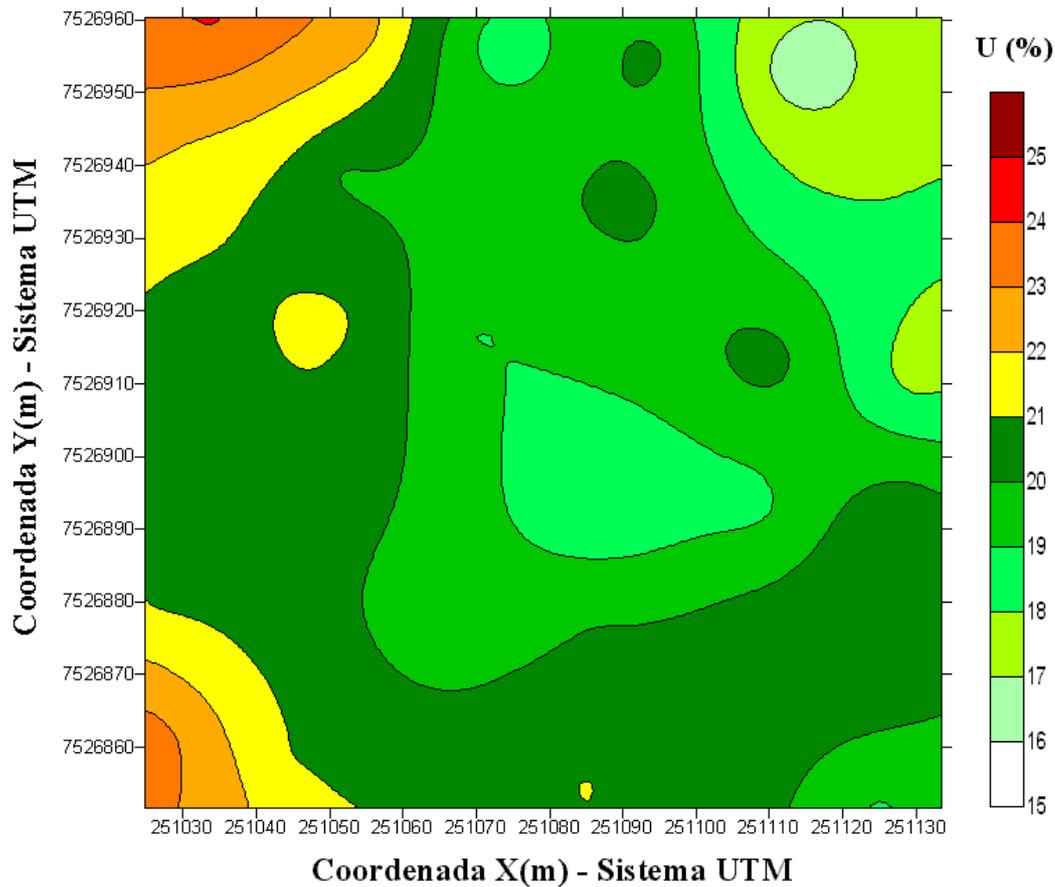


Figura 24 – Distribuição média do teor de água da camada de 0 a 600mm.

A Figura 24 mostra a distribuição média do teor de água de todo o perfil vertical (0 a 600mm), na área estudada. Nota-se que na maior parte da área o teor médio situou-se entre 18% a 21%.

#### 5.4 – Análise da resistência mecânica à penetração

A análise da resistência mecânica à penetração do solo, visando o diagnóstico da necessidade de se proceder a operação de subsolagem, foi realizada por meio de três métodos distintos. A primeira análise baseia-se em um método probabilístico, a segunda em um método determinístico e a terceira em um método geoestatístico.

##### 5.4.1 – Primeiro método - probabilístico

Este método de análise baseia-se na observação do comportamento da resistência mecânica à penetração em função da profundidade em cada um dos pontos amostrados, nos

parâmetros estatísticos calculados para cada um dos três perfis horizontais estudados e na inferência estatística quanto à probabilidade de se encontrar índices de resistência mecânica à penetração igual ou superior aquele considerado como crítico.

Os dados numéricos correspondentes estão apresentados nos Apêndices 3, 4 e 5 e os gráficos construídos estão apresentados um na Figura 25 e os demais em Apêndices 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21. Cada uma das figuras em Apêndice apresenta os dados correspondentes a uma coluna da malha amostral.

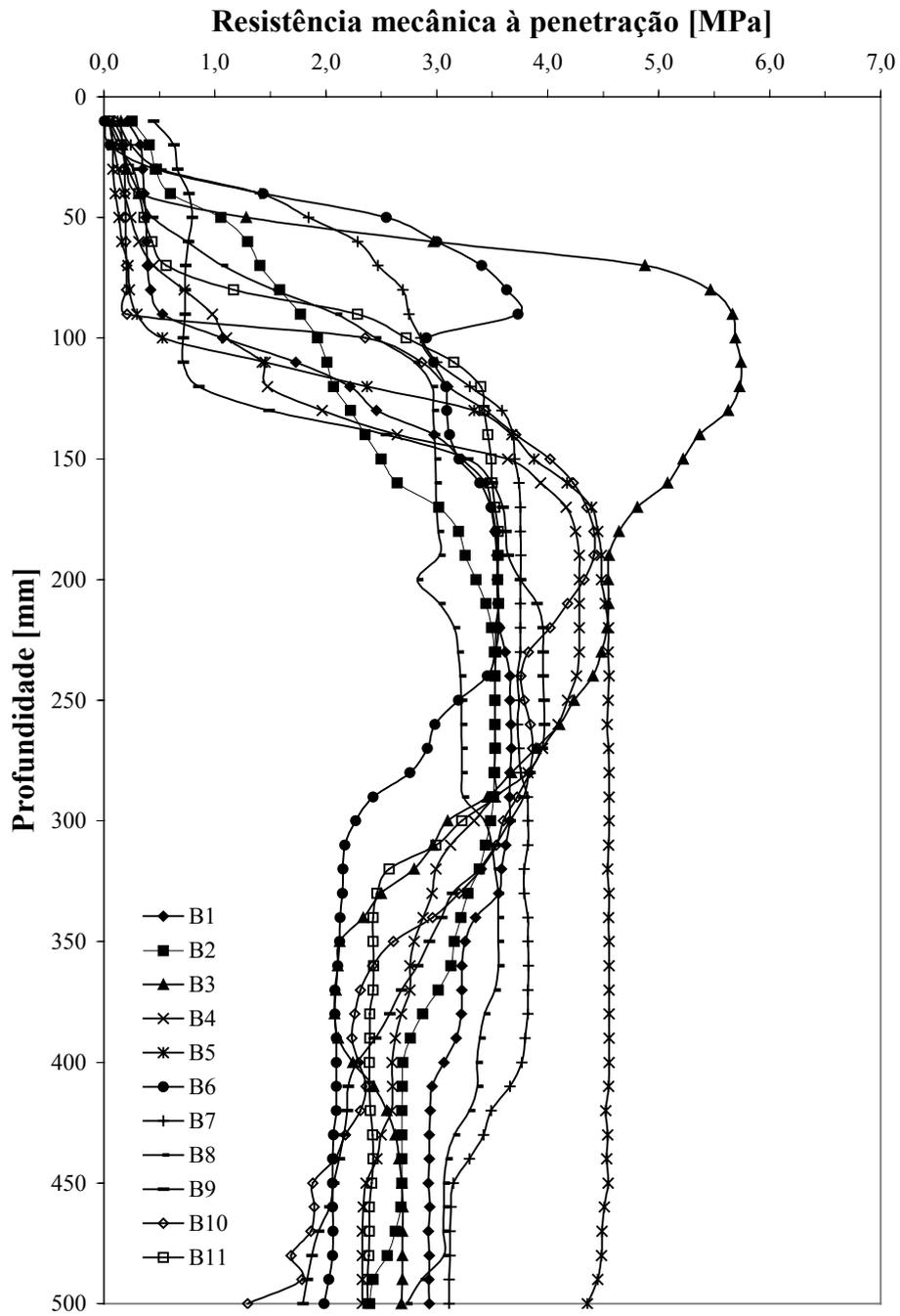


Figura 25 – Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “B”.

As curvas de resistência mecânica à penetração em função da profundidade mostram que houve um comportamento semelhante para a maioria dos pontos amostrais nas camadas em mm de 0 a 150, 150 a 300 e de 300 a 500.

Na maioria dos casos os maiores índices de resistência mecânica à penetração se apresentaram no perfil horizontal intermediário, ou seja, entre 150mm e 300mm de profundidade. Notou-se, ainda, um comportamento crescente da resistência mecânica à penetração em função da profundidade na camada mais superficial (0 a 150mm) e um comportamento tendendo a manter-se aproximadamente constante na camada mais profunda (300mm a 500mm).

Antes de se proceder à análise estatística dos dados, correspondentes as camadas horizontais do solo, testou-se a normalidade de sua distribuição.

A Tabela 4 mostra que em todos os perfis considerados o teste de Kolmogorov-Smirnov permitiu aceitar a hipótese de que os dados vieram de uma população com distribuição normal, a um nível de significância de 1%, e, portanto, as análises estatísticas, com respeito à medida da tendência central e sua variabilidade, podem ser realizadas.

Em todos os casos estudados a pequena diferença entre a média e a mediana reforça a normalidade dos dados.

Os valores calculados de assimetria mostram que as distribuições relativas às camadas de 0 a 150mm e de 300mm a 500mm possuem curvas aceitas como normais, porém ligeiramente deslocadas à direita (mediana menor que a média) e a distribuição relativa à camada de 150mm a 300mm possui sua curva aceita como normal, porém ligeiramente deslocada à esquerda (mediana maior que a média).

Todas as camadas estudadas apresentaram distribuição da resistência mecânica média à penetração com curtose positiva, ou seja, apresentaram curvas com um pico de distribuição ligeiramente mais agudo do que o modelo de distribuição normal. A curtose foi mais aguda na camada intermediária de solo, seguida pela mais profunda.

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos referentes à resistência mecânica média à penetração [MPa].

Parâmetros estatísticos	Camadas (mm)		
	0 a 150	150 a 300	300 a 500
Número de dados	121	121	121
Valor mínimo	0,001	0,483	1,392
Valor máximo	3,777	5,590	4,523
Média	1,466	3,499	2,811
Mediana	1,405	3,591	2,726
Desvio padrão	0,764	0,889	0,561
Coefficiente de variação	0,521	0,254	0,200
Assimetria	0,458	-0,982	0,492
Curtose	0,140	2,250	0,743
Estatística Kolmogorov-Smirnov	0,057	0,138	0,079
Valor crítico de K-S, a 1%	0,147	0,147	0,147

A diferença entre os valores de resistência mecânica média à penetração obtida entre as camadas estudadas mostra que cada perfil horizontal apresenta um comportamento distinto quanto a este parâmetro estatístico.

A resistência mecânica média à penetração do solo foi maior na camada intermediária estudada, seguida da camada mais profunda, confirmando o que se observou, de uma maneira geral, nos gráficos de resistência mecânica à penetração.

Os desvios padrão obtidos são altos em relação à média, ou seja, os coeficientes de variação obtidos são; 52,1%, 25,4% e 20,0%, respectivamente para as camadas de 0 a 150mm, 150mm a 300mm e 300mm a 500mm de profundidade. Este fato e a observação dos valores máximos e mínimos medidos, em todos os casos, permitem concluir que o solo apresentou grande variabilidade na resistência mecânica média à penetração em cada uma das camadas estudadas.

Nota-se que esta variabilidade diminui à medida que a profundidade aumenta, conforme confirma a observação das curvas de resistência mecânica à penetração em função da profundidade, apresentadas na Figura 25 e nos Apêndices 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21.

A Figura 26 mostra a probabilidade de se encontrar valores de resistência mecânica à penetração (RP) igual ou superior aquela considerada crítica (RPc) nos perfis horizontais de solo estudados. Os dados referentes à Figura 26 estão apresentados no Apêndice 7.

O estabelecimento dos níveis críticos de resistência mecânica à penetração deve ser feito em função de variáveis tais como: tipo do solo, cultura, custos de operação, dentre outras.

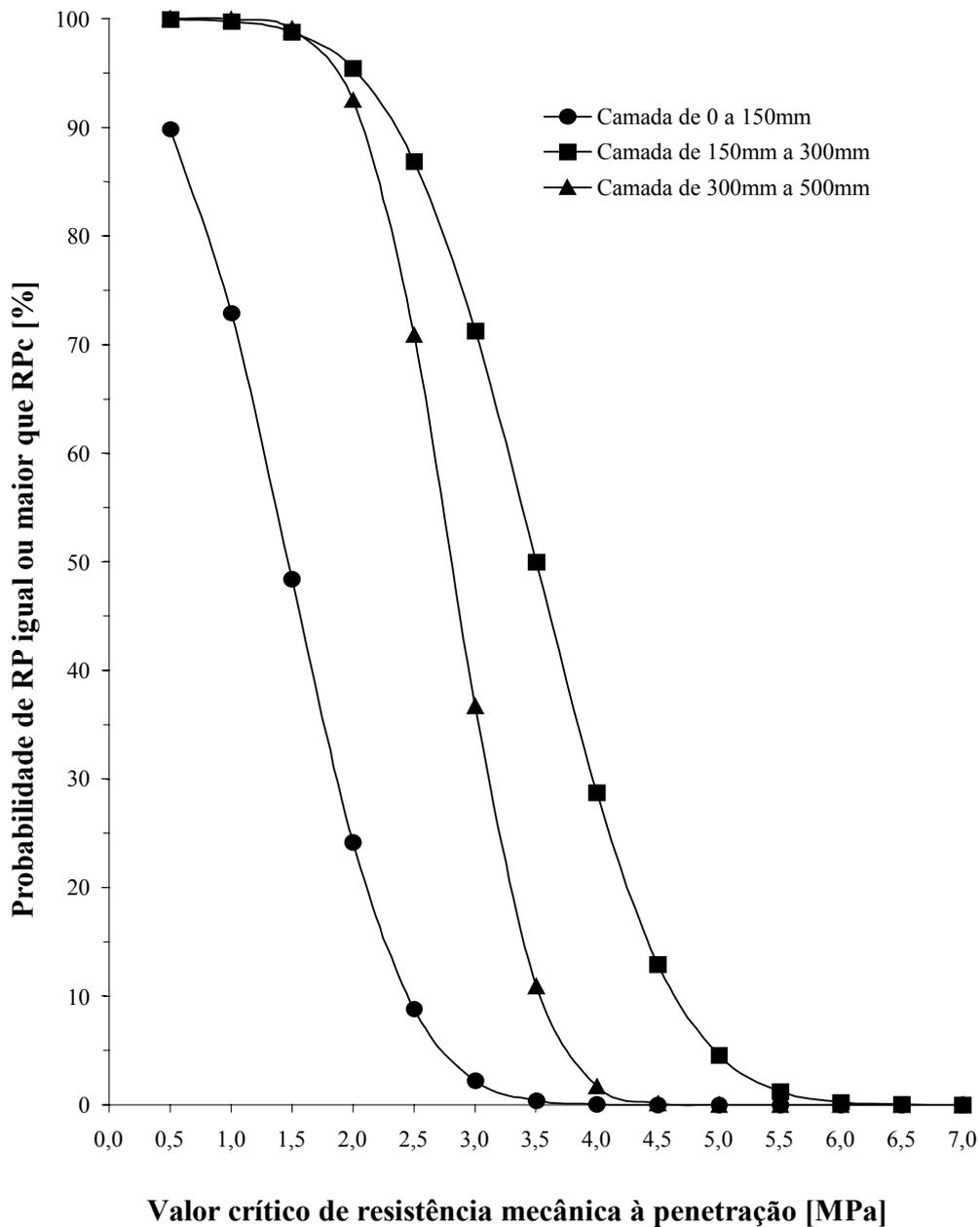


Figura 26 – Probabilidade de se encontrar valores de resistência mecânica à penetração (RP) igual ou superior aquela considerada crítica (RPc) nos perfis horizontais de solo estudados.

Observa-se que as curvas de probabilidades apresentadas na Figura 26 são do tipo “S”, conforme esperado já que os dados possuem uma distribuição normal.

As curvas de probabilidade ratificam o comportamento anteriormente obtido da resistência mecânica à penetração para as três camadas estudadas.

Nota-se que para a camada intermediária a curva de probabilidade de se encontrar valores de resistência mecânica à penetração igual ou superior à considerada crítica, posiciona-se mais à direita do que as outras, pois possui média de resistência mecânica à penetração superior às demais. O mesmo ocorre com a curva de probabilidade da camada mais profunda em relação a mais superficial.

A elevada inclinação do trecho central das curvas de probabilidade mostra que a uma diminuição na resistência mecânica à penetração considerada crítica corresponde um grande aumento na probabilidade de ocorrência de RP igual ou superior a  $RP_c$ .

No caso da camada intermediária, diminuindo-se a  $RP_c$  de 4,5MPa para 2,5MPa há um aumento na probabilidade de ocorrência de RP igual ou superior a  $RP_c$  correspondendo a 74 pontos percentuais (respectivamente de 12,9% a 86,9%).

O estabelecimento do valor crítico da resistência mecânica à penetração e a análise da curva de RP igual ou superior a  $RP_c$  fornecem subsídios para o diagnóstico da necessidade, ou não, de se proceder a operação de subsolagem.

A Figura 27 mostra as curvas de volume de solo a ser mobilizado, em função dos valores críticos de resistência mecânica à penetração, nos perfis horizontais de solo estudados, obtidas pelo método probabilístico. Os dados referentes à Figura 27 estão apresentados no Apêndice 9.

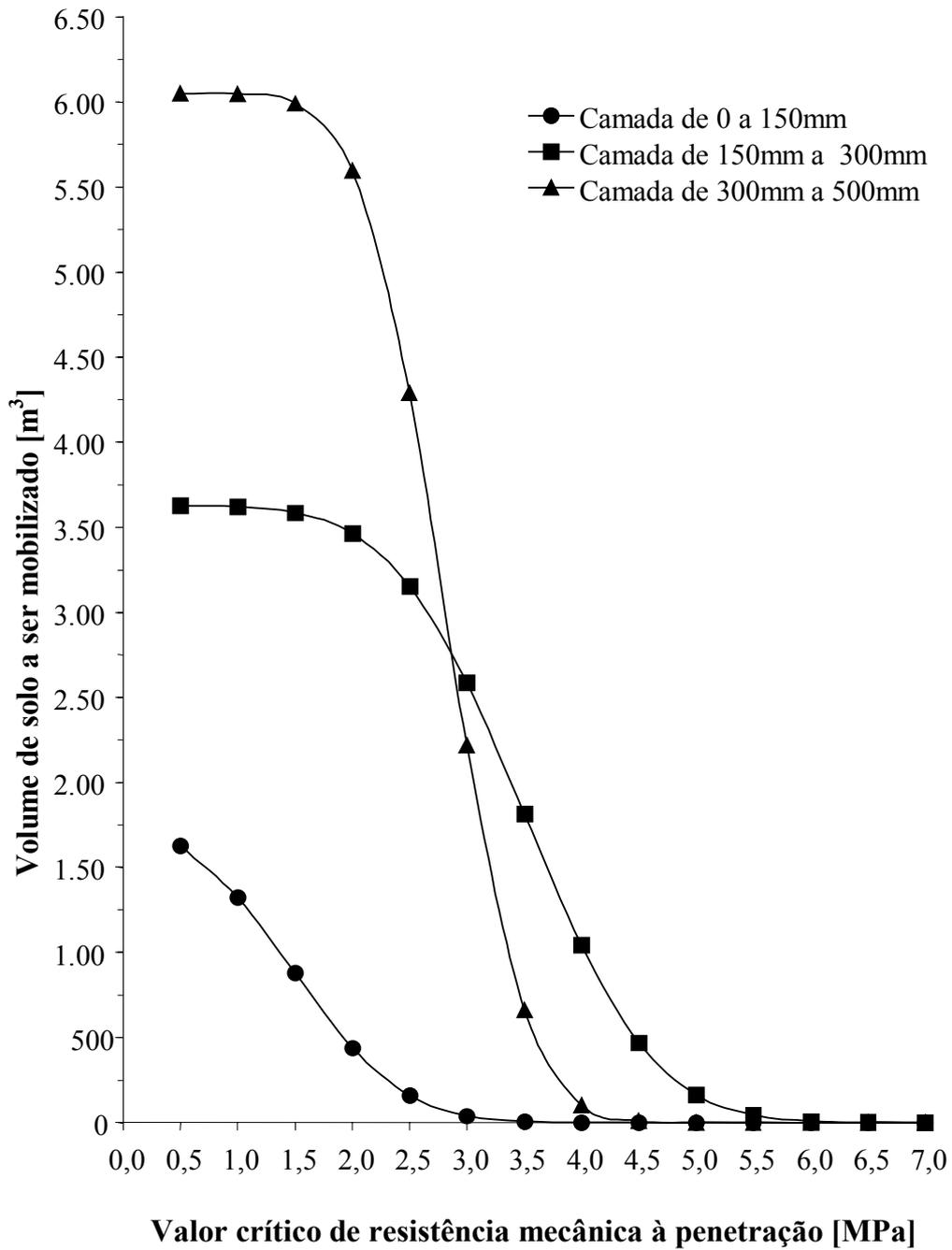


Figura 27 - Volume de solo a ser mobilizado em função da resistência mecânica à penetração considerada crítica (RPC) nos perfis horizontais de solo estudados – método probabilístico.

### 5.4.2 – Segundo método - determinístico

A Figura 28 mostra a porcentagem encontrada de pontos com valores de resistência mecânica à penetração (RP) igual ou superior à considerada crítica (RPc) nos perfis horizontais de solo estudados. Os dados referentes à Figura 28 estão apresentados no Apêndice 8.

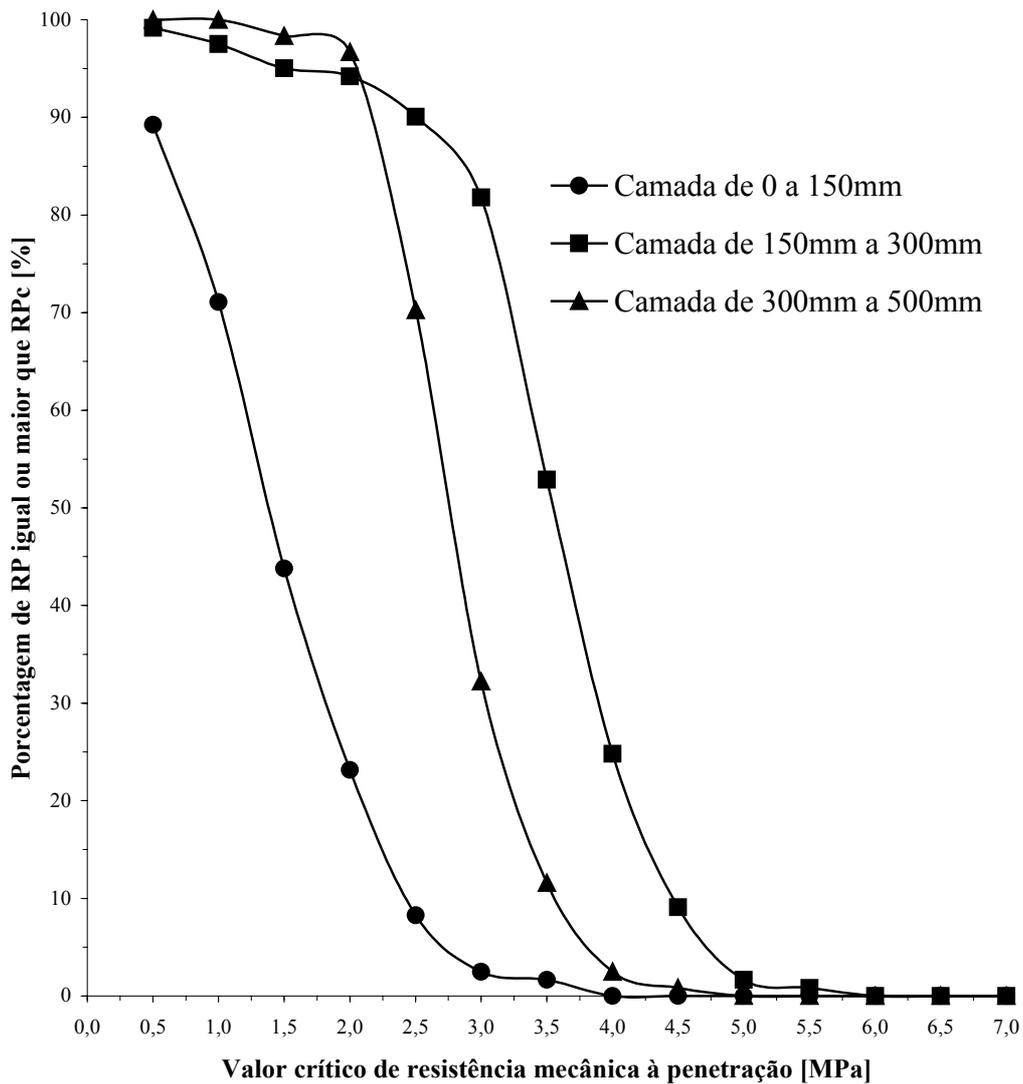


Figura 28 – Porcentagem de pontos encontrados com valores de resistência mecânica à penetração (RP) igual ou superior à considerada crítica (RPc) nos perfis horizontais de solo estudados.

As curvas de porcentagem de ocorrência de RP igual ou superior a  $RP_c$  são semelhantes às curvas de probabilidade obtidas por meio da primeira metodologia de análise apresentada. Embora a inclinação do trecho central de todas as curvas de porcentagem apresentem inclinação maior do que as curvas de probabilidade, a curva correspondente à camada intermediária mostrou-se mais sensível à variação de  $RP_c$ . Como pode ser observado na Figura 28 e no Apêndice 8, diminuindo-se a  $RP_c$  de 4,5MPa para 2,5MPa há um aumento na porcentagem de ocorrência de RP igual ou superior a  $RP_c$  correspondendo a 81 pontos percentuais (respectivamente de 9,1% a 90.1%).

Os pontos que apresentaram RP igual ou superior a  $RP_c$ , para os níveis de  $RP_c$  iguais a 2,5MPa e a 4,5MPa, sua localização na área estudada, bem como a localização dos pontos experimentais estão mostrados nas Figuras 29, 30, 31, 32, 33 e 34, respectivamente para as camadas de 0 a 150mm, de 150mm a 300mm e de 300mm a 500mm.

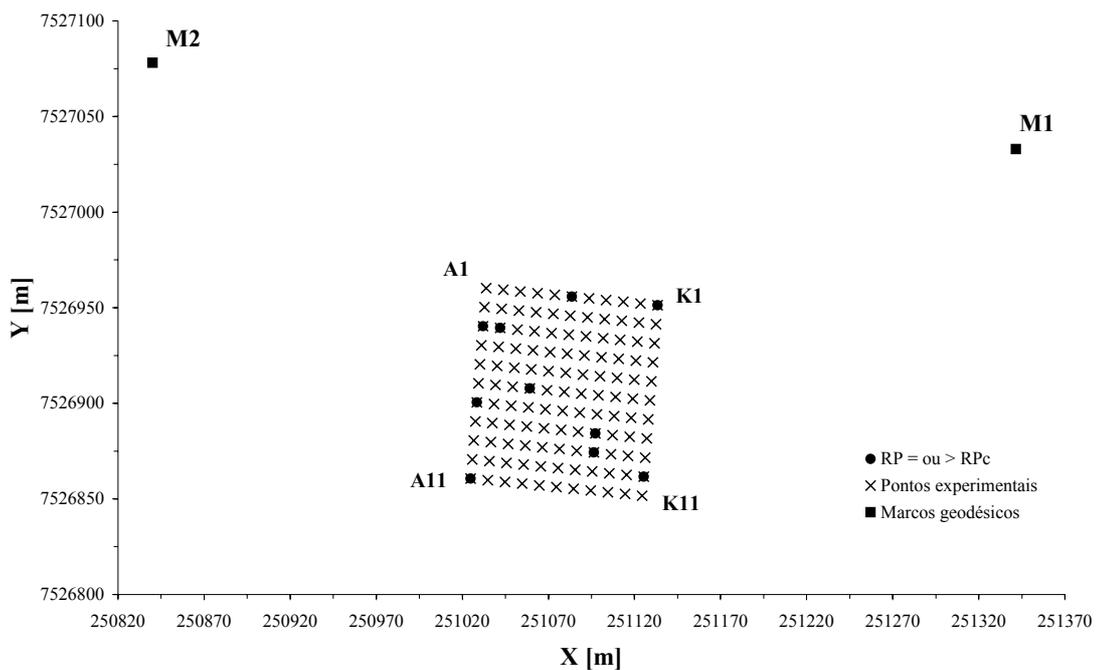


Figura 29 – Distribuição espacial dos pontos de  $RP_c$  igual ou superior à 2,5MPa na camada de solo de 0 a 150mm. Sistema de coordenadas plano-retangulares (UTM-WGS84).

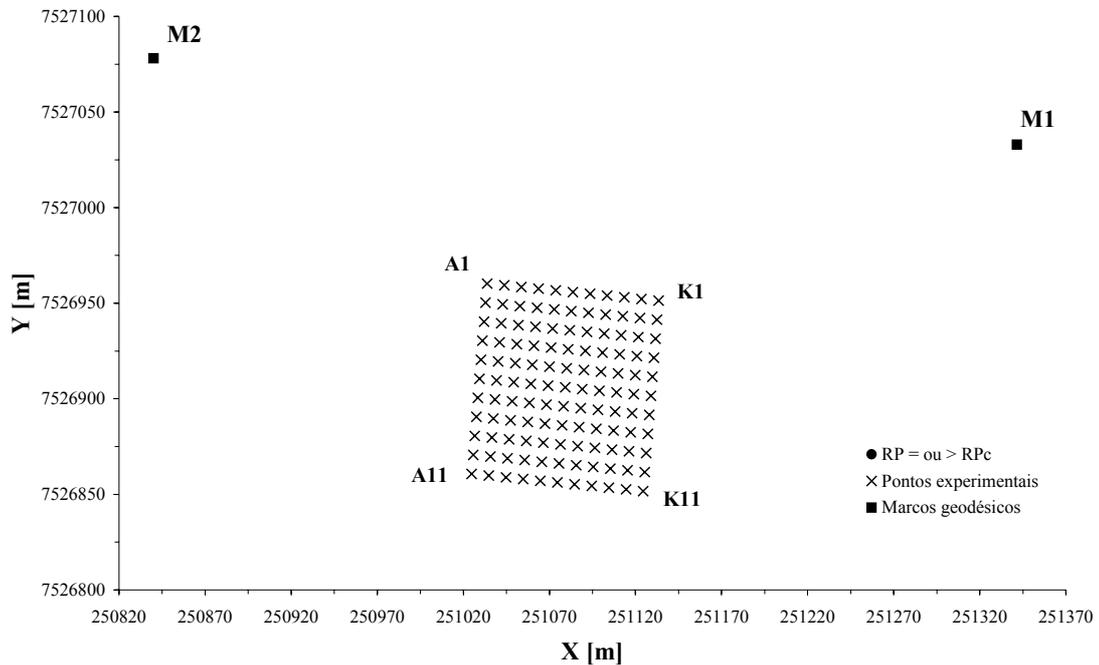


Figura 30 - Distribuição espacial dos pontos de  $R_{Pc}$  igual ou superior à 4,5MPa na camada de solo de 0 a 150mm. Sistema de coordenadas plano-retangulares (UTM-WGS84).

Pode-se verificar que a camada mais superficial possui níveis inferiores de resistência mecânica à penetração em relação às demais (Figura 29). A Figura 29 mostra que foram poucos os pontos encontrados com  $R_{Pc}$  igual ou superior a 2,5MPa (9 pontos) e que estão dispersos na área estudada. Esta mesma camada de solo não apresentou nenhum ponto com  $R_{Pc}$  igual ou superior a 4,5MPa (Figura 30).

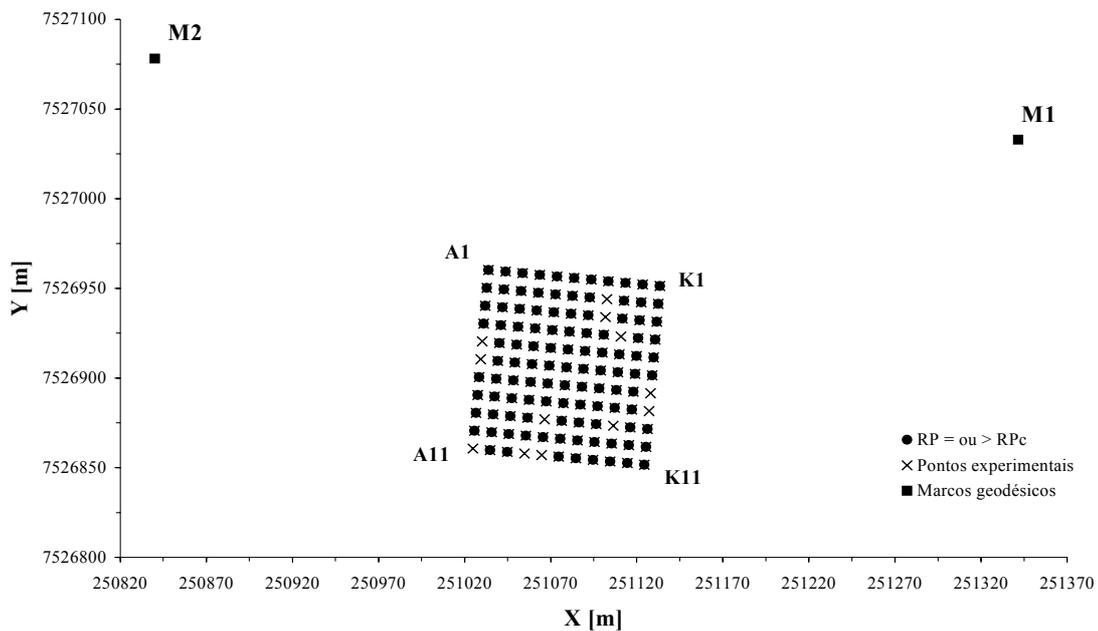


Figura 31 - Distribuição espacial dos pontos de RPc igual ou superior à 2,5MPa na camada de solo de 150mm a 300mm. Sistema de coordenadas plano-retangulares (UTM-WGS84).

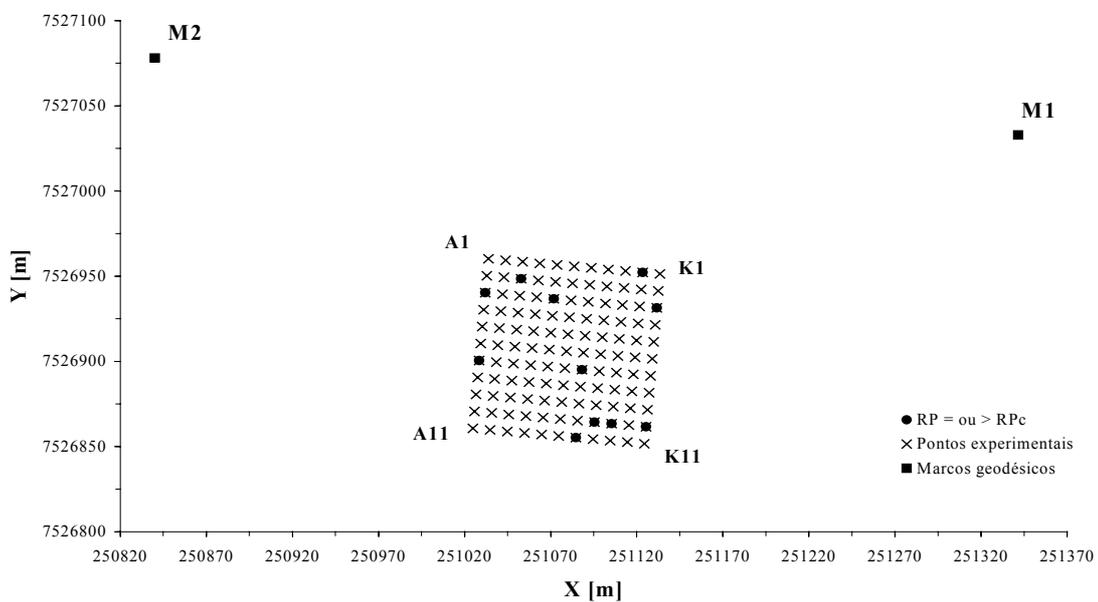


Figura 32 - Distribuição espacial dos pontos de RPc igual ou superior à 4,5MPa na camada de solo de 150mm a 300mm. Sistema de coordenadas plano-retangulares (UTM-WGS84).

Pode-se verificar que a camada intermediária possui níveis superiores de resistência mecânica à penetração em relação às demais (Figura 31). A Figura 31 mostra que foram muitos os pontos encontrados com  $RP_c$  igual ou superior a 2,5MPa (109 pontos) e que estão presentes em quase toda a área estudada. Já com  $RP_c$  igual ou superior a 4,5MPa foram poucos os pontos encontrados (11 pontos) e estão dispersos na área estudada (Figura 32).

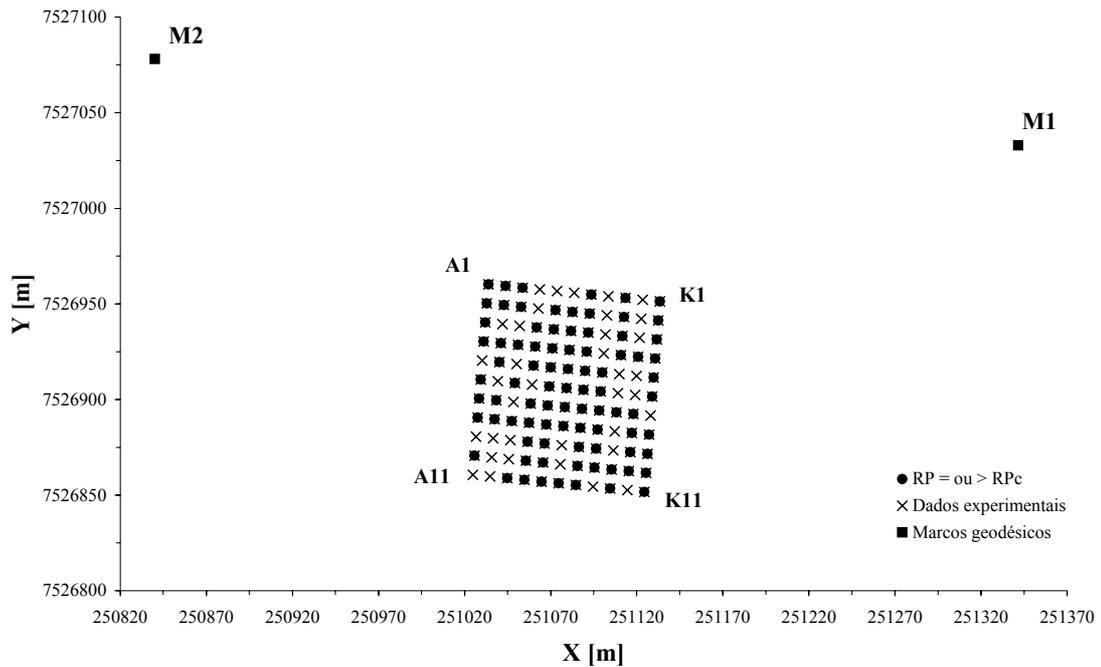


Figura 33 - Distribuição espacial dos pontos de  $RP_c$  igual ou superior à 2,5MPa na camada de solo de 300mm a 500mm. Sistema de coordenadas plano-retangulares (UTM-WGS84).

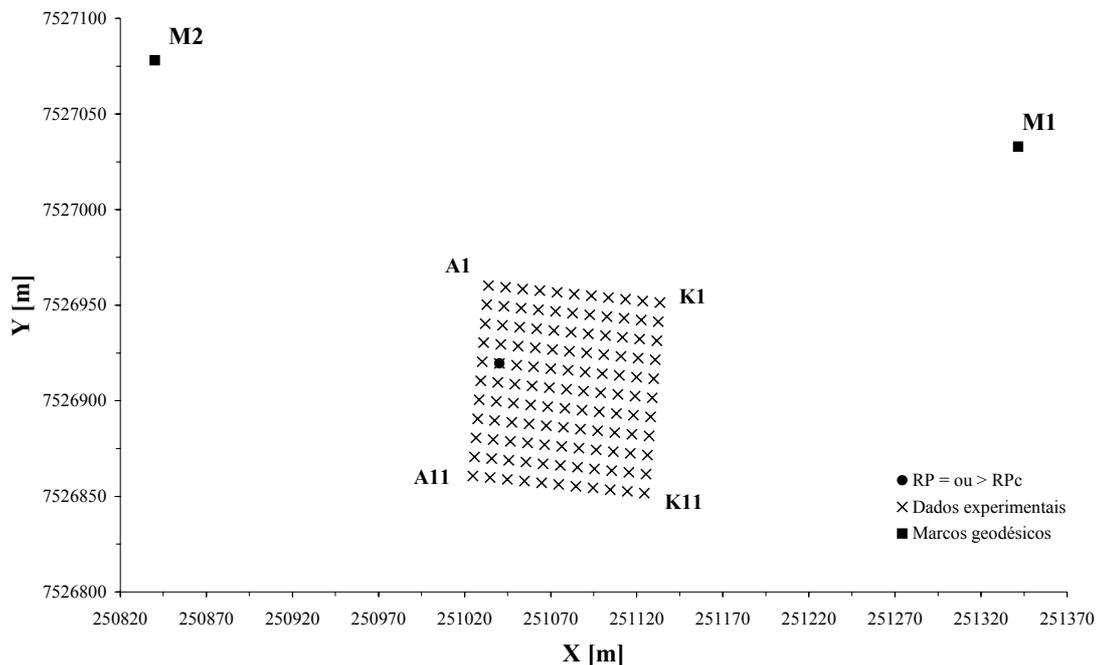


Figura 34 - Distribuição espacial dos pontos de  $RP_c$  igual ou superior à 4,5MPa na camada de solo de 300mm a 500mm. Sistema de coordenadas plano-retangulares (UTM-WGS84).

A camada mais profunda possui níveis intermediários de resistência mecânica à penetração em relação às demais (Figura 33). A Figura 33 mostra que foram muitos os pontos encontrados com  $RP_c$  igual ou superior a 2,5MPa (85 pontos) e que estão adensados em regiões por toda a área estudada. Já com  $RP_c$  igual ou superior a 4,5MPa verificou-se um único ponto na área estudada (Figura 34).

Do mesmo modo que na primeira metodologia apresentada, o estabelecimento do valor crítico da resistência mecânica à penetração e a análise da curva de porcentagem de ocorrência de  $RP$  igual ou superior a  $RP_c$  fornecem subsídios para o diagnóstico da necessidade, ou não, de se proceder a operação de subsolagem.

Caso haja necessidade de realização da operação de subsolagem, a análise da distribuição espacial dos pontos com  $RP$  igual ou superior a  $RP_c$  permite o diagnóstico da necessidade de se proceder a operação em toda a área ou apenas nas regiões onde ocorre  $RP$  igual ou superior a  $RP_c$ .

A Figura 35 mostra as curvas de volume de solo a ser mobilizado, em função do valor crítico de resistência mecânica à penetração, nos perfis horizontais de solo estudados, obtidas pelo método determinístico. Os dados referentes à Figura 35 estão apresentados no Apêndice 10.

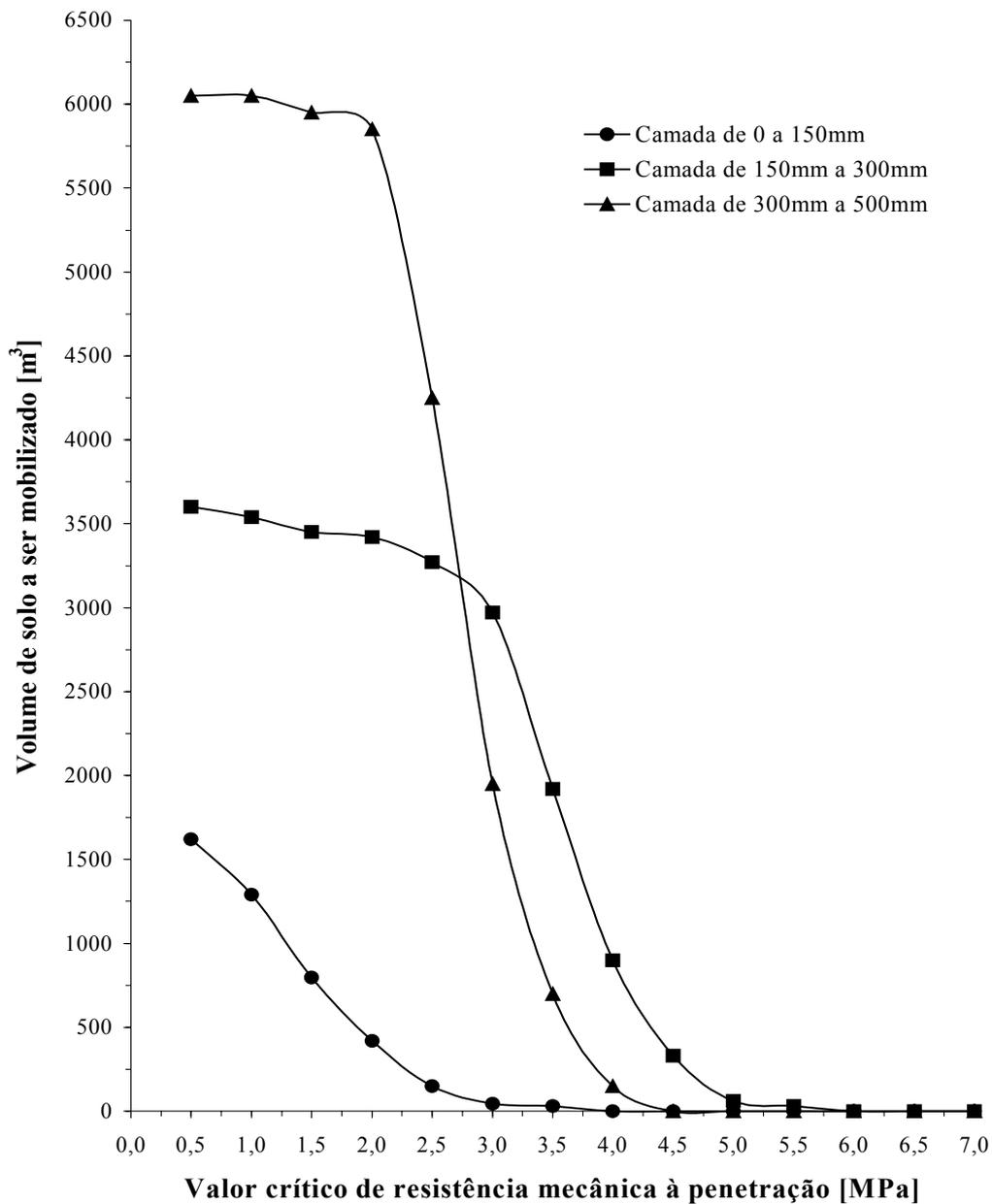


Figura 35 - Volume de solo a ser mobilizado em função da resistência mecânica à penetração considerada crítica (RPC) nos perfis horizontais de solo estudados – método determinístico.

A Figura 35 apresenta as curvas de volume de solo a ser mobilizado para se eliminar a RP, nos níveis igual e acima do considerado crítico, em função da RPc, para as três camadas estudadas.

Nota-se que, na camada mais profunda, o volume de solo a ser mobilizado para eliminar os níveis de RPc igual ou superiores a 4,0MPa pouco, ou quase nada, se altera em função do RPc estabelecido. O mesmo ocorre para níveis igual ou inferiores a 2,0MPa. No entanto, para níveis de RPc entre 2,0MPa e 4,0MPa, o volume de solo a ser mobilizado aumenta consideravelmente (a uma taxa de 1420m<sup>3</sup>/MPa) com a diminuição da RPc.

Análises semelhantes podem ser conduzidas quando o interesse foca-se nas demais camadas estudadas.

As curvas da Figura 35 auxiliam na tomada de decisão à medida que a variável volume de solo a ser mobilizado relaciona-se diretamente aos custos da operação.

### 5.4.3 – Terceiro método – geoestatístico

A Figura 36 apresenta o semivariograma obtido para a camada de 0 a 150mm de profundidade.

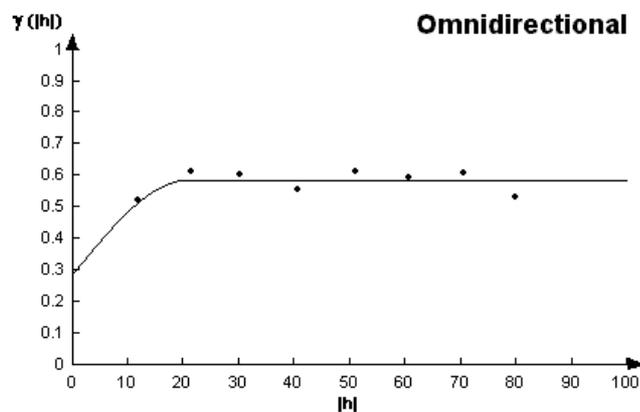


Figura 36 - Semivariograma da camada de 0 a 150mm.

O melhor modelo matemático obtido, dentre os disponíveis no software variowin, foi o apresentado na Equação 16.

$$\gamma(h) = 0,288 + 0,3 sph\ 20,8(h) \quad (16)$$

Observando-se o semivariograma, nota-se que o modelo escolhido para o ajuste foi o esférico, com efeito pepita de 0,288, patamar de 0,588 e alcance de 20,8 metros.

O semivariograma estabilizou-se em 20,8 metros, portanto, observamos que pontos de resistência mecânica à penetração que se encontram a uma distância superior a 20,8 metros, uns dos outros, são considerados não-correlacionados entre si.

Analisando o comportamento do semivariograma da Figura 36 supõe que se pode proceder a amostragem no campo em 20,8 metros entre um ponto e outro para a camada superficial de 0 a 150mm, minimizando assim o número de amostragem entre pontos de resistência mecânica à penetração na área.

A Figura 37 mostra a variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração correspondente a camada de 0 a 150mm de profundidade.

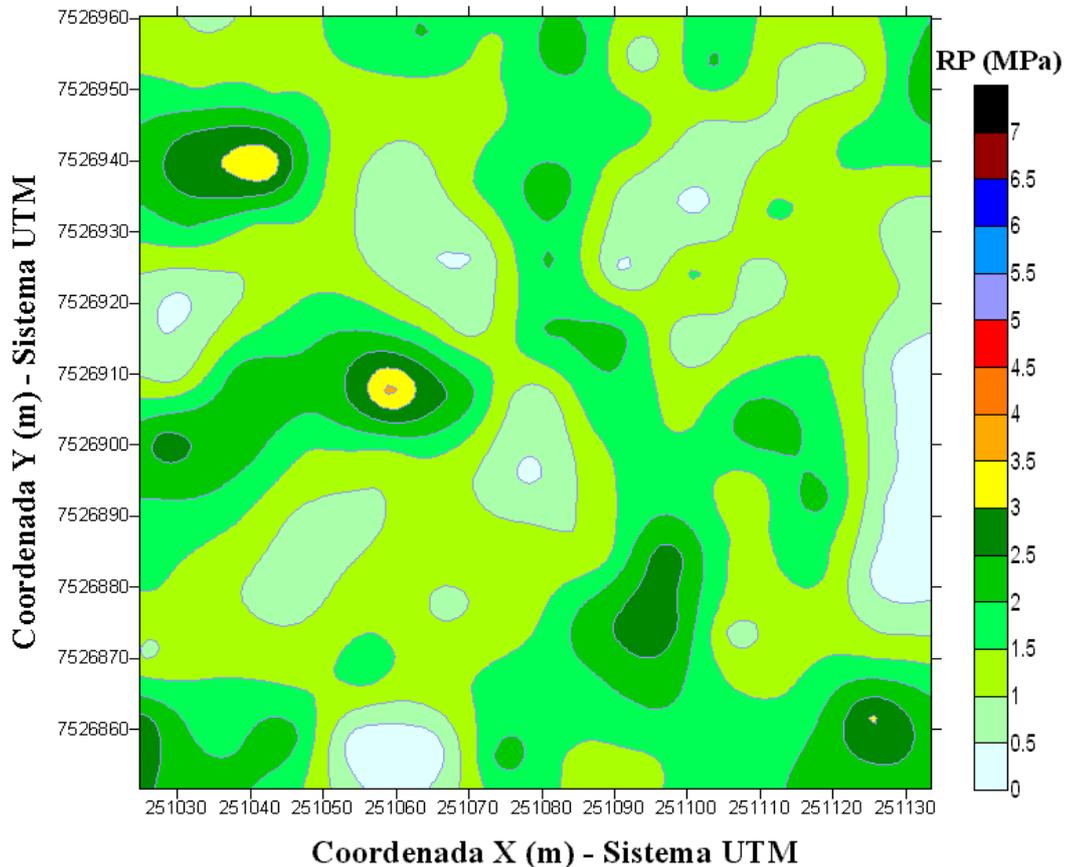


Figura 37 – Variabilidade espacial do nível de resistência mecânica à penetração para a camada de 0 a 150mm.

A Figura 37 vem comprovar visualmente através do mapa de isoresistência mecânica à penetração os outros dois métodos estudados anteriormente, ou seja, onde está distribuída a maior ou menor incidência de resistência mecânica à penetração na área de 110 x 110m.

Pelo mapa da Figura 37 verifica-se baixos índices de resistência mecânica à penetração na camada superficial, apresentando somente duas áreas de influência acima de 3MPa, representado pela coloração amarela, isso em decorrência pela passagem da grade para eliminação da soqueira anterior antes da amostragem, o que realmente foi comprovado pelos gráficos de RP em função da profundidade

Outra comprovação a partir do mapa da Figura 37, é que para essa camada pode se dispensar a utilização de um implemento mais pesado, como é o caso do subsolador, servindo de base para um sistema de suporte à decisão, visando gerenciamento localizado.

A Figura 38 apresenta o semivariograma obtido para a camada de 150mm a 300mm de profundidade.

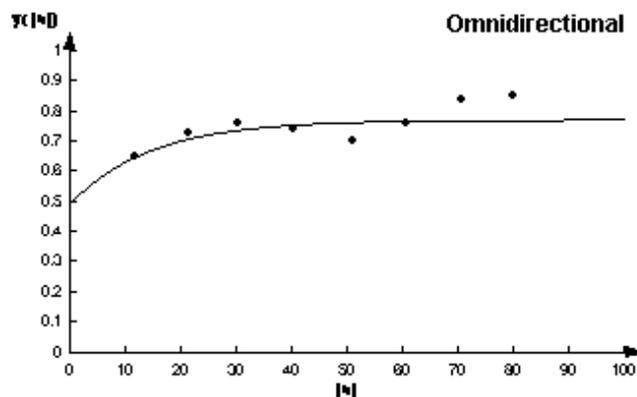


Figura 38 - Semivariograma da camada de 150mm a 300mm.

O melhor modelo matemático obtido, dentre os disponíveis no software variowin, foi o apresentado na Equação 17.

$$\gamma(h)=0,496+0,28 \exp -43,2(h) \quad (17)$$

Observando-se o semivariograma, nota-se que o modelo escolhido para o ajuste foi o exponencial, com efeito pepita de 0,496, patamar de 0,766 e alcance de 43,2 metros.

O semivariograma estabilizou-se em 43,2 metros, portanto, observamos que pontos de resistência mecânica à penetração que se encontram a uma distância superior a 43,2 metros, uns dos outros, são considerados não-correlacionados entre si.

Analisando o comportamento do semivariograma da Figura 38 supõe que se pode proceder a amostragem no campo em 43,2 metros entre um ponto e outro para a camada intermediária de 150 a 300mm, minimizando assim o número de amostragem entre pontos de resistência mecânica à penetração na área.

A Figura 39 mostra a variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração correspondente a camada de 150mm a 300mm de profundidade.

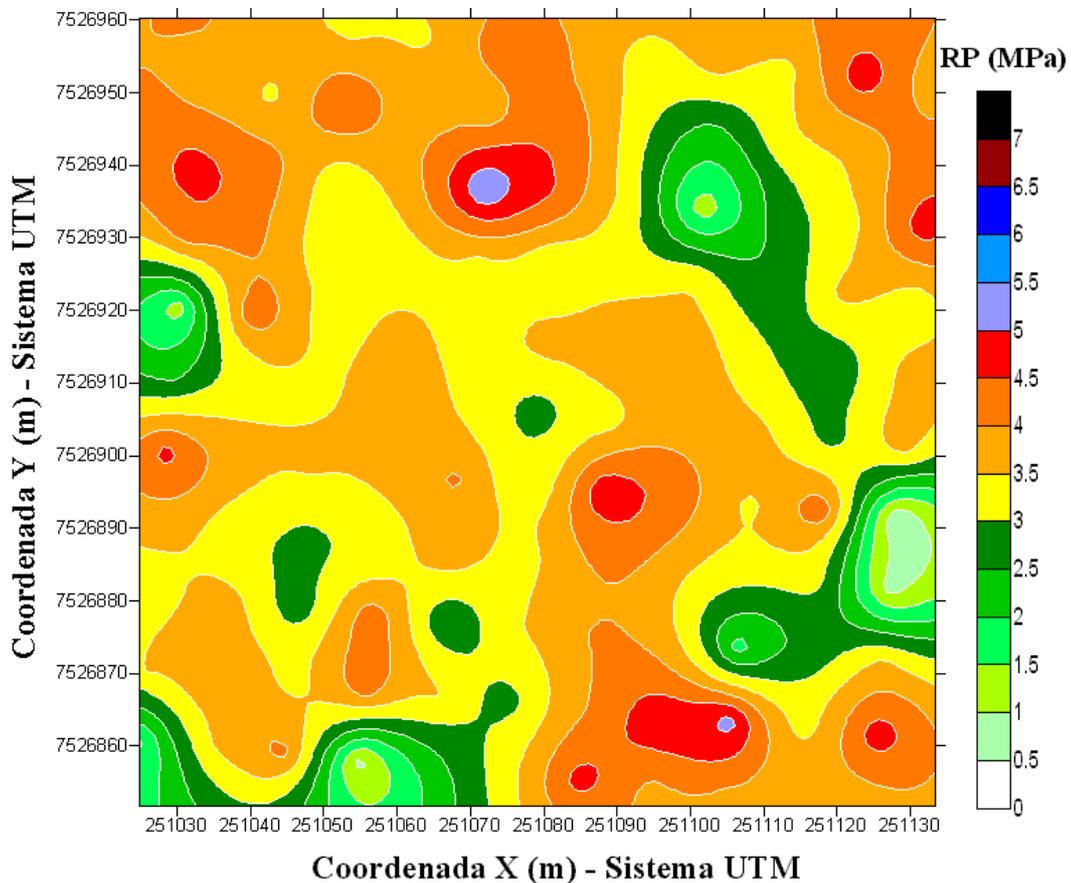


Figura 39 – Variabilidade espacial do nível de resistência mecânica à penetração para a camada de 150 a 300mm.

A Figura 39 vem comprovar visualmente através do mapa de isoresistência mecânica à penetração os outros dois métodos estudados anteriormente, ou seja, onde está distribuída a maior ou menor incidência de resistência mecânica à penetração na área de 110 x 110m.

Pelo mapa da Figura 39 verifica-se altos índices de resistência mecânica à penetração na camada intermediária, apresentando um número considerado de áreas de influência acima de 3MPa, o que realmente foi comprovado pelos gráficos de RP em função da profundidade.

Outra comprovação a partir do mapa da Figura 39, é que para essa camada não se pode dispensar a utilização de um implemento mais pesado, como é o caso do subsolador, pois pela observação do mapa essa camada deveria sofrer a ação de um implemento quase na sua totalidade em área de 110 x 110m, para eliminação dos altos índices de resistência mecânica à penetração.

A Figura 40 apresenta o semivariograma obtido para a camada de 300mm a 500mm de profundidade. Nota-se um efeito pepita puro com  $\gamma(h)=0,312$ .

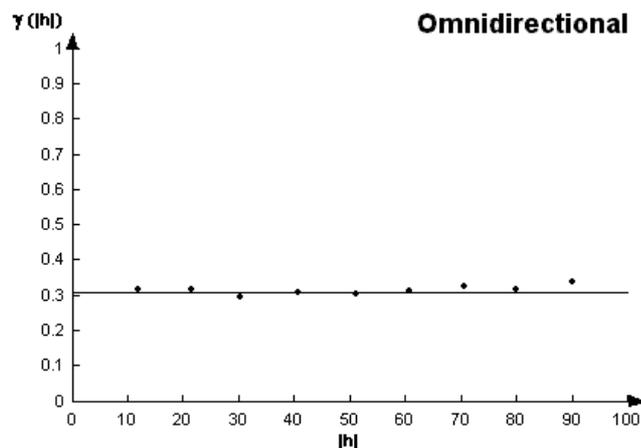


Figura 40 – Semivariograma da camada de 300 a 500mm.

O semivariograma não apresenta nada ou quase nada de continuidade espacial, ou seja o efeito pepita puro. O que reflete pela visualização do semivariograma da Figura 40 é uma variabilidade inexplicada.

Analisando o comportamento do semivariograma da Figura 40, supõe que a distância de amostragem de 10 em 10 metros entre um ponto e outro, não representa a melhor distância de amostragem para a camada mais profunda de 300 a 500mm, sendo necessário estudar outra malha ou distância de amostragem.

A Figura 41 mostra a variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração correspondente a camada de 300mm a 500mm de profundidade.

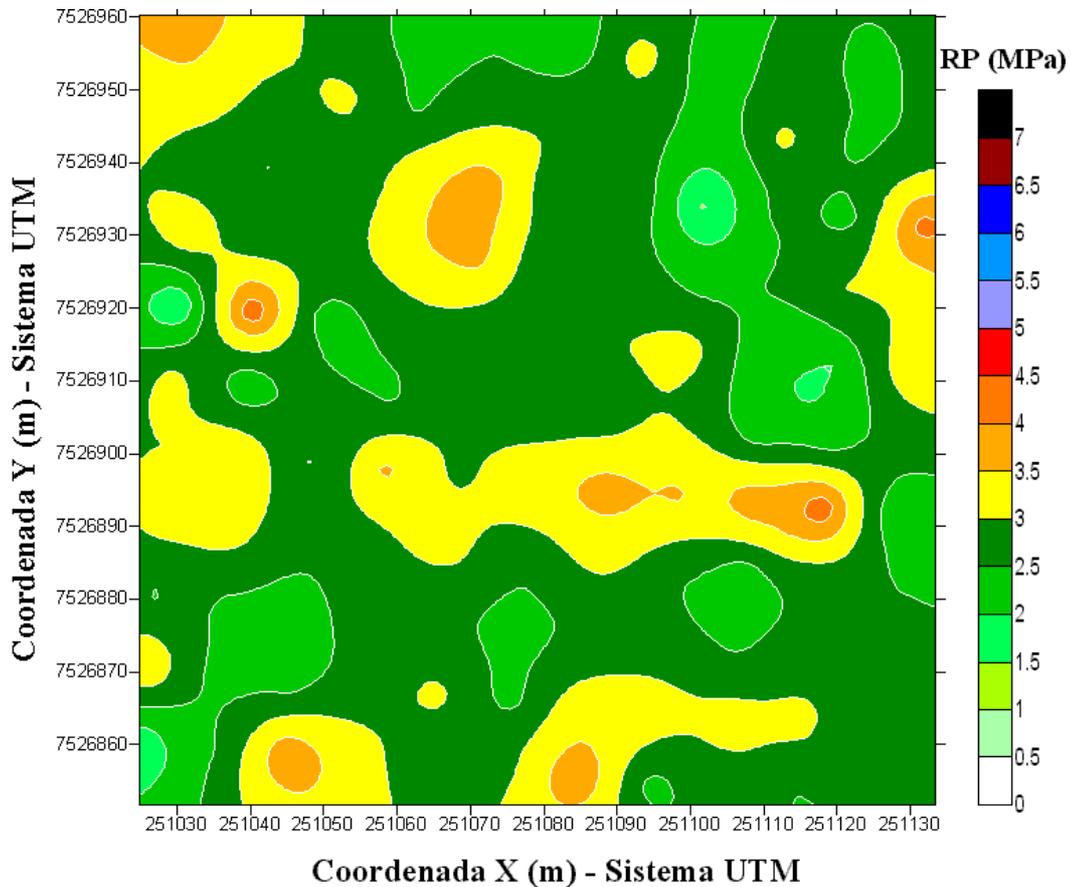


Figura 41 - Variabilidade espacial do nível de resistência mecânica à penetração para a camada de 300 a 500mm.

A Figura 41 vem comprovar visualmente através do mapa de isoresistência mecânica à penetração os outros dois métodos estudados anteriormente, ou seja, onde está distribuída a maior ou menor incidência de resistência mecânica à penetração na área de 110 x 110m.

Pelo mapa da Figura 41 verifica-se uma considerável incidência de resistência mecânica à penetração na camada mais profunda, apresentando algumas áreas de influência, acima de 3MPa, o que realmente foi comprovado pelos gráficos de RP em função da profundidade.

Outra comprovação a partir do mapa da Figura 41, é que para essa camada pode se otimizar a utilização de um implemento mais pesado, como é o caso do subsolador, pois se verifica que há necessidade de um gerenciamento localizado para essa camada.

A Figura 42 mostra as curvas de volume de solo a ser mobilizado, em função dos valores críticos de resistência mecânica à penetração, nos perfis horizontais de solo estudados, obtidas pelo método geoestatístico. Os dados referentes à Figura 42 estão apresentados no Apêndice 11.

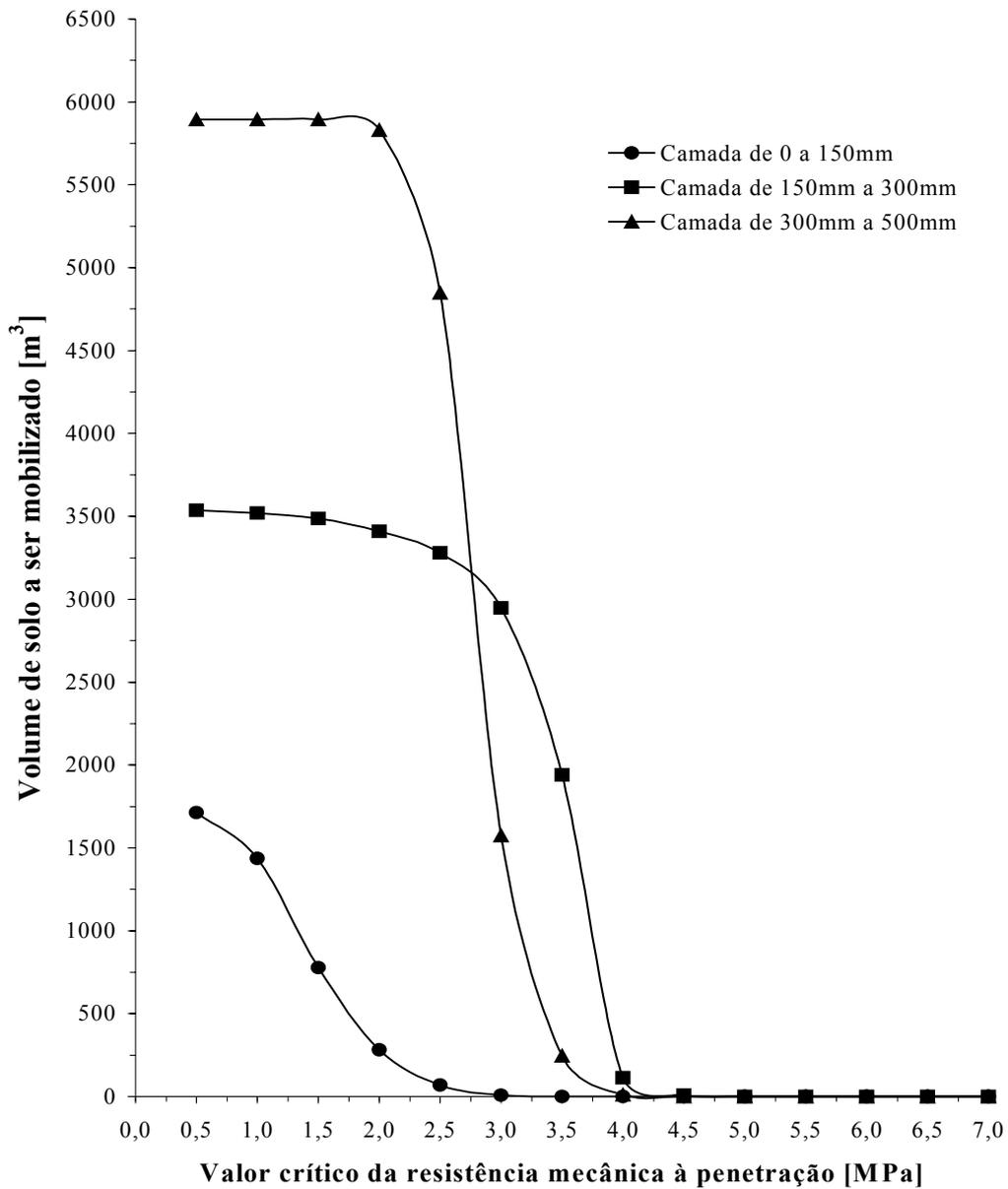


Figura 42 - Volume de solo a ser mobilizado em função da resistência mecânica à penetração considerada crítica (RPC) nos perfis horizontais de solo estudados – método geoestatístico.

A exemplo das curvas apresentadas na Figura 35, as curvas da Figura 42 também podem auxiliar na tomada de decisão quanto à subsolagem, ou não, da área.

#### **5.4.4 – Comparação entre os métodos**

A Figura 43 mostra a comparação entre as curvas de volume de solo a ser mobilizado, em função do valor crítico de resistência mecânica à penetração, obtidas pelos três métodos.

Pela visualização das curvas da Figura 43, conclui-se que os três métodos, apresentaram uma curva do tipo S, onde as suas curvas praticamente coincidiram uma com a outra, mostrando a confiabilidade de cada método.

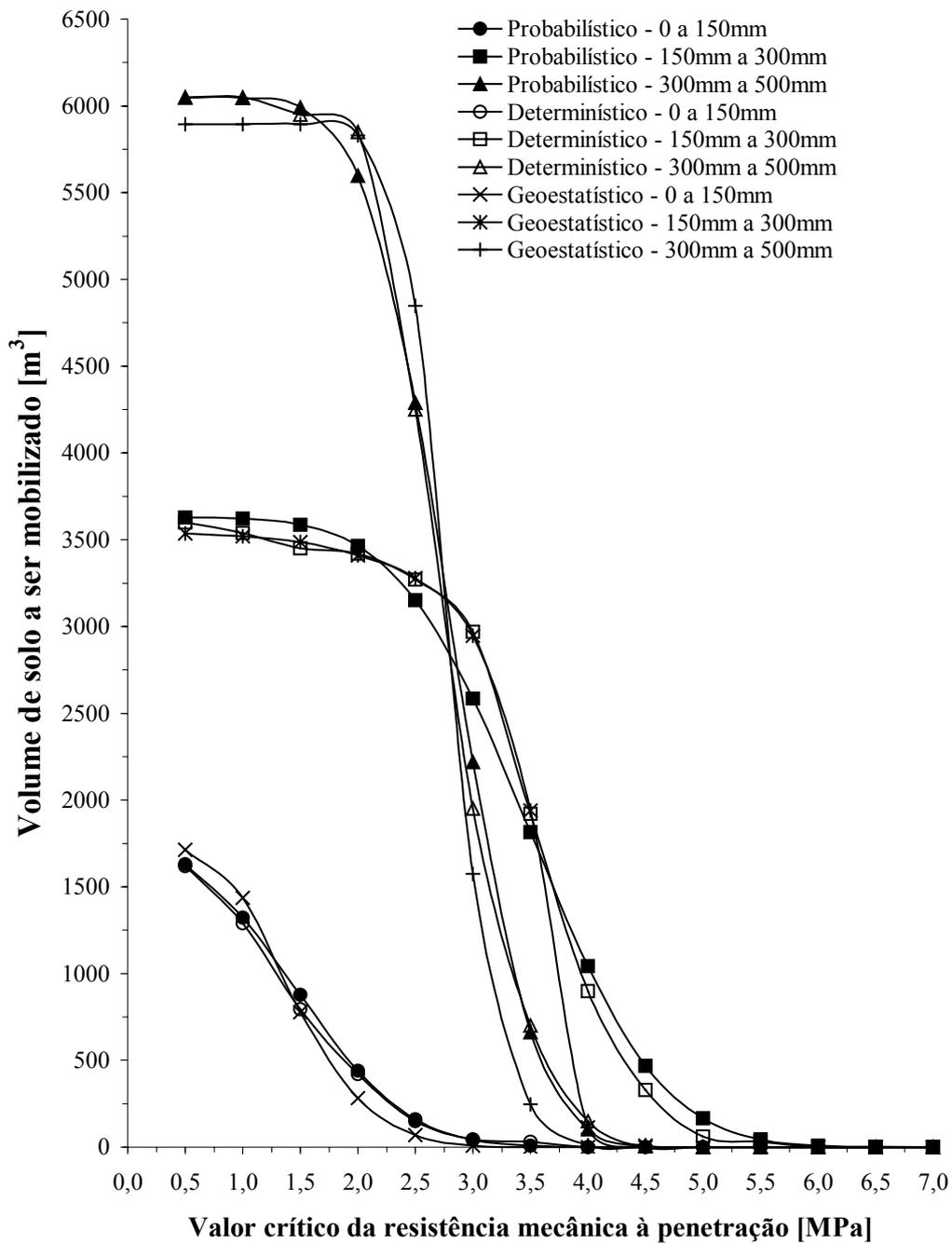


Figura 43 – Comparação entre as curvas de volume de solo a ser mobilizado em função do valor crítico da resistência mecânica à penetração, obtidas pelos três métodos apresentados.

### ***Método Probabilístico***

Vantagens:

- Praticidade no processamento dos dados;
- Não necessita o geo-referenciamento dos pontos.

Desvantagem:

- Exige que os pontos sejam independentes, aleatórios e provenientes de uma distribuição normal.

### ***Método Determinístico***

Vantagens:

- Não exige que os pontos sejam independentes, aleatórios e provenientes de uma distribuição normal;
- O referenciamento dos pontos permite conhecer a distribuição espacial de RPc.

Desvantagem:

- Exige malha distribuída regularmente.

### ***Método Geoestatístico***

Vantagem:

- Possibilita a confecção de isolinhas;

Desvantagens:

- Dificuldade de se encontrar um modelo interpolador;
- Necessita o geo-referenciamento dos dados;
- Necessita de softwares específicos.

## 6 – CONCLUSÕES

Por meio dos métodos que foram estudados, o presente trabalho permite concluir que:

- O penetrômetro eletrônico mostrou-se bastante prático na aquisição da resistência mecânica à penetração na área estudada;
- As curvas de RP em função da profundidade, permitiram identificar que houve um comportamento semelhante, para a maioria dos pontos amostrais nas camadas em mm, 0-150, 150-300 e de 300-500mm de profundidade;
- Houve um comportamento distinto para cada camada. Na maioria dos casos os maiores índices de resistência mecânica à penetração se apresentaram no perfil horizontal intermediário de 150 a 300mm de profundidade;
- No método probabilístico a análise das curvas de probabilidade de RP igual ou superior a  $RP_c$  e de volume de solo a ser mobilizado, fornecem subsídios para o diagnóstico da necessidade ou não de se proceder a operação de subsolagem;
- O método determinístico, permite identificar a porcentagem de pontos encontrados com valores de resistência mecânica à penetração (RP) igual ou superior aquela considerada crítica ( $RP_c$ ) nos perfis horizontais do solo estudado;
- O método determinístico, permite identificar a distribuição espacial dos pontos de RP igual ou superior aquela considerada crítica ( $RP_c$ );
- No método determinístico, a análise da distribuição espacial de RP, a análise das curvas de porcentagem de RP igual ou superior a  $RP_c$  e de volume de solo a ser mobilizado, fornecem subsídios para o diagnóstico da necessidade ou não de se proceder a operação de subsolagem;
- No método determinístico, a análise da distribuição espacial de RP auxilia na tomada de decisão, quanto a realização ou não da subsolagem localizada;
- O método geoestatístico, permite identificar se há dependência espacial da RP entre os pontos amostrados;
- O método geoestatístico, permite identificar a variabilidade espacial do nível de resistência mecânica à penetração nas camadas estudadas;

- O método geoestatístico, permite identificar o volume de solo a ser mobilizado em função dos valores críticos de resistência mecânica à penetração (RPc) nos perfis horizontais do solo estudado;
- No método geoestatístico, a análise da variabilidade espacial de RP e a análise das curvas de volume de solo a ser mobilizado fornecem subsídios para o diagnóstico da necessidade ou não de se proceder a operação de subsolagem;
- No método geoestatístico, a análise da distribuição espacial de RP auxilia na tomada de decisão, quanto à realização ou não da subsolagem localizada;
- Ainda por meio do método geoestatístico, mediante a confecção de mapas de isoresistência mecânica à penetração, permite dividir a área estudada em sub-áreas para um gerenciamento localizado, possibilitando subsolar apenas as áreas que necessitam, reduzindo custos e interferências desnecessárias no solo (controle ambiental);
- Os três métodos propostos apresentaram-se adequados para auxiliar o diagnóstico da necessidade de subsolagem de solos agrícolas.

## **7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Simulação de custos de subsolagem, demanda de potência e capacidade operacional;
- Desenvolvimento de softwares que auxiliem na tomada de decisão;
- Repetir o trabalho para outros teores de água e diferentes tipos de solo.

## 8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6023: Normas Bibliográficas, 2000. 22p.

AGRIANUAL 2001. São Paulo/SP. FNP Consultoria & Comércio 2001.

A GRANJA DO ANO 2000/2001. Porto Alegre/RS. Editora Centaurus 2000. Anual. Revista.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. S313.2: Soil Cone Penetrometer. St. Joseph, MI, 1997. 2p.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 307p.

BARBOSA, V. Relação Pisoteio X Produtividade. FEIRA NACIONAL DO AÇÚCAR, FENAÇUCAR, 1997, Sertãozinho/SP.

BARBOSA, V. Relação Pisoteio X Perfilho/Metro. FEIRA NACIONAL DO AÇÚCAR, FENAÇUCAR, 1997, Sertãozinho/SP.

BELTRAME apud RIPOLI, T.C.C., MIALHE, L.G. **Subsolagem e subsoladores**. Piracicaba: Decalq, 1985. 32p.

BOLLER, W. Cuidados com o solo. **Cultivar Máquinas**. Edição Número 5 – Ano I, Set/Out 2001. p.06-08.

BRUSSARD, L.; VAN FAASSEN, H.G. Effects of compaction on soil biota and soil biological processes. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994. p.215-235 (Developments in Agricultural Engineering, II).

CAMARGO, O. A. de, ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: O.A. Camargo, L.R.F. Alleoni, 1997. 132p.

### **CANA-DE-AÇÚCAR–CUSTO DE PRODUÇÃO.**

<<http://www.fnp.com.br/foldia2/culturas/canacustoprodução.html>>, 23/10/200

CAPPELLI, N. L., DANIEL, L. A. MIGUEL, M. A. Penetrômetro eletrônico para determinação do índice de cone de solos agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, 1995, Viçosa. **Separatas...** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1995. Separata n° 363.

CAPPELLI, N. L., UMEZU, C. K., GUAITOLI, G. **Desenvolvimento de um penetrômetro eletrônico geo-referenciado de baixo custo**. Campinas, 1999. 67 p. Relatório técnico (PIPE – FAPESP) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP. 1999.

CARTER, L. M. Portable recording penetrometer measures soil strength profiles. **Agricultural Engineering**. 46(6): 348-348. 1967.

CARTER, L. M. Integrating penetrometer provides average soil strength. **Agricultural Engineering**. 50(10): 618-619. 1969.

CASTRO, O. M. **Aspectos de manejo do solo**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 43-70p.

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23, 1994, Campinas. Separatas... Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1994. Separata nº 94-4-281.

COSTA, S.F. **Introdução ilustrada à estatística**. 3.ed. São Paulo: Harbra, 1998.

DAVIDOFF, B.; LEWIS, J.W.; SELIM, H.M. Variability of soil temperature with depth along a transect. **Soil Science**, v.142, n.2, p.114-123, 1986.

EHLERS, W.; KOPKE, F.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.3, p.261-275, 1983.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. XXVI, 412p.

FERNANDEZ, J., RIPOLI, T.C., MILAN, M. A compactação do solo e a brotação das soqueiras. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, 3(12):12-17, 1983.

GONÇALVES, A.C.A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas para fins de manejo da irrigação**. Piracicaba: ESALQ, USP, 1997. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1997.

GUERRA, P.A.G. **Geostatística operacional**. Brasília: Ministério das Minas e Energia, Departamento de Produção Mineral, 1988. 145p.

HENDRICK, J. G. Recording soil penetrometer. **Journal of Agricultural Engineering Research**. 14(2):183-186. 1969.

INPE. Divisão de Processamento de Imagens. **Aspectos Básicos de Geoprocessamento**. <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser301/aula3.ppt>>, 21/03/2002.

JAKOBSEN, B.F., GREACEN, E.L. Compaction of sandy forest soils by forwarder operations. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, 5:55-70, 1985.

JORGE, J. A. **Compactação do solo: causas, conseqüências e maneiras de evitar sua ocorrência**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 22p. (Circular, 117).

LASCANO, R.J.; HATFIELD, J.L. Spatial variability of evaporation along two transects of a bare soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.341-346, 1992.

LEY, G.J.; LARYEA, K.B. Spatial variability in penetration resistance of a hardsetting tropical Alfisol. **Soil & Tillage Research**, v.29, p.367-381, 1994.

LIBARDI, P.L.; PREVEDELLO, C.L.; PAULETTO, E.A. et al. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, p.85-90, 1986.

KENNEDY, J.B.; NEVILLE A.M. **Basic statistical methods for engineers & scientists**. 2nd Edition. United States of America: Harper & Row, 1976.

MAIA, J. C. S. **Determinação de esquemas de amostragem para avaliação de propriedades físicas do solo sob diferentes sistemas de preparo**. Campinas: FEAGRI, UNICAMP, 1999. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1999.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**. Lancaster, v.58, p. 1246-1266, 1963.

MATHERON apud CAMARGO, E.C.G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geostatísticos (Krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (Spring)**. Dissertação (Mestrado), 1997. Disponível na Internet. <http://www.dpi.inpe.br/teses/eduardo/>. Capturado em 27 de janeiro de 2000.

MONTGOMERY, E.G. **Experiments in wheat breeding: experimental error in the nursery and variation in nitrogen and yield**. Washington, U.S. Depto. Agric., 1913. 61p. (Bur. Plant Indust. Bul., 269).

MOOLMAN, J. H.; Van HUYSSSTEEN, L. A geostatistical analysis of the penetrometer soil strength of a deep ploughed soil. **Soil & Tillage Research**, v.15, p.11-24, 1989.

NETO, P.L.O.C. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

PATGIRI, D.K.; BARUAH, T.C. Spatial variability of total porosity, air entry potential and saturation water content in a cultivated inceptisol. I Semivariance analysis. **Agricultural Water Management**, v.27, p.1-9, 1995a.

PATGIRI, D.K.; BARUAH, T.C. Spatial variability of total porosity, air entry potential and saturation water content in a cultivated inceptisol. II Estimation through kriging. **Agricultural Water Management**, v.27, p.11-16, 1995b.

PHILLIPS, J., PERUMPRAL, J. V. Designing a microcomputer data logger for a soil cone penetrometer. **Agricultural Engineering**. 64(6): 13-14. 1983.

PRATHER, O. C., HENDRICK, J. G., SCHAFER, R. L. Na eletronic hand-operated recording penetrometer. **Transactions of the ASAE**. 13(1): 385-386, 390. 1970.

REAVES, C.A., COOPER, A.W. **Stress distribution in soil under tractor roads**. J. Agric. Eng. Soc., Bunkyo, 41:20-31, 1960.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 445p.

**Relatório de Ensaio nº 947/83** – Centro Nacional de Engenharia Agrícola – CENEA, Ministério da Agricultura, Sorocaba, SP, 1983.

RIPOLI, T. C. C., MIALHE, L. G. **Subsolagem e subsoladores**. Piracicaba: Decalq, 1985. 32p.

ROONEY, D., STELFORD, M., LANDOLT D. **Site-Specif Management Guidelines**. <<http://www.ppi-farm.org/ssmg>>, 19/01/2002.

SEIXAS, F. **Levantamento de dados sobre compactação do solo**. <<http://www.ipef.br/servicos/artigos/compactacaosolo.html>>, 12/12/2001.

SEIXAS, J. **Introdução à Geoestatística**. <<http://gasa.dcea.fct.unl.pt/opd/aula4/>>, 06/01/2000.

SMITH, L. A. & DUMAS, W. T. A recorging soil penetrometer. **Transactions of the ASAE**. 21(1): 12-14,19. 1978.

STOLF, R. **A compactação do solo e perspectivas de subsolagem em citrus**. Laranja, Cordeirópolis, 8:283-308, 1987.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI N. V. Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.1, n.3, 1983.

SWAIN apud RIPOLI, T.C.C., MIALHE, L.G. **Subsolagem e subsoladores**. Piracicaba: Decalq, 1985. 32p.

TOLEDO, G.L.; OVALLE I.I. **Estatística básica**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 1985.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. 58p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 23). Londrina: Embrapa Soja, 1999.

TROUSE JR., A.C. **Root tolerance to soil impediments**. In: Crop tolerance to subtropical land conditions. Madison, ASA/CSSA/SSSA, 1978. p.193-232.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VAUCHAUD, G. & NIELSEN, D.R. The use of cokriging with limited field observations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 47: 175-184, 1983.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Instituto Agrônomo de Campinas, 1997.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 45: 1040-1048, 1981.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. & TILLOTSON, P.M. The Scaling of semivariograms and the kriging estimation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 21:525-533, 1997.

WAYNICK, D.D. Variability in soils and its significance to past and future soil investigations. I. Statistical study of nitrification in soils. **Agricultural Sciences**, Davis, 3: 243-270, 1918.

WATERWAYS EXPERIMENT STATION. **Trafficability as a function of soils – Development of testing instruments**. Tech. Memo. 3-240 3<sup>rd</sup> Supplement. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiments Station, Vicksburg, MS. 1948.

WILFORD, J. R., WOOTEN, O. B., FULGHAM, F. E. Tractor mounted field penetrometer. **Transactions of the ASAE**. 15(2): 226-227. 1972.

WILKERSON, J. B., TOMPKINS, F. D. e WILHELM, L. R. Microprocessor based tractor mounted soil cone penetrometer. **ASAE Paper N° 82-5511**. ASAE, St. Joseph, MI 49085. 1982.

WOODRUFF, D. W. & LENKER, D. H. A handheld digital penetrometer. **ASAE Paper N° 84-1038**. ASAE, St. Joseph, MI 49085, 1984.

## **9 - APÊNDICES**

## Apêndice 1 – Coordenadas dos marcos e dos pontos experimentais (sistema WGS84)

Pontos	Geodésicas		Plano-Retangulares (UTM)	
	Latitude	Longitude	Y [m]	X [m]
M1	-22°20'42,9014"	-47°25'02,4910"	7527033.0	251341.6
M2	-22°20'43,2246"	-47°25'02,5279"	7527078.1	250840.1
A1	-22°20'43,5477"	-47°25'02,5648"	7526960.3	251033.8
A2	-22°20'43,8709"	-47°25'02,6017"	7526950.3	251032.9
A3	-22°20'44,1940"	-47°25'02,6386"	7526940.4	251032.0
A4	-22°20'44,5172"	-47°25'02,6755"	7526930.4	251031.1
A5	-22°20'44,8404"	-47°25'02,7124"	7526920.4	251030.2
A6	-22°20'45,1635"	-47°25'02,7493"	7526910.5	251029.3
A7	-22°20'45,4867"	-47°25'02,7863"	7526900.5	251028.4
A8	-22°20'45,8099"	-47°25'02,8232"	7526890.6	251027.5
A9	-22°20'46,1330"	-47°25'02,8601"	7526880.6	251026.6
A10	-22°20'42,9357"	-47°25'02,1436"	7526870.6	251025.7
A11	-22°20'43,2589"	-47°25'02,1805"	7526860.7	251024.9
B1	-22°20'43,5821"	-47°25'02,2174"	7526959.4	251043.8
B2	-22°20'43,9052"	-47°25'02,2543"	7526949.4	251042.9
B3	-22°20'44,2284"	-47°25'02,2912"	7526939.5	251042.0
B4	-22°20'44,5515"	-47°25'02,3281"	7526929.5	251041.1
B5	-22°20'44,8747"	-47°25'02,3650"	7526919.5	251040.2
B6	-22°20'45,1979"	-47°25'02,4019"	7526909.6	251039.3
B7	-22°20'45,5210"	-47°25'02,4389"	7526899.6	251038.4
B8	-22°20'45,8442"	-47°25'02,4758"	7526889.7	251037.5
B9	-22°20'46,1673"	-47°25'02,5127"	7526879.7	251036.6
B10	-22°20'42,9701"	-47°25'01,7962"	7526869.7	251035.7
B11	-22°20'43,2932"	-47°25'01,8331"	7526859.8	251034.8
C1	-22°20'43,6164"	-47°25'01,8700"	7526958.5	251053.7
C2	-22°20'43,9396"	-47°25'01,9069"	7526948.5	251052.8
C3	-22°20'44,2627"	-47°25'01,9438"	7526938.6	251051.9
C4	-22°20'44,5859"	-47°25'01,9807"	7526928.6	251051.1
C5	-22°20'44,9090"	-47°25'02,0176"	7526918.6	251050.2
C6	-22°20'45,2322"	-47°25'02,0545"	7526908.7	251049.3
C7	-22°20'45,5554"	-47°25'02,0915"	7526898.7	251048.4
C8	-22°20'45,8785"	-47°25'02,1284"	7526888.8	251047.5
C9	-22°20'46,2017"	-47°25'02,1653"	7526878.8	251046.6
C10	-22°20'43,0044"	-47°25'01,4488"	7526868.8	251045.7
C11	-22°20'43,3276"	-47°25'01,4857"	7526858.9	251044.8
D1	-22°20'43,6507"	-47°25'01,5226"	7526957.6	251063.7
D2	-22°20'43,9739"	-47°25'01,5595"	7526947.6	251062.8
D3	-22°20'44,2971"	-47°25'01,5964"	7526937.7	251061.9
D4	-22°20'44,6202"	-47°25'01,6333"	7526927.7	251061.0
D5	-22°20'42,9014"	-47°25'02,4910"	7526917.7	251060.1

Continuação do Apêndice 1

Pontos	Geodésicas		Plano-Retangulares (UTM)	
	Latitude	Longitude	Y [m]	X [m]
D6	-22°20'44,6202"	-47°25'01,6333"	7526907.8	251059.2
D7	-22°20'44,9434"	-47°25'01,6702"	7526897.8	251058.3
D8	-22°20'45,2665"	-47°25'01,7071"	7526887.9	251057.4
D9	-22°20'45,5897"	-47°25'01,7441"	7526877.9	251056.5
D10	-22°20'45,9129"	-47°25'01,7810"	7526867.9	251055.6
D11	-22°20'46,2360"	-47°25'01,8179"	7526858.0	251054.7
E1	-22°20'43,0387"	-47°25'01,1014"	7526956.7	251073.7
E2	-22°20'43,3619"	-47°25'01,1383"	7526946.7	251072.8
E3	-22°20'43,6851"	-47°25'01,1752"	7526936.8	251071.9
E4	-22°20'44,0082"	-47°25'01,2121"	7526926.8	251071.0
E5	-22°20'44,3314"	-47°25'01,2490"	7526916.9	251070.1
E6	-22°20'44,6545"	-47°25'01,2859"	7526906.9	251069.2
E7	-22°20'44,9777"	-47°25'01,3228"	7526896.9	251068.3
E8	-22°20'45,3009"	-47°25'01,3598"	7526887.0	251067.4
E9	-22°20'45,6240"	-47°25'01,3967"	7526877.0	251066.5
E10	-22°20'45,9472"	-47°25'01,4336"	7526867.1	251065.6
E11	-22°20'46,2704"	-47°25'01,4705"	7526857.1	251064.7
F1	-22°20'43,0731"	-47°25'00,7540"	7526955.8	251083.6
F2	-22°20'43,3962"	-47°25'00,7909"	7526945.8	251082.7
F3	-22°20'43,7194"	-47°25'00,8278"	7526935.9	251081.8
F4	-22°20'44,0426"	-47°25'00,8647"	7526925.9	251080.9
F5	-22°20'44,3657"	-47°25'00,9016"	7526916.0	251080.0
F6	-22°20'44,6889"	-47°25'00,9385"	7526906.0	251079.1
F7	-22°20'45,0120"	-47°25'00,9754"	7526896.0	251078.2
F8	-22°20'45,3352"	-47°25'01,0124"	7526886.1	251077.3
F9	-22°20'45,6584"	-47°25'01,0493"	7526876.1	251076.4
F10	-22°20'45,9815"	-47°25'01,0862"	7526866.2	251075.5
F11	-22°20'46,3047"	-47°25'01,1231"	7526856.2	251074.7
G1	-22°20'43,1074"	-47°25'00,4066"	7526954.9	251093.6
G2	-22°20'43,4306"	-47°25'00,4435"	7526944.9	251092.7
G3	-22°20'43,7537"	-47°25'00,4804"	7526935.0	251091.8
G4	-22°20'44,0769"	-47°25'00,5173"	7526925.0	251090.9
G5	-22°20'44,4001"	-47°25'00,5542"	7526915.1	251090.0
G6	-22°20'44,7232"	-47°25'00,5911"	7526905.1	251089.1
G7	-22°20'45,0464"	-47°25'00,6280"	7526895.1	251088.2
G8	-22°20'45,3695"	-47°25'00,6650"	7526885.2	251087.3
G9	-22°20'45,6927"	-47°25'00,7019"	7526875.2	251086.4
G10	-22°20'46,0159"	-47°25'00,7388"	7526865.3	251085.5
G11	-22°20'46,3390"	-47°25'00,7757"	7526855.3	251084.6
H1	-22°20'43,1417"	-47°25'00,0592"	7526954.0	251103.5

Continuação do Apêndice 1

Pontos	Geodésicas		Plano-Retangulares (UTM)	
	Latitude	Longitude	Y [m]	X [m]
H2	-22°20'43,4649"	-47°25'00,0961"	7526944.0	251102.6
H3	-22°20'43,7881"	-47°25'00,1330"	7526934.1	251101.7
H4	-22°20'44,1112"	-47°25'00,1699"	7526924.1	251100.8
H5	-22°20'44,4344"	-47°25'00,2068"	7526914.2	251100.0
H6	-22°20'44,7576"	-47°25'00,2437"	7526904.2	251099.1
H7	-22°20'45,0807"	-47°25'00,2806"	7526894.2	251098.2
H8	-22°20'45,4039"	-47°25'00,3176"	7526884.3	251097.3
H9	-22°20'45,7270"	-47°25'00,3545"	7526874.3	251096.4
H10	-22°20'46,0502"	-47°25'00,3914"	7526864.4	251095.5
H11	-22°20'46,3734"	-47°25'00,4283"	7526854.4	251094.6
I1	-22°20'43,1761"	-47°24'59,7118"	7526953.1	251113.5
I2	-22°20'43,4992"	-47°24'59,7487"	7526943.1	251112.6
I3	-22°20'43,8224"	-47°24'59,7856"	7526933.2	251111.7
I4	-22°20'44,1456"	-47°24'59,8225"	7526923.2	251110.8
I5	-22°20'44,4687"	-47°24'59,8594"	7526913.3	251109.9
I6	-22°20'44,7919"	-47°24'59,8963"	7526903.3	251109.0
I7	-22°20'45,1151"	-47°24'59,9332"	7526893.3	251108.1
I8	-22°20'45,4382"	-47°24'59,9702"	7526883.4	251107.2
I9	-22°20'45,7614"	-47°25'00,0071"	7526873.4	251106.3
I10	-22°20'46,0845"	-47°25'00,0440"	7526863.5	251105.4
I11	-22°20'46,4077"	-47°25'00,0809"	7526853.5	251104.5
J1	-22°20'43,2104"	-47°24'59,3644"	7526952.2	251123.5
J2	-22°20'43,5336"	-47°24'59,4013"	7526942.2	251122.6
J3	-22°20'43,8567"	-47°24'59,4382"	7526932.3	251121.7
J4	-22°20'44,1799"	-47°24'59,4751"	7526922.3	251120.8
J5	-22°20'44,5031"	-47°24'59,5120"	7526912.4	251119.9
J6	-22°20'44,8262"	-47°24'59,5489"	7526902.4	251119.0
J7	-22°20'45,1494"	-47°24'59,5859"	7526892.4	251118.1
J8	-22°20'45,4725"	-47°24'59,6228"	7526882.5	251117.2
J9	-22°20'45,7957"	-47°24'59,6597"	7526872.5	251116.3
J10	-22°20'46,1189"	-47°24'59,6966"	7526862.6	251115.4
J11	-22°20'46,4420"	-47°24'59,7335"	7526852.6	251114.5
K1	-22°20'43,2447"	-47°24'59,0170"	7526951.3	251133.4
K2	-22°20'43,5679"	-47°24'59,0539"	7526941.3	251132.5
K3	-22°20'43,8911"	-47°24'59,0908"	7526931.4	251131.6
K4	-22°20'44,2142"	-47°24'59,1277"	7526921.4	251130.7
K5	-22°20'44,5374"	-47°24'59,1646"	7526911.5	251129.8
K6	-22°20'44,8606"	-47°24'59,2015"	7526901.5	251128.9
K7	-22°20'45,1837"	-47°24'59,2385"	7526891.6	251128.0
K8	-22°20'45,5069"	-47°24'59,2754"	7526881.6	251127.1

Continuação do Apêndice 1

<b>Pontos</b>	<b>Geodésicas</b>		<b>Plano-Retangulares (UTM)</b>	
	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Y [m]</b>	<b>X [m]</b>
K9	-22°20'45,8300"	-47°24'59,3123"	7526871.6	251126.2
K10	-22°20'46,1532"	-47°24'59,3492"	7526861.7	251125.3
K11	-22°20'46,4764"	-47°24'59,3861"	7526851.7	251124.4

**Apêndice 2 – Umidade média do solo (%), em base seca, nas camadas de 0 a 200mm, de 200mm a 400mm e de 400mm a 600mm**

Pontos	Camadas (mm)			Pontos	Camadas (mm)		
	0 a 200	200 a 400	400 a 600		0 a 200	200 a 400	400 a 600
A1	23.6	23.2	26.2	G1	22.1	20.7	19.3
A3	19.1	21.9	23.6	G3	20.5	20.0	20.6
A5	21.2	20.2	20.7	G5	19.2	19.8	19.5
A7	20.2	20.2	19.3	G7	15.1	19.8	18.6
A9	18.6	21.0	22.4	G9	20.9	20.6	19.2
A11	22.9	24.0	25.1	G11	19.3	21.9	22.1
C1	22.9	23.0	22.9	I1	12.9	16.2	18.3
C3	16.1	22.8	20.0	I3	17.7	18.2	19.3
C5	20.5	21.7	22.4	I5	20.2	20.5	21.7
C7	19.9	21.2	22.5	I7	17.2	19.4	18.7
C9	19.6	20.6	20.6	I9	21.1	21.0	20.4
C11	20.1	20.5	22.0	I11	19.0	20.8	22.2
E1	16.4	18.2	18.8	K1	17.0	18.3	19.1
E3	20.1	20.6	19.4	K3	14.5	19.8	20.4
E5	18.3	19.2	18.8	K5	16.6	16.9	18.0
E7	19.2	19.7	19.1	K7	19.9	22.2	21.2
E9	17.3	20.2	20.5	K9	21.0	20.6	21.2
E11	20.3	20.3	20.8	K11	16.8	18.8	20.4

**Apêndice 3 – Resistência mecânica à penetração (MPa) obtida nos 121 pontos amostrados relativos à camada de 0 a 150mm de profundidade**

Pontos	Profundidade [mm]														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
A1	0,003	0,041	0,159	0,302	0,476	0,522	0,621	0,679	0,841	1,318	1,652	1,712	1,720	1,712	1,706
A2	0,003	0,020	0,171	0,298	0,356	0,457	0,613	0,858	1,175	1,751	2,384	2,842	3,348	3,507	3,754
A3	0,076	0,244	0,327	0,418	0,547	1,142	1,631	3,201	5,195	5,249	4,749	4,793	5,705	5,784	5,767
A4	0,005	0,045	0,117	0,526	0,731	1,063	1,200	1,343	1,900	2,464	3,111	3,661	4,438	4,625	4,762
A5	0,003	0,080	0,217	0,314	0,327	0,345	0,362	0,379	0,391	0,385	0,381	0,368	0,356	0,370	0,412
A6	0,130	0,225	0,331	0,387	0,462	0,495	0,547	0,538	0,534	0,518	0,495	0,528	0,638	1,017	1,337
A7	0,219	0,708	0,905	1,616	2,106	2,427	2,697	2,879	3,543	3,798	3,972	4,086	4,291	4,351	4,378
A8	0,030	0,119	0,182	0,258	0,360	0,495	0,816	1,542	2,342	2,842	3,429	3,570	3,740	3,779	3,785
A9	0,366	0,389	0,416	0,437	0,451	0,486	1,637	1,666	1,793	2,029	2,437	2,589	2,958	3,093	3,122
A10	0,066	0,080	0,142	0,204	0,236	0,275	0,279	0,281	0,292	0,298	0,370	0,982	2,388	3,060	3,597
A11	0,536	1,444	2,415	3,145	3,727	3,841	3,839	3,528	3,167	2,881	2,498	2,894	3,306	3,051	2,707
B1	0,213	0,329	0,350	0,360	0,379	0,381	0,389	0,420	0,526	1,071	1,728	2,218	2,456	2,977	3,227
B2	0,254	0,406	0,462	0,600	1,052	1,295	1,405	1,587	1,774	1,925	2,010	2,071	2,224	2,355	2,498
B3	0,153	0,165	0,202	0,314	1,285	2,972	4,876	5,467	5,664	5,693	5,740	5,730	5,626	5,369	5,220
B4	0,055	0,086	0,128	0,182	0,242	0,316	0,445	0,723	0,976	1,106	1,428	1,475	1,969	2,645	3,640
B5	0,045	0,078	0,080	0,101	0,134	0,161	0,215	0,229	0,298	0,528	1,453	2,373	3,337	3,675	3,876
B6	0,005	0,057	0,472	1,436	2,545	3,001	3,404	3,628	3,733	2,906	2,970	3,080	3,091	3,115	3,201
B7	0,124	0,244	0,513	1,409	1,845	2,286	2,471	2,693	2,749	2,856	2,999	3,296	3,588	3,684	3,704
B8	0,039	0,128	0,265	0,329	0,439	0,748	1,067	1,536	2,095	2,448	2,800	2,960	2,966	2,979	2,987
B9	0,447	0,630	0,661	0,764	0,793	0,762	0,735	0,731	0,733	0,715	0,715	0,856	1,488	2,547	3,275
B10	0,097	0,178	0,186	0,190	0,196	0,196	0,202	0,204	0,209	2,355	2,865	3,099	3,439	3,711	4,022
B11	0,049	0,155	0,223	0,316	0,360	0,435	0,559	1,167	2,288	2,724	3,155	3,397	3,426	3,458	3,489
C1	0,659	1,059	1,511	1,546	1,581	1,621	1,650	1,666	1,689	1,716	2,100	2,112	2,176	2,471	2,703
C2	0,037	0,122	0,169	0,221	0,240	0,240	0,246	0,277	0,314	0,882	1,710	2,537	3,433	4,241	4,559
C3	0,117	0,173	0,213	0,244	0,285	0,389	0,472	1,361	1,699	2,015	2,172	2,189	2,199	2,218	2,228
C4	0,093	0,184	0,236	0,277	0,339	0,420	0,565	0,804	1,417	2,209	2,270	2,336	2,392	2,440	2,512
C5	0,028	0,099	0,198	0,364	0,640	0,727	0,887	1,256	2,247	3,012	3,312	3,402	3,499	3,536	3,530
C6	0,314	0,590	0,764	0,949	1,082	1,135	1,258	1,778	2,605	3,072	3,327	3,441	3,493	3,507	3,520
C7	0,105	0,246	0,412	0,603	0,773	0,845	1,042	1,104	1,152	1,295	1,836	2,539	2,825	3,076	3,227
C8	0,070	0,148	0,337	0,466	0,632	0,671	0,700	0,644	0,584	0,547	0,555	0,880	1,210	1,965	2,189
C9	0,045	0,115	0,163	0,234	0,248	0,287	0,329	0,549	0,802	0,997	1,048	1,077	1,144	1,658	2,218
C10	0,066	0,107	0,302	0,443	0,532	0,594	0,652	0,754	1,026	1,374	1,619	2,021	2,572	3,035	3,283
C11	0,103	0,142	0,300	0,370	0,547	0,723	1,575	2,919	3,613	3,930	4,212	4,378	4,540	4,577	4,544
D1	0,107	0,271	0,698	1,042	1,577	2,197	2,359	2,479	2,581	2,672	2,751	2,858	3,109	3,153	3,184
D2	0,016	0,070	0,151	0,279	0,397	0,518	0,567	0,663	0,696	0,826	1,106	1,959	3,120	3,489	3,605
D3	0,016	0,018	0,024	0,045	0,109	0,236	0,455	0,538	0,793	0,893	0,889	0,961	1,492	2,255	2,778
D4	0,037	0,097	0,128	0,192	0,252	0,279	0,345	0,511	0,549	0,654	0,741	0,760	0,764	0,808	1,202
D5	0,049	0,049	0,204	0,420	0,704	0,930	1,210	1,531	2,106	2,334	2,390	2,421	2,454	2,473	3,028
D6	0,093	0,250	0,681	1,276	4,131	4,934	5,259	5,247	5,199	5,127	5,075	5,042	4,942	4,720	4,675
D7	0,018	0,082	0,159	0,238	0,312	0,437	0,582	0,719	1,218	1,482	1,567	1,668	1,724	2,562	3,474
D8	0,053	0,074	0,157	0,319	0,422	0,549	0,625	0,675	0,706	0,868	1,424	2,120	2,228	2,297	2,413
D9	0,000	0,000	0,000	0,039	0,099	0,192	0,368	0,646	1,148	1,749	2,160	2,883	3,402	4,019	4,521
D10	0,045	0,198	0,368	0,522	0,644	0,895	1,079	1,169	1,592	2,286	3,122	3,312	3,694	4,026	4,270
D11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,018	0,026	0,043	0,051	0,059	0,070	0,082	0,088	0,101

Continuação do Apêndice 3.

Pontos	Profundidade [mm]														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
E1	0,215	0,374	0,474	0,634	0,721	0,727	0,731	0,739	0,748	0,754	0,760	0,766	4,071	4,337	4,409
E2	0,000	0,072	0,119	0,256	0,327	0,399	0,507	0,661	0,746	1,525	1,776	3,055	3,480	3,512	3,538
E3	0,000	0,045	0,171	0,277	0,300	0,316	0,327	0,445	0,617	1,044	2,270	3,638	4,979	5,205	5,537
E4	0,138	0,238	0,267	0,379	0,443	0,457	0,457	0,472	0,511	0,547	0,561	0,623	0,650	0,598	0,598
E5	0,024	0,095	0,180	0,269	0,306	0,379	0,412	0,445	0,447	0,460	0,638	1,233	1,395	1,507	1,529
E6	0,047	0,142	0,443	0,762	1,395	1,662	2,352	2,724	3,252	3,541	3,874	3,878	3,980	4,202	4,158
E7	0,000	0,066	0,151	0,263	0,316	0,360	0,372	0,399	0,424	0,518	0,953	1,834	3,101	4,403	4,540
E8	0,128	0,250	0,391	0,549	0,607	0,756	0,802	0,849	0,984	1,108	1,332	2,116	2,827	3,371	3,468
E9	0,122	0,178	0,420	0,553	0,553	0,557	0,632	0,679	0,783	0,895	0,941	1,003	1,455	1,809	1,869
E10	0,000	0,010	0,173	0,443	0,656	0,938	1,142	1,384	1,616	1,940	2,440	2,670	2,807	2,919	3,095
E11	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
F1	0,001	0,005	0,074	0,331	0,984	1,546	2,075	2,790	3,746	4,013	4,152	4,206	4,372	4,621	4,729
F2	0,088	0,090	0,142	0,211	0,263	0,308	0,379	0,667	1,349	2,199	2,972	3,424	3,746	4,005	4,134
F3	0,105	0,196	0,354	0,571	0,882	1,390	1,932	2,566	3,022	3,344	3,480	3,758	4,378	4,809	5,006
F4	0,076	0,099	0,190	0,470	0,972	1,917	2,390	2,786	3,043	3,186	3,315	3,341	3,350	3,400	3,404
F5	0,107	0,117	0,646	1,809	1,886	1,930	2,002	2,060	2,104	2,131	2,189	3,435	3,462	3,480	3,493
F6	0,157	0,175	0,283	0,296	0,310	0,323	0,343	0,358	0,385	0,414	0,615	0,638	0,673	0,700	0,729
F7	0,001	0,005	0,093	0,211	0,225	0,234	0,234	0,242	0,281	0,352	0,358	0,366	0,445	0,576	1,162
F8	0,032	0,032	0,032	0,034	0,037	0,037	0,039	0,041	0,045	2,889	3,086	3,157	3,252	3,325	3,408
F9	0,148	0,323	0,590	0,646	0,702	0,822	0,965	1,150	1,353	1,397	1,434	1,451	1,546	1,959	2,649
F10	0,186	0,190	0,352	0,491	0,868	1,241	2,122	2,272	2,419	2,616	2,740	2,773	2,780	2,771	2,686
F11	0,000	0,001	0,167	0,248	0,715	1,546	2,487	2,869	3,447	3,675	3,744	3,878	3,891	3,928	3,881
G1	0,057	0,234	0,412	0,430	0,447	0,466	0,464	0,478	0,491	0,571	0,630	0,735	0,816	1,063	1,137
G2	0,140	0,180	0,225	0,391	0,559	0,634	0,723	1,407	2,249	2,852	3,470	3,650	3,690	3,723	3,655
G3	0,008	0,107	0,236	0,323	0,424	0,441	0,455	0,476	0,495	0,515	0,542	0,561	2,071	2,075	2,079
G4	0,018	0,026	0,070	0,115	0,132	0,169	0,196	0,213	0,227	0,252	0,352	0,385	0,522	0,831	1,210
G5	0,003	0,001	0,045	0,134	0,377	0,899	1,596	2,373	3,429	4,140	4,447	4,492	4,519	4,476	4,411
G6	0,003	0,122	0,603	0,943	1,674	2,120	2,352	2,396	2,421	2,659	2,724	2,881	2,950	3,022	3,118
G7	0,122	0,211	0,401	0,451	0,528	0,625	0,721	0,812	0,934	1,220	1,328	1,540	2,516	4,389	4,853
G8	0,005	0,005	0,047	0,144	0,275	0,453	0,640	0,779	0,822	0,853	1,069	1,287	1,743	2,811	3,470
G9	0,005	0,103	0,184	0,372	0,808	1,274	1,538	2,249	3,022	3,489	4,279	4,409	4,411	4,463	4,432
G10	0,047	0,051	0,063	0,142	0,260	0,609	0,849	1,061	1,210	2,062	2,925	3,717	4,011	4,158	4,210
G11	0,003	0,005	0,003	0,016	0,088	0,119	0,153	0,306	0,789	1,623	2,384	2,914	3,505	3,943	4,013
H1	0,049	0,053	0,124	0,590	0,781	0,976	1,223	1,903	3,225	3,812	3,928	3,986	4,013	4,026	4,065
H2	0,047	0,049	0,101	0,126	0,163	0,217	0,387	0,600	0,750	0,907	1,196	1,741	1,857	1,876	1,845
H3	0,057	0,072	0,093	0,105	0,109	0,130	0,144	0,171	0,234	0,410	0,530	0,592	0,634	0,746	0,870
H4	0,051	0,124	0,182	0,360	0,665	1,001	1,237	1,737	2,226	2,520	2,717	2,784	2,819	3,211	3,344
H5	0,005	0,086	0,117	0,204	0,219	0,250	0,273	0,287	0,312	0,341	0,350	0,352	0,582	1,847	3,091
H6	0,155	0,211	0,221	0,229	0,246	0,265	0,287	0,300	0,319	1,706	2,330	2,817	3,456	3,555	3,679
H7	0,003	0,001	0,028	0,088	0,151	0,250	0,584	1,449	2,595	2,860	3,068	3,337	3,816	4,198	4,486
H8	0,063	0,082	0,256	0,464	0,791	2,454	3,746	4,134	4,304	4,407	4,411	4,478	4,484	4,488	4,476
H9	0,124	0,151	0,171	0,470	1,666	2,670	4,100	4,221	4,328	4,386	4,411	4,411	4,411	4,422	4,411
H10	0,008	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	1,312	2,655	4,245	4,511	4,639	4,936	4,942	5,019
H11	0,008	0,053	0,132	0,308	0,833	0,878	0,907	0,959	1,009	1,061	1,092	1,142	3,756	3,901	3,945
I1	0,084	0,184	0,345	0,445	0,499	0,518	0,588	0,646	0,789	1,127	1,401	1,560	1,658	1,697	1,728
I2	0,020	0,153	0,312	0,520	0,594	0,642	0,627	0,596	0,574	0,588	0,930	1,359	2,077	2,379	2,707
I3	0,053	0,115	0,258	0,389	0,791	1,218	1,764	2,066	2,417	2,543	2,572	2,601	2,608	2,618	2,618
I4	0,003	0,005	0,066	0,080	0,086	0,090	0,093	0,099	0,163	0,437	0,943	1,554	2,097	2,191	2,257
I5	0,005	0,047	0,358	0,451	0,974	1,071	1,237	1,293	1,378	1,631	1,739	1,867	1,950	2,106	2,719
I6	0,005	0,005	0,126	0,242	0,325	0,953	2,485	3,086	3,580	4,022	4,461	4,542	4,542	4,434	4,314
I7	0,008	0,049	0,132	0,213	0,248	0,273	0,310	0,491	0,814	1,202	1,610	1,905	2,301	2,645	2,749
I8	0,088	0,093	0,097	0,099	0,101	0,105	0,107	0,111	2,193	2,419	2,593	2,670	2,749	2,807	2,813
I9	0,028	0,043	0,055	0,331	0,462	0,489	0,505	0,513	0,549	0,625	1,075	1,374	1,726	1,778	1,809
I10	0,008	0,008	0,059	0,207	0,316	0,410	0,735	0,934	1,339	1,730	2,500	3,111	3,953	4,420	5,199
I11	0,010	0,034	0,107	0,198	0,383	0,999	2,035	3,145	3,174	3,196	3,211	3,215	3,238	3,263	3,288

Continuação do Apêndice 3.

Pontos	Profundidade [mm]														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
J1	0,008	0,005	0,028	0,090	0,281	0,302	0,314	0,397	0,449	0,499	0,522	0,571	0,818	2,626	4,652
J2	0,020	0,250	0,354	0,520	0,663	0,708	0,756	0,882	1,548	2,222	2,574	3,149	3,594	3,953	4,078
J3	0,070	0,076	0,084	0,093	0,277	0,460	0,598	0,688	0,785	1,229	2,228	2,682	2,941	3,207	3,321
J4	0,008	0,032	0,161	0,287	0,443	1,063	1,434	1,739	1,730	1,795	1,859	2,726	3,124	3,356	3,480
J5	0,111	0,248	0,563	0,847	0,984	1,216	1,486	1,789	1,882	1,948	1,992	2,054	2,191	2,326	2,408
J6	0,059	0,144	0,211	0,343	0,567	1,133	1,786	2,371	2,744	2,813	2,846	2,881	2,929	2,937	2,939
J7	0,008	0,103	0,124	0,161	0,215	0,285	0,513	1,614	3,138	4,142	4,540	4,662	4,795	4,892	4,940
J8	0,008	0,005	0,005	0,070	0,097	0,200	0,783	1,563	2,485	3,184	3,474	3,671	3,733	3,733	3,735
J9	0,275	0,337	0,387	0,941	1,297	1,324	1,347	1,372	1,407	1,436	1,457	2,091	2,108	2,122	2,135
J10	0,010	0,146	0,497	1,055	1,579	1,728	1,849	1,923	2,012	2,041	2,062	2,112	2,280	2,477	2,651
J11	0,008	0,010	0,068	0,130	0,173	0,358	0,800	1,220	1,932	2,719	3,727	4,312	4,824	4,967	5,025
K1	1,030	1,861	1,882	1,921	1,967	2,012	2,044	2,083	2,126	3,503	3,526	3,553	3,586	3,601	3,601
K2	0,008	0,008	0,057	0,134	0,269	0,439	1,527	2,796	2,852	2,896	2,941	3,006	3,078	3,113	3,178
K3	0,010	0,008	0,008	0,010	0,010	0,018	0,024	0,654	0,806	0,789	0,739	0,694	0,690	0,953	2,288
K4	0,053	0,053	0,057	0,124	0,289	0,594	0,613	0,652	0,679	0,704	0,729	0,744	2,927	3,086	3,134
K5	0,039	0,045	0,047	0,053	0,059	0,068	0,074	0,082	0,520	0,536	0,520	0,470	0,406	0,358	0,370
K6	0,074	0,126	0,140	0,155	0,163	0,175	0,184	0,198	0,696	0,712	0,739	0,768	0,800	0,818	0,847
K7	0,010	0,010	0,043	0,165	0,248	0,327	0,362	0,377	0,399	0,410	0,428	0,439	0,439	0,470	0,553
K8	0,005	0,008	0,005	0,008	0,005	0,008	0,010	0,008	0,008	0,010	0,051	0,194	0,397	0,437	0,466
K9	0,059	0,080	0,140	0,180	0,294	0,470	0,553	0,717	1,175	1,770	2,145	2,406	2,500	2,676	2,784
K10	0,010	0,008	0,049	0,366	2,321	3,337	3,951	4,297	4,405	4,586	4,700	4,745	4,809	4,807	4,807
K11	0,457	0,495	0,518	0,555	0,598	0,648	0,681	0,731	3,601	3,926	4,040	4,131	4,134	4,177	4,221

**Apêndice 4 – Resistência mecânica à penetração (MPa) obtida nos 121 pontos amostrados relativos à camada de 150mm a 300mm de profundidade**

Pontos	Profundidade [mm]														
	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
A1	1,656	1,923	2,371	3,360	4,194	4,453	4,679	4,712	4,785	4,830	4,834	4,834	4,828	4,822	4,760
A2	3,901	3,947	4,022	4,069	4,098	4,111	4,098	4,073	3,972	3,704	3,555	3,491	3,489	3,462	3,451
A3	5,732	5,585	5,481	5,220	4,853	4,619	4,349	4,270	4,364	4,438	4,471	4,432	4,330	4,277	4,144
A4	4,938	5,019	4,565	4,523	4,511	4,490	4,430	4,245	4,073	3,636	3,957	4,065	4,113	4,138	4,113
A5	0,659	0,812	1,233	1,295	1,334	1,349	1,283	1,254	1,191	1,125	1,059	1,034	1,036	1,100	1,115
A6	1,507	1,660	1,855	2,027	2,108	2,129	2,145	2,156	2,193	2,297	2,558	3,178	3,350	3,489	3,509
A7	4,382	4,411	4,418	4,420	4,577	4,955	5,096	4,984	5,073	5,079	5,081	5,027	4,797	4,710	4,411
A8	3,789	3,793	3,781	3,756	3,754	3,756	3,746	3,686	3,686	3,657	3,657	3,655	3,621	3,617	3,588
A9	3,157	3,176	3,190	3,186	3,186	3,190	3,190	3,190	3,203	3,203	3,190	3,192	3,184	3,165	3,142
A10	3,887	4,044	4,073	4,150	4,150	4,086	3,955	3,760	3,325	3,159	3,033	2,850	3,024	3,190	3,184
A11	2,506	2,257	2,068	1,917	1,815	1,654	1,471	1,303	1,202	1,069	0,951	0,273	0,242	0,414	0,802
B1	3,437	3,489	3,522	3,541	3,543	3,551	3,565	3,619	3,661	3,661	3,667	3,671	3,661	3,657	3,661
B2	2,643	3,018	3,196	3,254	3,354	3,443	3,493	3,520	3,522	3,524	3,522	3,528	3,518	3,509	3,487
B3	5,081	4,809	4,641	4,550	4,542	4,546	4,536	4,486	4,409	4,237	4,104	3,893	3,673	3,456	3,097
B4	3,934	4,167	4,252	4,283	4,285	4,285	4,285	4,285	4,258	4,179	4,092	3,953	3,820	3,528	3,337
B5	4,173	4,395	4,451	4,484	4,486	4,519	4,548	4,544	4,550	4,542	4,534	4,546	4,550	4,550	4,550
B6	3,387	3,491	3,534	3,551	3,551	3,555	3,557	3,528	3,456	3,196	2,985	2,914	2,759	2,425	2,270
B7	3,742	3,754	3,754	3,756	3,754	3,754	3,754	3,752	3,729	3,740	3,727	3,740	3,758	3,816	3,820
B8	2,991	2,995	3,014	3,024	2,827	3,026	3,159	3,190	3,213	3,223	3,223	3,225	3,225	3,238	3,431
B9	3,499	3,594	3,621	3,642	3,754	3,901	3,955	3,955	3,955	3,964	3,970	3,947	3,839	3,783	3,659
B10	4,229	4,353	4,418	4,418	4,326	4,177	4,022	3,825	3,756	3,789	3,843	3,864	3,835	3,725	3,601
B11	3,499	3,524	3,553	3,555	3,551	3,557	3,532	3,530	3,524	3,522	3,524	3,524	3,518	3,512	3,225
C1	2,807	3,130	3,221	3,383	3,495	3,532	3,586	3,582	3,621	3,613	3,582	3,503	3,408	3,234	3,091
C2	4,656	4,741	4,780	4,809	4,818	4,809	4,778	4,751	4,745	4,739	4,695	4,583	4,364	4,301	4,264
C3	2,238	2,247	2,263	3,354	3,424	3,460	3,493	3,507	3,514	3,520	3,507	3,470	3,358	3,327	3,269
C4	2,562	2,587	2,661	3,026	3,192	3,234	3,277	3,300	3,300	3,296	3,198	3,159	3,084	3,053	2,923
C5	3,532	3,534	3,512	3,512	3,507	3,507	3,501	3,499	3,480	3,371	3,246	2,960	2,860	2,726	2,682
C6	3,522	3,528	3,528	3,522	3,528	3,532	3,541	3,507	3,501	3,439	3,368	3,151	3,014	2,943	2,821
C7	3,441	3,534	3,588	3,621	3,628	3,628	3,628	3,632	3,630	3,630	3,630	3,628	3,628	3,586	3,528
C8	2,539	2,753	2,804	2,842	2,875	2,894	2,910	2,919	2,923	2,921	2,925	2,919	2,916	2,919	2,906
C9	2,437	2,576	2,628	2,649	2,653	2,659	2,678	2,678	2,678	2,666	2,672	2,670	2,670	2,661	2,657
C10	3,445	3,491	3,516	3,530	3,528	3,516	3,516	3,512	3,487	3,416	3,292	3,086	2,904	2,742	2,603
C11	4,494	4,347	4,308	4,231	4,179	4,175	4,165	4,169	4,165	4,163	4,171	4,163	4,160	4,165	4,163
D1	3,190	3,246	3,286	3,449	3,549	3,582	3,603	3,578	3,561	3,478	3,433	3,412	3,335	3,292	3,209
D2	3,667	3,899	4,046	4,113	4,129	4,134	4,127	3,852	3,789	3,688	3,290	3,184	3,151	3,151	3,151
D3	2,910	3,300	3,383	3,489	3,549	3,667	3,903	3,980	4,098	4,175	4,231	4,245	4,245	3,926	3,905
D4	1,444	2,313	2,626	2,958	3,375	3,451	3,584	3,634	3,648	3,648	3,648	3,648	3,648	3,648	3,661
D5	3,501	3,661	3,715	3,773	3,773	3,781	3,781	3,793	3,781	3,781	3,760	3,715	3,644	3,323	3,182
D6	4,523	4,345	4,140	4,084	4,053	4,015	3,939	3,764	3,648	3,594	3,507	3,356	3,319	3,236	3,068
D7	3,541	3,607	3,648	3,655	3,682	3,673	3,688	3,682	3,682	3,673	3,682	3,682	3,688	3,715	3,740
D8	2,695	2,925	3,055	3,109	3,122	3,118	3,122	3,118	3,076	3,010	2,950	2,923	2,919	2,929	2,916
D9	4,724	4,710	4,729	4,743	4,735	4,679	4,590	4,418	4,349	4,248	4,212	4,212	4,119	3,905	3,723
D10	4,424	4,469	4,521	4,536	4,544	4,542	4,523	4,509	4,523	4,521	4,478	4,442	4,256	4,098	3,899
D11	0,124	0,146	0,163	0,184	0,207	0,221	0,242	0,267	0,294	0,314	0,343	0,379	0,416	3,391	3,383

Continuação do Apêndice 4.

Pontos	Profundidade [mm]														
	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
E1	4,411	4,418	4,411	4,391	4,364	4,343	4,328	4,345	4,345	4,318	4,270	4,115	4,046	3,941	3,773
E2	3,474	3,402	3,337	3,248	3,290	3,607	3,735	3,812	4,011	4,129	4,194	4,185	4,144	3,744	3,793
E3	5,730	5,805	5,871	5,682	5,937	5,556	5,604	5,606	5,630	5,672	5,672	5,691	5,280	5,172	4,946
E4	0,611	0,731	0,961	1,376	2,162	3,132	3,493	3,767	4,026	4,250	4,901	5,270	5,330	5,305	5,178
E5	1,979	2,489	2,516	2,802	2,950	3,184	3,416	3,655	3,746	3,922	4,013	4,032	3,930	3,839	3,644
E6	4,051	3,901	3,725	3,516	3,460	3,416	3,360	3,321	3,217	3,209	3,209	3,211	3,211	3,211	3,192
E7	4,569	4,608	4,596	4,596	4,544	4,461	4,304	4,177	3,951	3,748	3,669	3,609	3,611	3,613	3,613
E8	3,549	3,613	3,667	3,746	3,941	3,978	4,011	4,013	4,013	4,061	4,049	4,059	4,011	3,957	3,874
E9	1,896	2,027	2,162	2,373	2,556	2,608	2,620	2,618	2,612	2,570	2,554	2,529	2,481	2,471	2,481
E10	3,147	3,215	3,304	3,466	3,652	3,682	3,735	3,746	3,746	3,746	3,735	3,673	3,613	3,549	3,543
E11	0,000	0,001	0,001	0,001	2,819	2,819	2,825	2,852	2,863	2,867	2,869	2,877	3,663	3,650	3,565
F1	4,741	4,743	4,741	4,733	4,685	4,540	4,409	4,245	3,754	3,335	3,290	3,281	3,217	3,217	3,215
F2	4,268	4,330	4,411	4,459	4,461	4,465	4,457	4,430	4,411	4,409	4,345	4,330	4,304	4,210	4,011
F3	5,038	4,938	4,861	5,052	5,197	5,176	5,052	4,859	4,382	4,163	4,013	3,874	3,744	3,541	3,400
F4	3,381	3,263	3,194	3,064	3,008	2,898	2,734	2,581	2,616	2,608	2,663	2,879	2,952	3,006	3,008
F5	3,528	3,543	3,547	3,565	3,679	3,679	3,679	3,679	3,682	3,682	3,682	3,696	4,316	4,250	4,017
F6	0,750	0,777	0,804	3,283	3,281	3,223	3,211	3,188	3,182	3,188	3,180	3,151	3,147	3,132	3,134
F7	1,977	2,272	2,411	2,811	2,931	2,952	3,080	3,145	3,190	3,298	3,348	3,414	3,470	3,476	3,480
F8	3,414	3,416	3,414	3,414	3,414	3,414	3,414	3,404	3,346	3,275	3,217	3,151	3,132	3,091	3,062
F9	3,113	3,344	3,404	3,453	3,478	3,482	3,547	3,549	3,580	3,582	3,567	3,549	3,549	3,549	3,547
F10	2,680	2,680	2,705	2,825	2,950	2,952	2,972	2,958	2,952	2,908	2,813	2,684	2,620	2,595	2,556
F11	3,823	3,798	3,717	3,619	3,518	3,393	3,331	3,279	3,149	3,016	2,979	2,952	2,952	2,952	2,952
G1	1,393	2,054	3,109	3,346	3,466	3,482	3,493	3,514	3,547	3,650	3,665	3,671	3,675	3,682	3,708
G2	3,518	3,443	3,348	3,312	3,281	3,281	3,213	3,138	3,149	3,151	3,149	3,149	3,147	3,138	3,128
G3	2,081	2,083	2,085	2,087	2,087	3,876	3,785	3,609	3,854	4,013	4,063	4,078	4,038	3,993	3,928
G4	1,847	2,753	2,941	3,155	3,325	3,350	3,410	3,414	3,422	3,480	3,482	3,493	3,482	3,482	3,482
G5	4,343	4,279	4,277	4,279	4,279	4,279	4,277	4,210	4,100	3,798	3,675	3,605	3,482	3,482	3,482
G6	3,147	3,157	3,182	3,186	3,198	3,209	3,217	3,321	3,410	3,437	3,439	3,335	3,283	3,248	3,180
G7	5,064	5,139	5,193	5,195	5,195	5,197	5,197	5,158	5,054	4,921	4,735	4,718	4,735	4,739	4,739
G8	3,565	3,628	3,675	3,738	3,901	4,013	4,198	4,304	4,432	4,461	4,422	4,287	4,225	4,007	3,926
G9	4,424	4,409	4,401	4,279	4,208	4,140	4,131	4,121	4,078	3,968	3,874	3,847	3,744	3,528	3,420
G10	4,254	4,266	4,206	4,057	3,953	3,868	3,742	3,682	3,677	3,659	3,688	3,945	4,061	4,078	4,131
G11	4,121	4,262	4,521	4,799	4,809	4,859	4,859	4,874	4,859	4,886	4,874	4,845	4,859	4,882	4,874
H1	4,078	4,063	4,078	4,024	4,009	3,916	3,748	3,711	3,679	3,679	3,638	3,603	3,476	3,277	3,213
H2	1,807	1,743	1,948	2,218	2,284	2,328	2,348	2,352	2,350	2,348	2,340	2,315	2,286	2,197	2,197
H3	0,916	0,943	0,984	0,994	1,001	1,017	1,028	1,040	1,077	1,152	1,218	1,258	1,274	1,278	1,268
H4	3,391	3,673	3,881	3,955	3,943	3,891	3,934	3,926	3,605	3,526	3,331	3,101	2,873	2,695	2,587
H5	3,273	3,397	3,541	3,673	3,742	3,771	4,003	4,013	4,013	4,013	4,013	4,011	4,003	4,003	4,011
H6	3,742	3,758	3,862	3,874	3,866	3,866	3,868	3,812	3,812	3,798	3,793	3,804	3,746	3,642	3,507
H7	4,737	4,807	4,805	4,774	4,743	4,727	4,648	4,393	4,254	3,974	3,740	3,669	3,746	3,878	4,136
H8	4,476	4,480	4,277	4,022	3,941	3,750	3,279	3,360	3,391	3,360	3,360	3,350	3,391	3,393	3,458
H9	4,457	4,542	4,652	4,675	4,567	4,474	4,179	4,036	3,727	3,607	3,339	3,026	2,626	2,523	2,570
H10	5,060	5,050	5,008	4,988	4,953	4,992	5,006	4,996	4,953	4,940	4,799	4,729	4,641	4,409	4,208
H11	4,011	4,013	4,013	4,013	4,024	4,013	4,011	4,011	3,999	3,947	3,820	3,700	3,528	3,385	3,207
I1	2,071	2,807	3,348	3,437	3,514	3,559	3,597	3,605	3,601	3,601	3,601	3,547	3,468	3,358	3,196
I2	2,937	2,952	2,952	2,952	3,142	3,325	3,482	3,628	3,657	3,667	3,652	3,646	3,613	3,611	3,609
I3	2,618	2,618	2,618	2,605	2,684	2,746	2,751	2,728	2,738	2,744	2,746	2,751	2,751	2,751	2,746
I4	2,344	2,390	2,415	2,419	2,421	2,437	2,489	2,527	2,539	2,541	2,543	2,543	2,539	2,541	2,543
I5	2,937	3,066	3,080	3,124	3,209	3,217	3,238	3,217	3,209	3,188	3,130	2,952	2,935	2,815	2,788
I6	4,169	4,148	4,175	4,202	4,204	4,038	3,916	3,878	3,773	3,528	3,350	3,111	3,024	2,898	2,709
I7	2,807	2,819	2,871	3,060	3,325	3,381	3,482	3,514	3,592	3,613	3,628	3,621	3,613	3,613	3,613
I8	2,817	2,817	2,819	3,335	3,876	4,098	3,632	3,491	3,480	3,451	3,354	3,016	2,357	2,419	2,481
I9	1,809	1,799	1,733	1,608	1,525	1,432	1,639	1,822	1,859	1,815	1,722	1,604	1,554	1,502	1,478
I10	5,736	5,805	5,757	5,535	5,448	5,338	5,338	5,479	5,295	5,052	5,193	5,185	5,058	4,834	4,681
I11	3,947	3,957	3,945	3,943	3,926	3,922	3,912	3,943	3,945	3,945	3,949	3,943	3,872	3,820	3,727

Continuação do Apêndice 4.

Pontos	Profundidade [mm]														
	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
J1	5,195	5,498	5,581	5,473	5,469	5,404	5,340	5,338	5,216	4,710	4,540	4,187	4,034	3,767	3,447
J2	4,109	4,073	4,005	3,901	3,843	3,719	3,679	3,667	3,609	3,538	3,478	3,296	3,151	2,975	2,825
J3	3,344	3,350	3,360	3,350	3,350	3,348	3,360	3,356	3,350	3,348	3,327	3,227	3,211	3,118	2,943
J4	3,547	3,547	3,555	3,547	3,555	3,543	3,551	3,601	3,677	3,748	3,868	3,878	3,878	3,878	3,876
J5	2,473	2,560	2,593	2,614	2,614	2,618	2,628	2,661	2,672	2,672	2,672	2,672	2,622	2,489	2,408
J6	2,939	2,939	2,937	2,927	2,919	2,860	2,836	2,817	2,817	2,796	2,724	2,676	2,605	2,552	2,485
J7	4,940	4,447	4,542	4,544	4,598	4,602	4,600	4,565	4,542	4,407	4,324	4,275	4,264	4,264	4,328
J8	3,694	3,642	3,505	3,296	3,215	3,203	3,186	3,153	3,136	3,122	3,045	3,016	2,972	2,935	2,869
J9	2,145	2,153	2,153	2,328	2,363	2,386	2,415	2,929	2,941	2,948	2,983	3,010	3,026	3,037	3,053
J10	2,914	3,207	3,269	3,310	3,331	3,335	3,335	3,335	3,335	3,331	3,325	3,288	3,267	3,271	3,238
J11	4,689	4,534	4,295	4,208	4,136	3,410	3,344	3,329	3,213	3,107	3,018	2,858	2,684	2,655	2,674
K1	3,605	3,605	3,082	3,078	3,149	3,261	3,482	3,650	3,679	3,769	3,872	3,891	3,949	3,903	3,849
K2	4,231	4,260	4,301	4,351	4,389	4,405	4,409	4,447	4,275	4,270	4,252	4,219	4,204	4,200	4,194
K3	4,136	4,507	4,797	4,841	4,882	4,863	4,874	4,890	4,909	4,919	4,890	4,890	4,880	4,917	4,940
K4	3,196	3,203	3,209	3,215	3,215	3,215	3,217	3,223	3,259	3,259	3,217	3,215	3,209	3,153	3,136
K5	0,632	1,094	1,886	2,630	2,815	3,323	4,382	4,830	4,936	4,940	4,940	4,936	4,832	4,569	4,459
K6	0,882	4,160	4,194	4,210	4,210	4,210	4,204	4,210	4,210	4,198	4,136	4,073	3,951	3,881	3,738
K7	0,545	0,536	0,486	0,478	0,480	0,497	0,547	0,503	0,482	0,464	0,443	0,406	0,383	0,435	0,559
K8	0,530	0,605	0,636	0,677	0,690	0,712	0,729	0,741	0,752	0,758	0,773	0,783	0,812	0,901	1,121
K9	2,875	2,950	2,993	2,997	3,128	3,478	3,876	4,011	4,024	4,069	4,071	4,065	4,013	4,011	4,011
K10	4,807	4,809	4,820	4,820	4,841	4,865	4,855	4,855	4,874	4,890	4,892	4,880	4,880	4,894	4,907
K11	4,239	4,252	4,248	4,214	4,181	4,011	3,889	3,800	3,621	3,420	3,356	3,250	3,095	2,908	2,817

**Apêndice 5 – Resistência mecânica à penetração (MPa) obtida nos 121 pontos amostrados relativos à camada de 300mm a 500mm de profundidade**

Pontos	Profundidade [mm]																			
	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500
A1	4,706	4,573	4,415	4,233	4,051	3,777	3,642	3,572	3,559	3,541	3,524	3,507	3,362	3,288	3,259	3,250	3,244	3,240	3,232	3,225
A2	3,397	3,389	3,422	3,424	3,424	3,424	3,447	3,458	3,468	3,482	3,489	3,489	3,489	3,489	3,474	3,458	3,449	3,447	3,480	2,931
A3	3,922	3,760	3,588	3,341	3,078	3,018	2,894	2,699	2,595	2,578	2,562	2,531	2,469	2,404	2,276	2,193	2,131	2,102	2,102	2,129
A4	4,075	4,042	4,019	3,908	3,885	3,789	3,626	3,528	3,383	3,356	3,292	3,279	3,244	3,157	3,060	2,894	2,883	2,894	2,898	2,914
A5	1,131	1,135	1,140	1,142	1,144	1,144	1,142	1,144	1,133	1,133	1,148	1,345	1,496	1,565	1,598	1,672	1,733	1,789	2,029	2,684
A6	3,522	3,516	3,509	3,495	3,489	3,462	3,424	3,408	3,344	3,256	3,196	3,126	3,093	3,089	3,074	3,014	2,775	2,661	2,614	2,388
A7	3,157	2,910	2,887	2,883	2,892	2,892	2,937	2,991	3,004	3,024	3,026	3,062	3,057	3,041	3,037	3,024	3,016	2,993	2,991	2,991
A8	3,555	3,567	3,543	3,524	3,468	3,377	3,244	3,157	3,124	3,120	3,095	3,068	3,053	3,030	3,024	2,993	2,908	2,755	2,661	2,634
A9	3,089	3,014	2,912	2,790	2,699	2,471	2,319	2,228	2,197	2,205	2,216	2,216	2,205	2,222	2,230	2,230	2,226	2,224	2,228	2,533
A10	3,358	3,509	3,557	3,503	3,489	3,414	3,103	2,960	3,039	3,124	3,259	3,420	3,576	3,781	3,889	3,953	4,071	4,152	4,154	4,154
A11	1,388	1,629	1,697	1,693	1,672	1,625	1,583	1,548	1,571	1,627	1,639	1,660	1,664	1,668	1,672	1,679	1,689	1,691	1,672	1,668
B1	3,621	3,584	3,559	3,348	3,254	3,225	3,225	3,223	3,176	3,064	2,958	2,943	2,931	2,931	2,925	2,937	2,925	2,931	2,927	2,931
B2	3,439	3,381	3,283	3,219	3,157	3,126	3,014	2,871	2,761	2,695	2,690	2,688	2,684	2,688	2,688	2,678	2,626	2,556	2,427	2,396
B3	2,966	2,796	2,498	2,336	2,126	2,110	2,089	2,079	2,112	2,243	2,433	2,549	2,626	2,659	2,688	2,693	2,690	2,690	2,690	2,682
B4	3,122	2,991	2,958	2,877	2,798	2,759	2,757	2,680	2,626	2,595	2,599	2,591	2,500	2,460	2,363	2,336	2,330	2,330	2,328	2,328
B5	4,548	4,540	4,550	4,548	4,550	4,550	4,552	4,552	4,550	4,550	4,548	4,523	4,540	4,530	4,542	4,511	4,490	4,484	4,451	4,357
B6	2,172	2,153	2,149	2,129	2,124	2,110	2,083	2,083	2,095	2,097	2,097	2,095	2,071	2,062	2,062	2,062	2,064	2,062	2,029	1,983
B7	3,820	3,789	3,789	3,820	3,820	3,827	3,820	3,823	3,796	3,764	3,661	3,491	3,422	3,292	3,151	3,126	3,120	3,118	3,111	3,109
B8	3,493	3,524	3,555	3,555	3,555	3,557	3,524	3,431	3,387	3,360	3,364	3,294	3,159	3,089	3,064	3,064	3,060	3,064	2,863	2,730
B9	3,530	3,383	3,140	3,041	2,931	2,825	2,680	2,574	2,450	2,282	2,203	2,195	2,162	2,122	2,068	2,037	1,932	1,876	1,832	1,795
B10	3,536	3,400	3,201	2,964	2,610	2,421	2,313	2,263	2,234	2,297	2,363	2,311	2,178	2,081	1,884	1,896	1,865	1,687	1,784	1,297
B11	2,991	2,572	2,460	2,427	2,427	2,429	2,425	2,396	2,396	2,394	2,394	2,402	2,421	2,427	2,413	2,394	2,392	2,388	2,377	2,379
C1	2,968	2,931	2,914	2,896	2,873	2,825	2,742	2,732	2,726	2,719	2,697	2,661	2,649	2,628	2,624	2,601	2,593	2,587	2,564	2,562
C2	4,254	4,187	4,140	4,009	3,872	3,756	3,532	3,410	3,302	3,076	2,993	2,883	2,715	2,566	2,433	2,429	2,435	2,460	2,460	2,454
C3	3,176	3,076	2,968	2,875	2,771	2,672	2,578	2,452	2,375	2,317	2,292	2,232	2,189	2,189	2,193	2,205	2,230	2,234	2,232	2,232
C4	2,819	2,813	2,823	2,798	2,802	2,794	2,798	2,798	2,796	2,796	2,794	2,798	2,809	2,817	2,827	2,827	2,823	2,825	2,825	2,827
C5	2,657	2,632	2,595	2,539	2,367	2,205	2,162	2,147	2,145	2,135	2,120	2,073	2,044	2,048	2,048	2,050	2,048	2,035	2,041	2,041
C6	2,778	2,765	2,755	2,763	2,736	2,686	2,620	2,576	2,570	2,570	2,568	2,572	2,578	2,578	2,566	2,574	2,568	2,576	2,566	2,566
C7	3,426	3,296	3,176	2,910	2,759	2,653	2,506	2,462	2,427	2,398	2,317	2,280	2,255	2,247	2,218	2,075	1,865	1,803	1,786	1,849
C8	2,898	2,765	2,738	2,719	2,715	2,703	2,634	2,616	2,601	2,603	2,589	2,570	2,562	2,543	2,491	2,437	2,267	2,236	2,232	2,238
C9	2,651	2,645	2,651	2,639	2,645	2,645	2,539	2,390	2,292	2,222	2,139	2,122	2,112	2,108	2,100	2,095	2,097	2,102	2,097	2,097
C10	2,404	2,255	2,180	2,162	2,143	2,135	2,122	2,120	2,122	2,214	2,253	2,263	2,274	2,284	2,284	2,294	2,305	2,311	2,313	2,307
C11	4,204	4,245	4,262	4,268	4,279	4,245	4,237	4,241	4,131	4,046	3,905	3,777	3,711	3,634	3,582	3,578	3,572	3,555	3,565	3,557
D1	3,084	2,975	2,809	2,751	2,637	2,583	2,533	2,473	2,450	2,400	2,317	2,214	2,102	1,986	1,842	1,757	1,733	1,724	1,724	1,766
D2	3,178	3,184	3,086	3,064	2,943	2,811	2,645	2,361	2,255	2,238	2,209	2,147	2,120	2,056	2,039	2,033	2,008	1,990	1,973	1,923
D3	3,793	3,744	3,715	3,590	3,572	3,474	3,439	3,402	3,383	3,383	3,383	3,379	3,308	3,151	3,074	2,925	2,771	2,645	2,456	2,355
D4	3,682	3,721	3,872	3,914	3,914	3,905	3,839	3,831	3,733	3,346	3,130	2,989	2,948	2,943	2,919	2,919	2,919	2,919	2,919	2,937
D5	3,035	2,858	2,786	2,744	2,719	2,719	2,711	2,711	2,719	2,719	2,715	2,711	2,686	2,686	2,686	2,686	2,678	2,678	2,653	2,620
D6	3,053	3,105	3,037	2,898	2,848	2,730	2,558	2,413	2,253	2,180	2,137	2,122	2,124	2,122	2,122	2,191	2,214	2,214	2,005	2,187
D7	3,715	3,715	3,715	3,688	3,667	3,667	3,661	3,648	3,648	3,650	3,646	3,646	3,648	3,648	3,638	3,594	3,582	3,588	3,582	3,582
D8	2,912	2,885	2,885	2,885	2,885	2,883	2,877	2,865	2,852	2,848	2,852	2,858	2,858	2,846	2,854	2,819	2,817	2,790	2,757	2,713
D9	3,528	3,346	3,145	2,970	2,871	2,724	2,778	2,786	2,819	2,819	2,819	2,796	2,790	2,784	2,753	2,753	2,672	2,545	2,352	2,234
D10	3,708	3,491	3,312	3,178	2,927	2,790	2,655	2,620	2,552	2,543	2,537	2,520	2,520	2,520	2,520	2,483	2,460	2,421	2,417	2,346
D11	3,385	3,354	3,341	3,321	3,281	3,201	3,171	3,182	3,151	3,174	3,167	3,151	3,186	3,182	3,186	3,165	3,151	3,120	3,060	2,977

Continuação do Apêndice 5.

Pontos	Profundidade [mm]																			
	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500
E1	3,474	3,362	3,223	3,091	2,972	2,792	2,639	2,475	2,379	2,321	2,255	2,153	2,081	2,056	2,064	2,062	2,058	2,056	2,058	2,056
E2	3,783	3,682	3,520	3,321	2,970	2,790	2,738	2,709	2,732	2,732	2,734	2,709	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,666	2,543	2,442
E3	4,596	4,200	4,078	3,825	3,789	3,812	3,812	3,791	3,777	3,748	3,804	3,779	3,806	3,773	3,796	3,748	3,725	3,607	3,572	
E4	5,112	4,967	4,695	4,517	4,262	4,210	4,051	3,785	3,679	3,638	3,474	3,431	3,302	3,070	2,991	2,889	2,865	2,809	2,751	2,686
E5	3,551	3,503	3,375	3,169	2,902	2,817	2,684	2,562	2,485	2,485	2,485	2,508	2,516	2,502	2,491	2,512	2,518	2,525	2,493	2,487
E6	3,062	3,026	2,952	2,819	2,815	2,858	2,865	2,869	2,865	2,819	2,819	2,817	2,817	2,813	2,811	2,807	2,796	2,788	2,771	2,753
E7	3,609	3,507	3,395	3,281	3,140	3,010	2,827	2,684	2,641	2,620	2,618	2,618	2,618	2,682	2,753	2,798	2,804	2,802	2,794	2,757
E8	3,812	3,748	3,686	3,605	3,433	3,211	3,089	3,080	3,080	3,078	3,078	3,072	3,070	3,060	3,051	3,018	3,014	3,012	2,952	2,948
E9	2,487	2,529	2,539	2,539	2,541	2,547	2,547	2,547	2,547	2,547	2,547	2,545	2,547	2,545	2,537	2,537	2,539	2,533	2,535	2,539
E10	3,528	3,480	3,468	3,414	3,410	3,410	3,410	3,387	3,391	3,350	3,240	3,215	3,095	2,975	2,869	2,809	2,744	2,670	2,549	2,525
E11	3,472	3,300	3,151	3,024	2,921	2,869	2,834	2,819	2,819	2,759	2,653	2,547	2,483	2,408	2,284	2,153	2,089	2,015	1,952	1,886
F1	3,124	3,022	2,943	2,749	2,545	2,408	2,272	2,004	1,898	1,851	1,820	1,818	1,811	1,753	1,645	1,529	1,484	1,478	1,523	1,614
F2	3,916	3,758	3,592	3,418	3,124	2,858	2,819	2,800	2,804	2,796	2,784	2,782	2,798	2,792	2,792	2,800	2,811	2,817	2,819	2,819
F3	3,300	3,159	3,049	2,856	2,759	2,591	2,479	2,417	2,413	2,406	2,415	2,419	2,415	2,404	2,388	2,394	2,415	2,421	2,421	2,421
F4	2,952	2,950	2,881	2,755	2,684	2,568	2,531	2,415	2,404	2,402	2,394	2,392	2,373	2,396	2,398	2,398	2,377	2,355	2,352	2,352
F5	3,916	3,694	3,613	3,437	3,225	2,879	2,641	2,599	2,581	2,502	2,429	2,344	2,278	2,255	2,255	2,253	2,249	2,245	2,243	2,245
F6	3,118	2,983	2,842	2,809	2,751	2,670	2,603	2,543	2,523	2,485	2,413	2,390	2,348	2,340	2,344	2,338	2,330	2,292	2,280	2,270
F7	3,480	3,480	3,482	3,482	3,482	3,482	3,480	3,482	3,597	3,603	3,594	3,590	3,574	3,570	3,549	3,549	3,549	3,549	3,547	2,850
F8	3,039	2,912	2,775	2,684	2,610	2,485	2,462	2,460	2,454	2,448	2,431	2,421	2,421	2,421	2,421	2,421	2,419	2,388	2,348	2,286
F9	3,493	3,447	3,294	2,896	2,811	2,649	2,386	1,983	1,888	1,880	1,890	1,934	1,948	2,012	2,085	2,133	2,149	2,149	2,147	2,145
F10	2,549	2,541	2,547	2,537	2,537	2,523	2,523	2,491	2,419	2,352	2,245	2,220	2,220	2,218	2,212	2,207	2,193	2,156	2,156	2,097
F11	2,952	2,952	2,952	2,952	2,952	2,950	2,950	2,937	2,921	2,883	2,881	2,879	2,877	2,863	2,817	2,763	2,746	2,722	2,686	2,707
G1	3,688	3,679	3,679	3,493	3,482	3,482	3,482	3,480	3,449	3,383	3,269	3,134	3,084	3,078	3,001	2,906	2,846	2,817	2,811	2,786
G2	3,132	3,142	3,142	3,145	3,138	3,132	3,132	3,124	3,122	3,024	2,952	2,854	2,672	2,612	2,618	2,626	2,637	2,632	2,643	2,620
G3	3,785	3,748	3,638	3,493	3,385	3,288	3,167	2,972	2,856	2,757	2,746	2,728	2,734	2,724	2,701	2,686	2,686	2,686	2,684	2,684
G4	3,482	3,482	3,482	3,482	3,482	3,482	3,482	3,242	3,142	2,873	2,825	2,744	2,719	2,612	2,089	2,075	2,064	2,056	2,058	2,056
G5	3,482	3,480	3,470	3,449	3,414	3,414	3,418	3,414	3,406	3,323	3,213	2,948	2,695	2,481	2,421	2,419	2,419	2,411	2,301	2,272
G6	3,089	2,732	2,686	2,686	2,686	2,686	2,686	2,751	2,751	2,751	2,749	2,728	2,738	2,726	2,686	2,684	2,670	2,622	2,541	2,479
G7	4,735	4,739	4,739	4,735	4,341	4,082	4,061	4,013	4,013	4,011	3,957	3,024	3,012	3,012	2,993	2,995	2,972	2,962	2,952	2,952
G8	3,762	3,335	3,217	3,215	3,215	3,215	3,215	3,215	3,213	3,211	3,211	3,203	3,201	3,171	3,093	3,076	3,012	2,908	2,883	2,883
G9	3,329	3,153	2,987	2,850	2,815	2,682	2,608	2,585	2,549	2,477	2,417	2,369	2,346	2,338	2,280	2,236	2,224	2,207	2,162	2,156
G10	4,063	4,071	4,013	4,013	4,007	3,945	3,881	3,856	3,746	3,675	3,410	3,234	3,138	3,045	2,945	2,871	2,697	2,641	2,408	2,216
G11	4,621	4,724	4,714	4,731	4,714	4,712	4,675	4,652	4,498	4,030	3,406	3,348	3,333	3,315	3,281	3,281	3,275	3,263	3,217	3,227
H1	3,097	2,929	2,744	2,605	2,340	2,156	2,112	2,087	2,050	2,006	1,975	1,936	1,869	1,778	1,724	1,679	1,625	1,623	1,623	1,619
H2	2,207	2,207	2,203	2,205	2,197	2,178	2,156	2,156	2,153	2,153	2,156	2,156	2,153	2,153	2,153	2,151	2,149	2,147	2,143	2,139
H3	1,225	1,225	1,218	1,206	1,191	1,150	1,096	1,034	1,001	0,949	0,926	0,905	0,903	0,945	1,339	1,784	2,039	2,286	2,647	2,765
H4	2,419	2,419	2,328	2,255	2,263	2,276	2,272	2,257	2,255	2,230	2,216	2,216	2,274	2,286	2,297	2,317	2,315	2,286	2,284	2,282
H5	4,011	3,993	3,874	3,746	3,655	3,373	3,207	3,080	3,016	2,983	2,962	2,962	2,952	2,952	2,952	2,952	2,952	2,952	2,950	2,945
H6	3,410	3,317	3,174	3,074	3,012	2,950	2,937	2,939	2,950	2,950	2,952	2,952	2,952	2,952	2,952	2,948	2,871	2,804	2,796	2,684
H7	4,382	4,530	4,542	4,538	4,314	4,277	4,241	4,198	3,964	3,874	3,659	3,368	3,157	2,827	2,616	2,543	2,489	2,421	2,549	2,746
H8	3,482	3,482	3,482	3,397	3,196	3,020	2,821	2,489	2,350	2,288	2,278	2,265	2,212	2,147	2,141	2,141	2,143	2,153	2,153	2,153
H9	2,674	2,686	2,728	2,744	2,751	2,871	3,006	3,072	3,078	3,076	3,070	2,945	2,875	2,790	2,728	2,684	2,560	2,404	2,278	2,015
H10	4,136	3,984	3,878	3,860	3,812	3,773	3,601	3,516	3,410	3,335	3,211	3,136	2,952	2,871	2,732	2,560	2,413	2,288	2,286	2,286
H11	3,033	2,707	2,417	2,363	2,350	2,342	2,284	2,230	2,156	2,137	2,141	2,141	2,141	2,153	2,207	2,253	2,282	2,255	2,077	1,903

Continuação do Apêndice 5.

Pontos	Profundidade [mm]																			
	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500
I1	2,993	2,952	3,012	3,016	3,016	3,016	3,016	2,983	2,952	2,937	2,867	2,819	2,751	2,612	2,539	2,487	2,481	2,357	2,276	2,220
I2	3,601	3,578	3,545	3,541	3,536	3,482	3,478	3,381	3,217	3,149	3,074	2,950	2,916	2,877	2,840	2,819	2,819	2,817	2,819	2,819
I3	2,744	2,742	2,728	2,738	2,740	2,728	2,707	2,728	2,709	2,686	2,682	2,653	2,610	2,608	2,556	2,485	2,413	2,365	2,311	2,247
I4	2,545	2,547	2,543	2,543	2,545	2,547	2,545	2,545	2,541	2,541	2,539	2,535	2,498	2,506	2,523	2,523	2,523	2,506	2,512	2,510
I5	2,678	2,599	2,512	2,419	2,390	2,361	2,346	2,340	2,282	2,193	2,141	2,044	2,006	1,944	1,888	1,886	1,888	1,888	1,886	1,880
I6	2,506	2,408	2,369	2,286	2,267	2,209	2,162	2,153	2,156	2,135	2,071	2,027	2,017	2,019	2,019	1,994	1,952	1,890	1,859	1,867
I7	3,613	3,613	3,611	3,609	3,613	3,671	3,781	3,866	3,874	3,878	3,878	3,874	3,866	3,866	3,874	3,878	3,876	3,868	3,858	3,847
I8	2,510	2,539	2,539	2,525	2,496	2,481	2,471	2,421	2,413	2,382	2,311	2,228	2,120	1,959	1,815	1,751	1,691	1,544	1,471	1,426
I9	1,428	1,393	1,351	1,334	1,357	1,876	2,419	2,539	2,649	2,773	2,873	2,929	2,943	2,945	2,941	2,937	2,939	2,937	2,945	3,039
I10	4,403	4,189	4,078	3,974	3,835	3,744	3,688	3,669	3,594	3,458	3,221	3,006	2,825	2,655	2,286	2,201	2,156	2,153	2,153	2,153
I11	3,686	3,590	3,470	3,275	3,167	3,074	3,014	3,006	3,008	2,852	2,707	2,554	2,473	2,421	2,421	2,444	2,477	2,477	2,259	2,205
J1	2,972	2,746	2,684	2,628	2,562	2,462	2,419	2,400	2,390	2,346	2,338	2,321	2,315	2,286	2,236	2,207	2,156	2,137	2,089	2,075
J2	2,695	2,624	2,512	2,435	2,421	2,411	2,406	2,402	2,382	2,365	2,352	2,344	2,340	2,340	2,340	2,340	2,340	2,323	2,286	2,270
J3	2,912	2,811	2,695	2,578	2,504	2,413	2,363	2,330	2,274	2,255	2,243	2,224	2,222	2,220	2,216	2,197	2,156	2,071	2,037	1,967
J4	3,870	3,849	3,796	3,738	3,576	3,404	3,227	2,997	2,941	2,919	2,873	2,817	2,800	2,751	2,676	2,616	2,525	2,481	2,421	2,408
J5	2,243	2,156	2,145	2,104	2,077	2,023	1,959	1,952	1,950	1,942	1,927	1,925	1,898	1,890	1,890	1,888	1,878	1,876	1,886	1,884
J6	2,485	2,485	2,485	2,485	2,489	2,467	2,437	2,056	1,996	1,932	1,894	1,849	1,697	1,755	1,876	1,884	1,886	1,880	1,888	1,888
J7	4,664	4,735	4,749	4,741	4,722	4,693	4,206	4,202	4,339	4,474	4,121	4,200	4,314	4,357	4,397	4,399	4,401	4,397	4,389	4,386
J8	2,819	2,809	2,804	2,763	2,751	2,738	2,738	2,686	2,676	2,622	2,595	2,585	2,572	2,570	2,556	2,539	2,523	2,508	2,485	2,421
J9	2,883	2,875	2,871	2,867	2,831	2,819	2,819	2,819	2,842	2,871	2,871	2,871	2,871	2,871	2,871	2,871	2,860	2,856	2,825	2,819
J10	3,217	3,215	3,203	3,190	3,171	3,171	3,190	3,190	3,196	3,178	3,136	3,122	3,089	3,070	3,062	3,010	2,962	2,958	2,962	2,972
J11	2,672	2,674	2,647	2,608	2,523	2,419	2,419	2,417	2,415	2,419	2,417	2,419	2,508	2,523	2,514	2,479	2,415	2,357	2,257	2,218
K1	3,659	3,545	3,292	3,207	3,153	3,006	2,931	2,786	2,616	2,506	2,334	2,282	2,274	2,284	2,282	2,276	2,199	2,162	2,153	2,116
K2	4,183	2,659	2,641	2,645	2,618	2,614	2,608	2,605	2,589	2,570	2,543	2,539	2,523	2,523	2,527	2,518	2,506	2,489	2,489	2,491
K3	4,940	4,938	4,928	4,911	4,874	4,874	4,878	4,870	4,809	4,803	4,733	4,617	4,405	4,129	3,872	3,582	3,286	3,045	2,386	2,288
K4	3,134	3,132	3,136	3,138	3,120	3,091	3,078	3,066	3,045	3,016	3,020	3,012	3,010	3,004	2,983	2,958	2,952	2,948	2,879	2,819
K5	4,287	3,391	3,478	3,601	3,601	3,605	3,603	3,601	3,601	3,590	3,526	3,344	3,203	3,078	3,070	3,074	3,082	3,120	3,120	3,120
K6	3,524	3,339	3,028	2,908	2,813	2,751	2,742	2,713	2,686	2,686	2,684	2,684	2,657	2,616	2,545	2,514	2,467	2,421	2,286	2,249
K7	0,826	0,885	0,918	0,930	0,926	0,926	0,893	0,920	0,976	1,040	1,200	1,227	1,585	2,081	2,394	2,796	3,858	4,538	5,944	6,124
K8	1,664	2,195	2,462	2,539	2,574	2,605	2,605	2,605	2,601	2,595	2,589	2,589	2,570	2,552	2,552	2,556	2,570	2,589	2,618	2,672
K9	4,011	4,007	3,999	3,874	3,706	3,505	3,460	3,321	3,076	2,873	2,647	2,456	2,164	2,087	2,075	2,075	2,116	2,151	2,153	2,153
K10	4,907	4,888	2,541	2,487	2,400	2,116	2,017	2,021	2,075	2,153	2,270	2,294	2,336	2,346	2,355	2,390	2,390	2,390	2,390	2,390
K11	2,811	2,817	2,819	2,819	2,819	2,817	2,798	2,751	2,684	2,628	2,531	2,419	2,419	2,413	2,379	2,332	2,294	2,261	2,201	2,156

**Apêndice 6 – Resistência mecânica média à penetração (MPa), obtida nos 121 pontos amostrados, para as camadas de 0 a 150mm, 150mm a 300mm e 300mm a 500mm**

Pontos	Camadas [mm]			Pontos	Camadas [mm]			Pontos	Camadas [mm]		
	0 a 150	150 a 300	300 a 500		0 a 150	150 a 300	300 a 500		0 a 150	150 a 300	300 a 500
A1	0,898	4,069	3,660	D9	1,415	4,406	2,814	H6	1,318	3,783	2,979
A2	1,436	3,830	3,427	D10	1,815	4,419	2,726	H7	1,794	4,335	3,562
A3	2,989	4,704	2,719	D11	0,037	0,672	3,195	H8	2,869	3,686	2,590
A4	1,999	4,321	3,406	E1	1,364	4,255	2,481	H9	2,957	3,800	2,752
A5	0,313	1,125	1,422	E2	1,332	3,740	2,875	H10	2,153	4,849	3,202
A6	0,545	2,411	3,173	E3	1,678	5,590	3,843	H11	1,332	3,846	2,279
A7	2,798	4,761	2,991	E4	0,463	3,366	3,659	I1	0,885	3,354	2,765
A8	1,819	3,703	3,145	E5	0,621	3,341	2,729	I2	0,939	3,388	3,163
A9	1,591	3,183	2,423	E6	2,427	3,414	2,847	I3	1,642	2,706	2,609
A10	0,837	3,591	3,573	E7	1,180	4,111	2,898	I4	0,678	2,482	2,531
A11	2,865	1,330	1,637	E8	1,303	3,903	3,205	I5	1,255	3,074	2,179
B1	1,135	3,594	3,131	E9	0,830	2,437	2,539	I6	2,475	3,675	2,118
B2	1,461	3,369	2,853	E10	1,482	3,570	3,147	I7	0,997	3,370	3,791
B3	3,632	4,271	2,488	E11	0,001	2,245	2,622	I8	1,270	3,163	2,155
B4	1,028	4,063	2,616	F1	2,510	4,010	2,065	I9	0,757	1,660	2,427
B5	1,106	4,495	4,523	F2	1,598	4,353	2,995	I10	1,662	5,316	3,172
B6	2,443	3,211	2,089	F3	2,386	4,486	2,577	I11	1,966	3,913	2,829
B7	2,297	3,757	3,533	F4	2,129	2,924	2,516	J1	0,771	4,880	2,388
B8	1,586	3,134	3,285	F5	2,057	3,748	2,694	J2	1,685	3,591	2,396
B9	1,057	3,803	2,453	F6	0,427	2,709	2,534	J3	1,249	3,289	2,334
B10	1,410	4,012	2,329	F7	0,319	3,017	3,499	J4	1,549	3,683	3,034
B11	1,680	3,510	2,445	F8	1,296	3,305	2,515	J5	1,470	2,598	1,975
C1	1,751	3,386	2,725	F9	1,142	3,486	2,366	J6	1,780	2,789	2,091
C2	1,282	4,656	3,168	F10	1,767	2,790	2,347	J7	2,275	4,483	4,444
C3	1,198	3,197	2,474	F11	2,298	3,295	2,867	J8	1,783	3,199	2,638
C4	1,233	3,057	2,810	G1	0,562	3,297	3,251	J9	1,336	2,658	2,854
C5	1,782	3,295	2,207	G2	1,837	3,236	2,905	J10	1,628	3,273	3,113
C6	2,056	3,363	2,627	G3	0,721	3,311	3,007	J11	2,018	3,477	2,466
C7	1,405	3,597	2,435	G4	0,315	3,235	2,846	K1	2,553	3,588	2,653
C8	0,773	2,864	2,558	G5	2,356	3,990	2,993	K2	1,753	4,294	2,644
C9	0,728	2,642	2,319	G6	1,999	3,263	2,706	K3	0,513	4,809	4,258
C10	1,225	3,306	2,237	G7	1,377	4,999	3,715	K4	0,963	3,209	3,027
C11	2,432	4,215	3,930	G8	0,960	4,052	3,173	K5	0,243	3,680	3,405
D1	2,069	3,414	2,293	G9	2,336	4,038	2,539	K6	0,440	3,898	2,716
D2	1,164	3,691	2,413	G10	1,692	3,951	3,394	K7	0,312	0,483	2,049
D3	0,767	3,800	3,247	G11	1,324	4,746	3,951	K8	0,108	0,748	2,515
D4	0,488	3,262	3,365	H1	2,184	3,746	2,079	K9	1,197	3,638	2,895
D5	1,487	3,664	2,726	H2	0,791	2,204	2,166	K10	3,147	4,859	2,558
D6	3,777	3,773	2,426	H3	0,326	1,097	1,392	K11	2,194	3,687	2,558
D7	1,083	3,669	3,646	H4	1,665	3,487	2,287				
D8	0,995	2,999	2,847	H5	0,554	3,832	3,223				

**Apêndice 7 – Probabilidade de se encontrar RP igual ou superior do que RPc (%)**

RPc	Camadas [mm]		
	0 a 150	150 a 300	300 a 500
0.5	89.8	100.0	100.0
1.0	72.9	99.8	99.9
1.5	48.4	98.8	99.0
2.0	24.2	95.5	92.5
2.5	8.9	86.9	70.9
3.0	2.2	71.2	36.7
3.5	0.4	50.0	10.9
4.0	0.0	28.8	1.7
4.5	0.0	12.9	0.1
5.0	0.0	4.6	0.0
5.5	0.0	1.2	0.0
6.0	0.0	0.3	0.0
6.5	0.0	0.0	0.0
7.0	0.0	0.0	0.0

**Apêndice 8 - Porcentagem de valores encontrados de RP igual ou superior do que RPc (%)**

RPc	Camadas [mm]		
	0 a 150	150 a 300	300 a 500
0.5	89.3	99.2	100.0
1.0	71.1	97.5	100.0
1.5	43.8	95.0	98.3
2.0	23.1	94.2	96.7
2.5	8.3	90.1	70.2
3.0	2.5	81.8	32.2
3.5	1.7	52.9	11.6
4.0	0.0	24.8	2.5
4.5	0.0	9.1	0.8
5.0	0.0	1.7	0.0
5.5	0.0	0.8	0.0
6.0	0.0	0.0	0.0
6.5	0.0	0.0	0.0
7.0	0.0	0.0	0.0

**Apêndice 9 - Volume de solo a ser mobilizado em função da RPc (m<sup>3</sup>) – método probabilístico**

RPc	Camadas [mm]		
	0 a 150	150 a 300	300 a 500
0.5	1630	3629	6050
1.0	1323	3621	6046
1.5	878	3586	5992
2.0	439	3465	5597
2.5	161	3153	4288
3.0	40	2586	2220
3.5	7	1815	661
4.0	1	1044	103
4.5	0	469	8
5.0	0	165	0
5.5	0	44	0
6.0	0	9	0
6.5	0	1	0
7.0	0	0	0

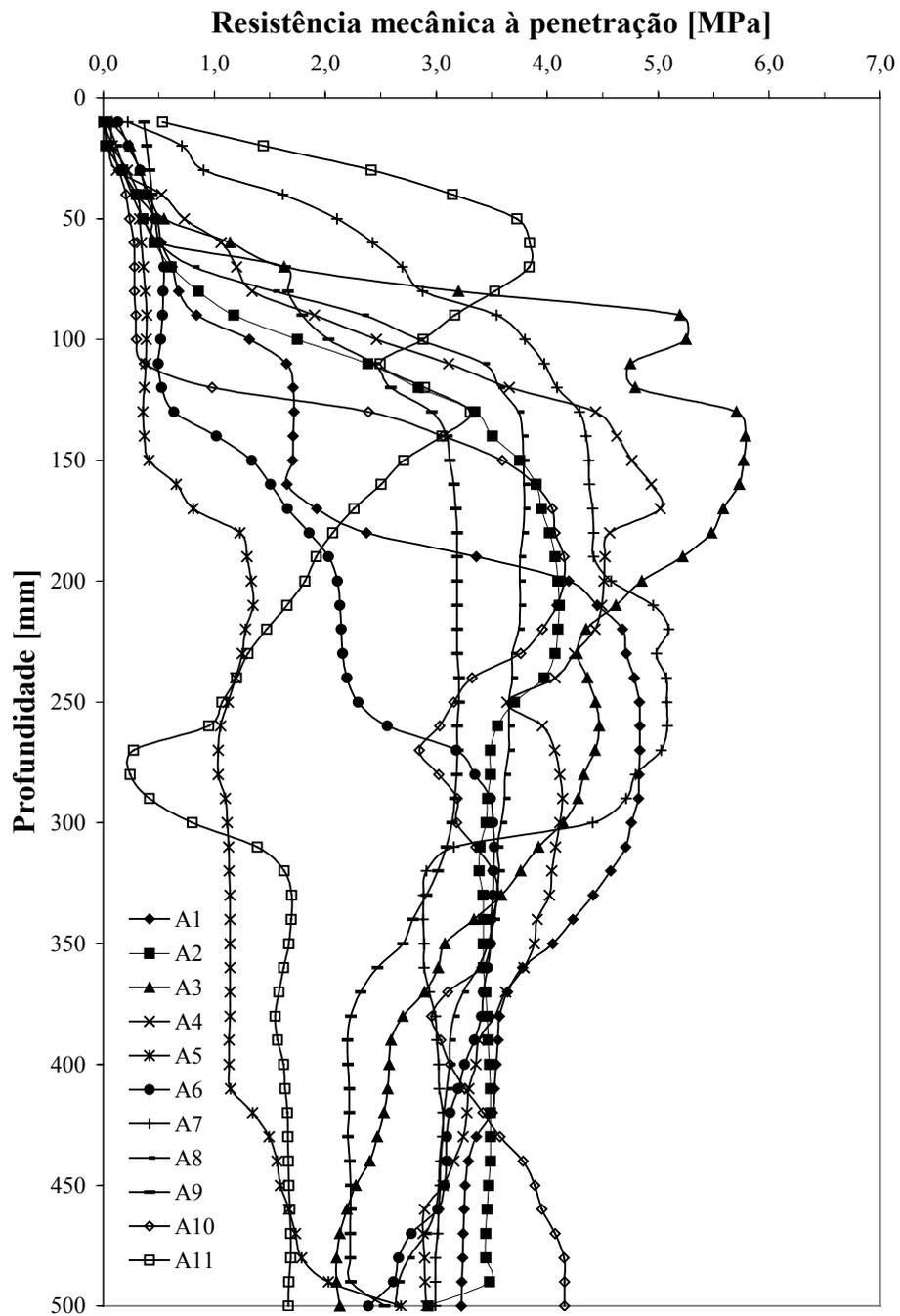
**Apêndice 10 - Volume de solo a ser mobilizado em função da RPc (m<sup>3</sup>) – método determinístico**

RPc	Camadas [mm]		
	0 a 150	150 a 300	300 a 500
0.5	1620	3600	6050
1.0	1290	3540	6050
1.5	795	3450	5950
2.0	420	3420	5850
2.5	150	3270	4250
3.0	45	2970	1950
3.5	30	1920	700
4.0	0	900	150
4.5	0	330	0
5.0	0	60	0
5.5	0	30	0
6.0	0	0	0
6.5	0	0	0
7.0	0	0	0

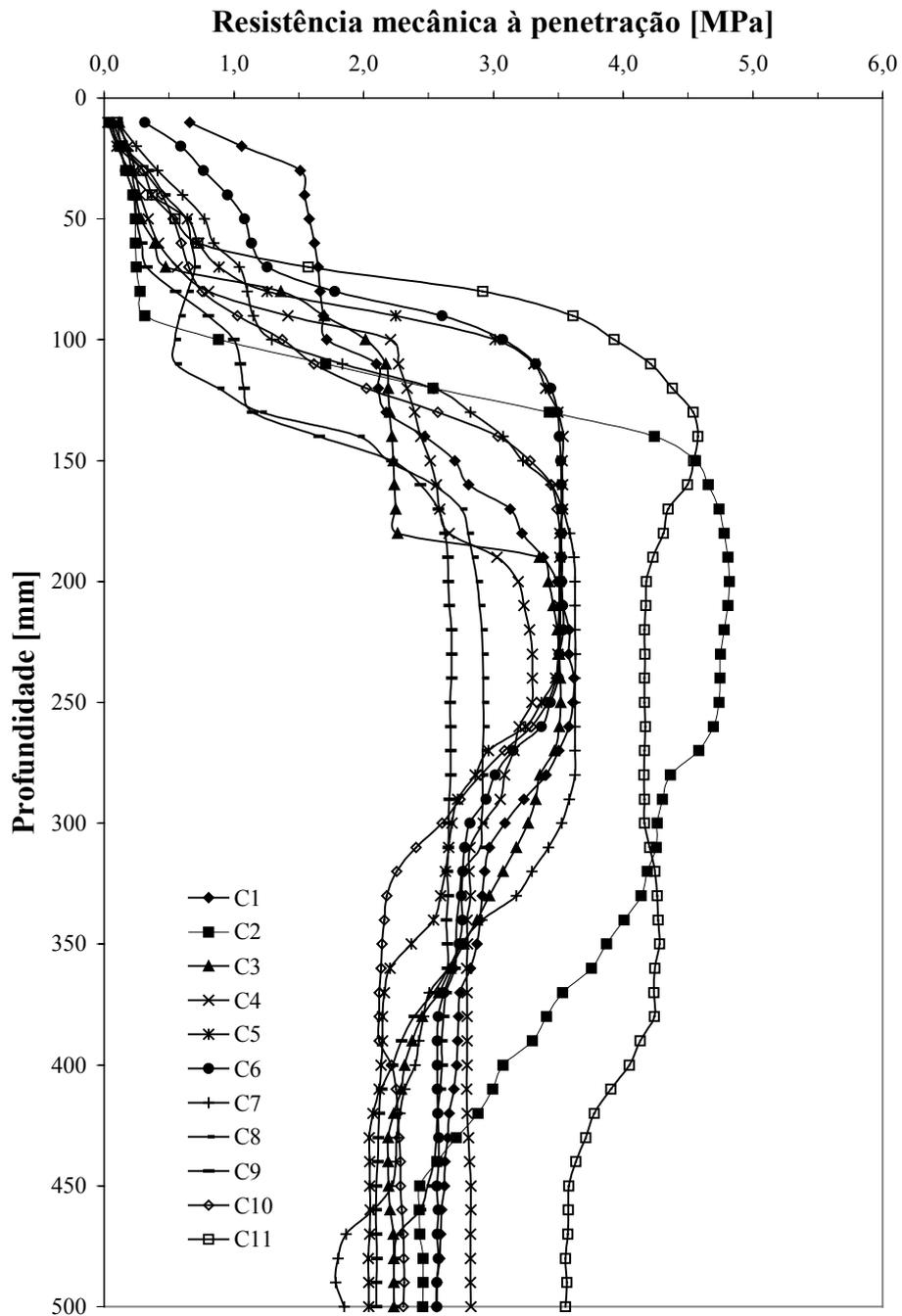
**Apêndice 11 - Volume de solo a ser mobilizado em função da RPc (m<sup>3</sup>) – método geoestatístico**

RPc	Camadas [mm]		
	0 a 150	150 a 300	300 a 500
0.5	1712	3536	5893
1.0	1435	3519	5893
1.5	778	3486	5893
2.0	283	3409	5830
2.5	70	3278	4848
3.0	9	2948	1574
3.5	0	1941	245
4.0	0	114	12
4.5	0	7	0
5.0	0	0	0
5.5	0	0	0
6.0	0	0	0
6.5	0	0	0
7.0	0	0	0

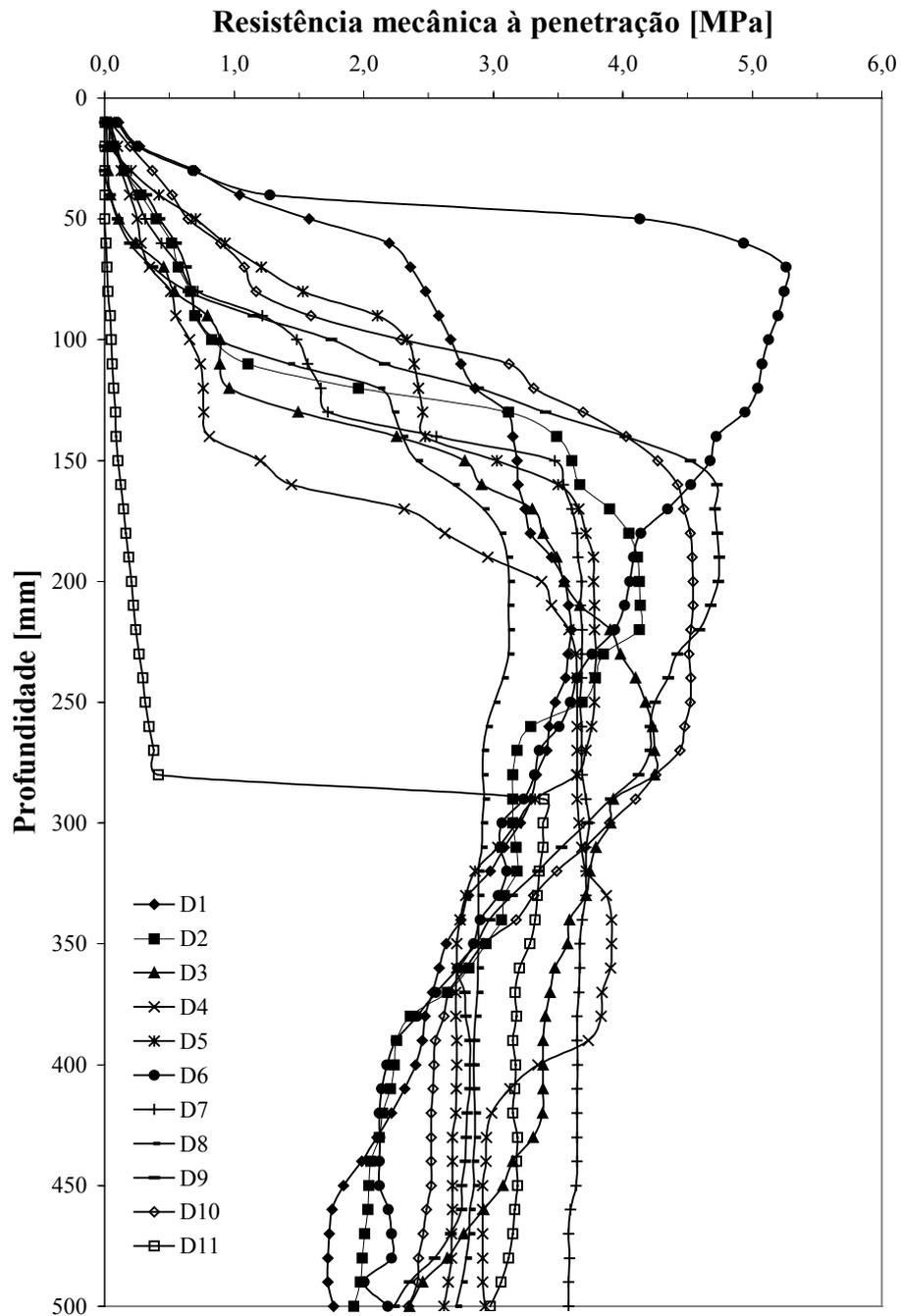
Apêndice 12 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna "A".



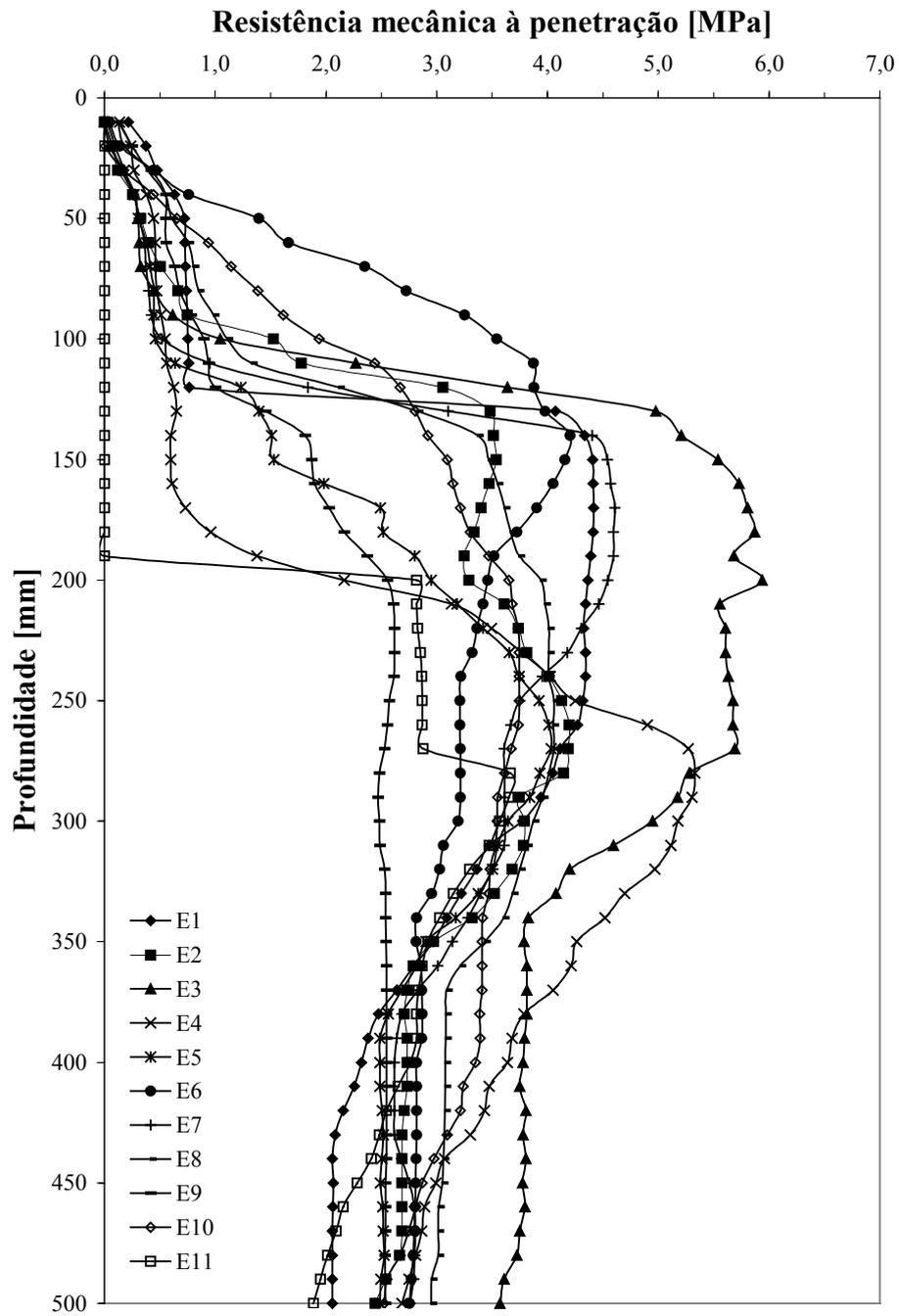
Apêndice 13 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna "C".



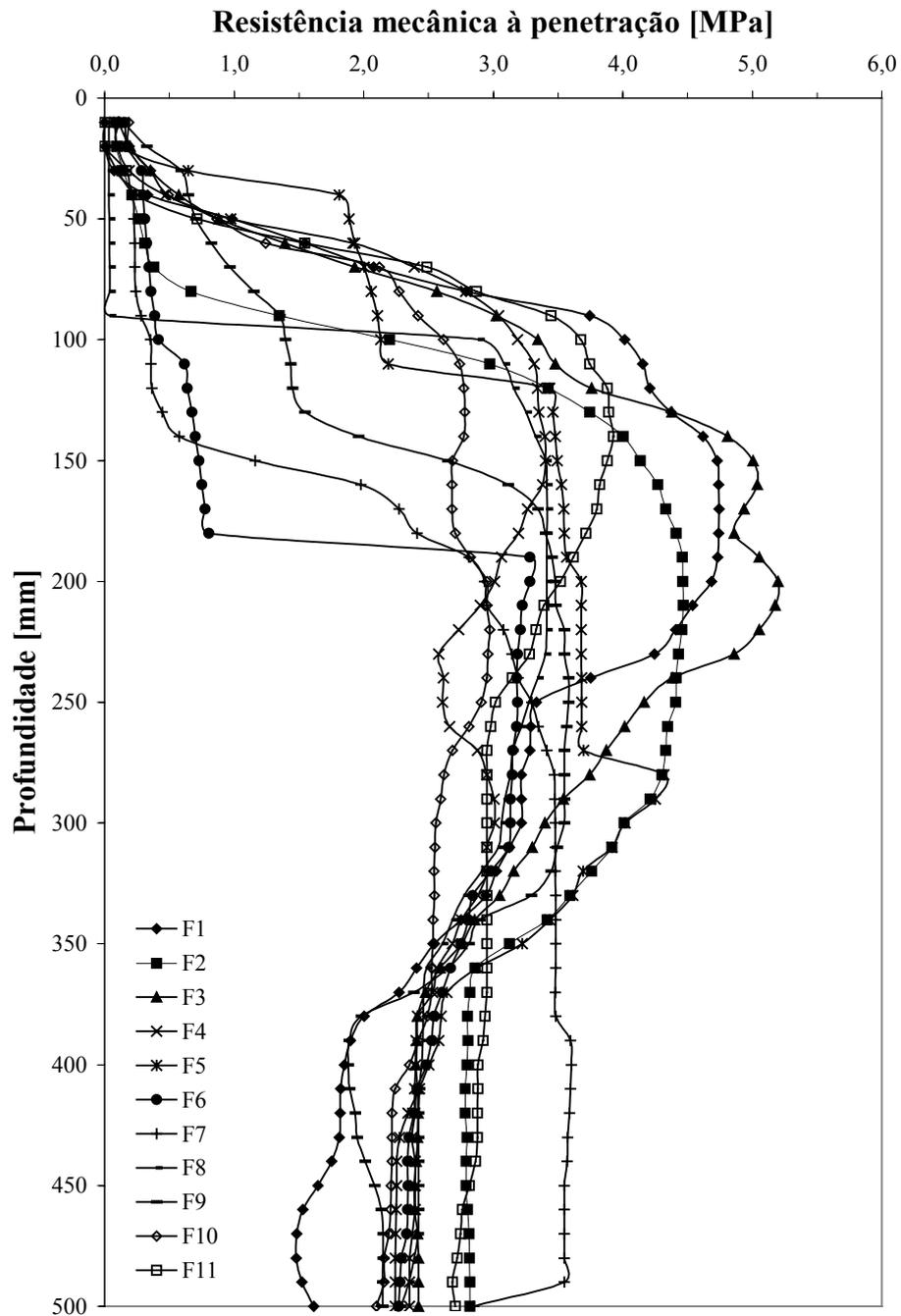
Apêndice 14 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna "D".



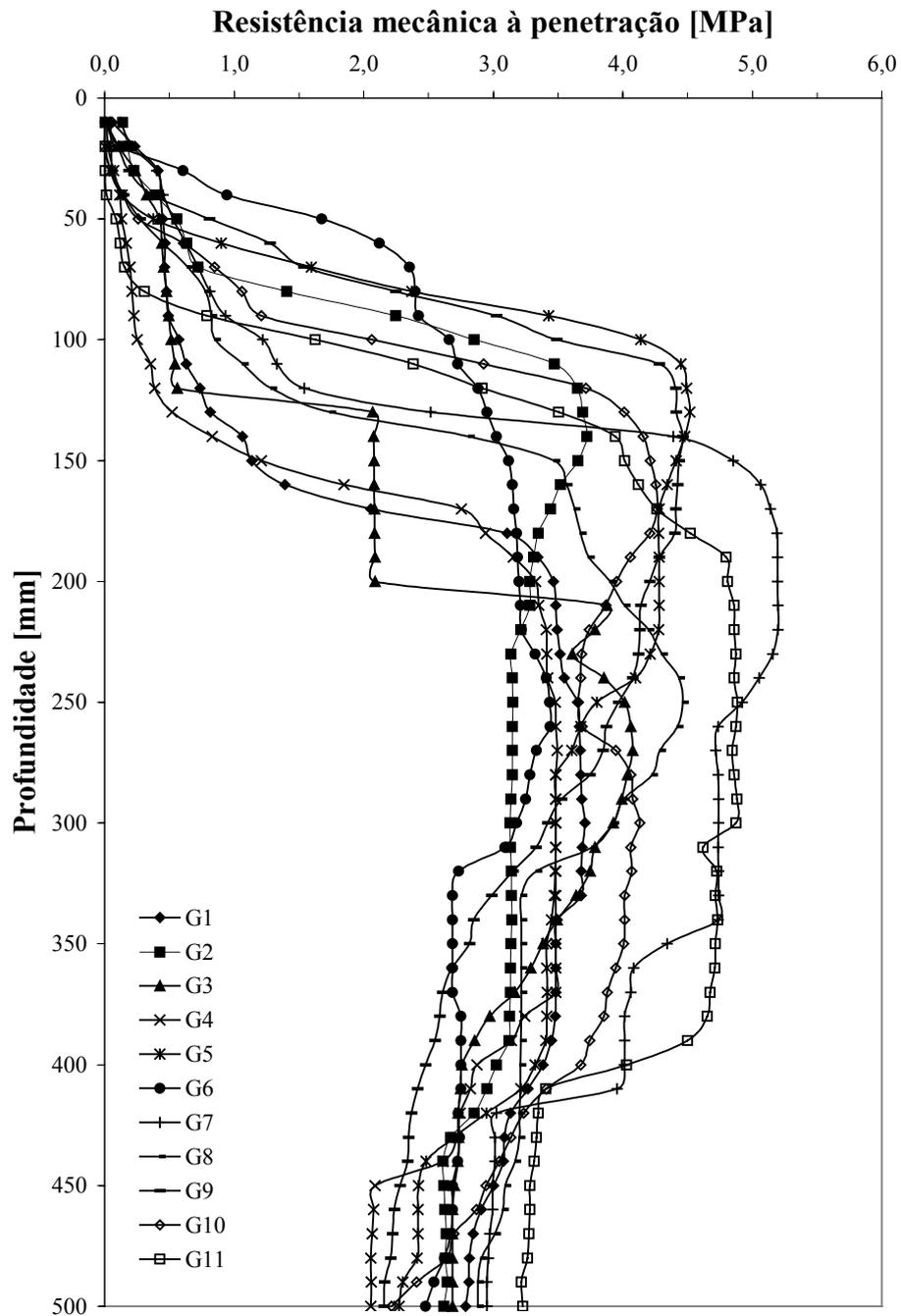
Apêndice 15 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna “E”.



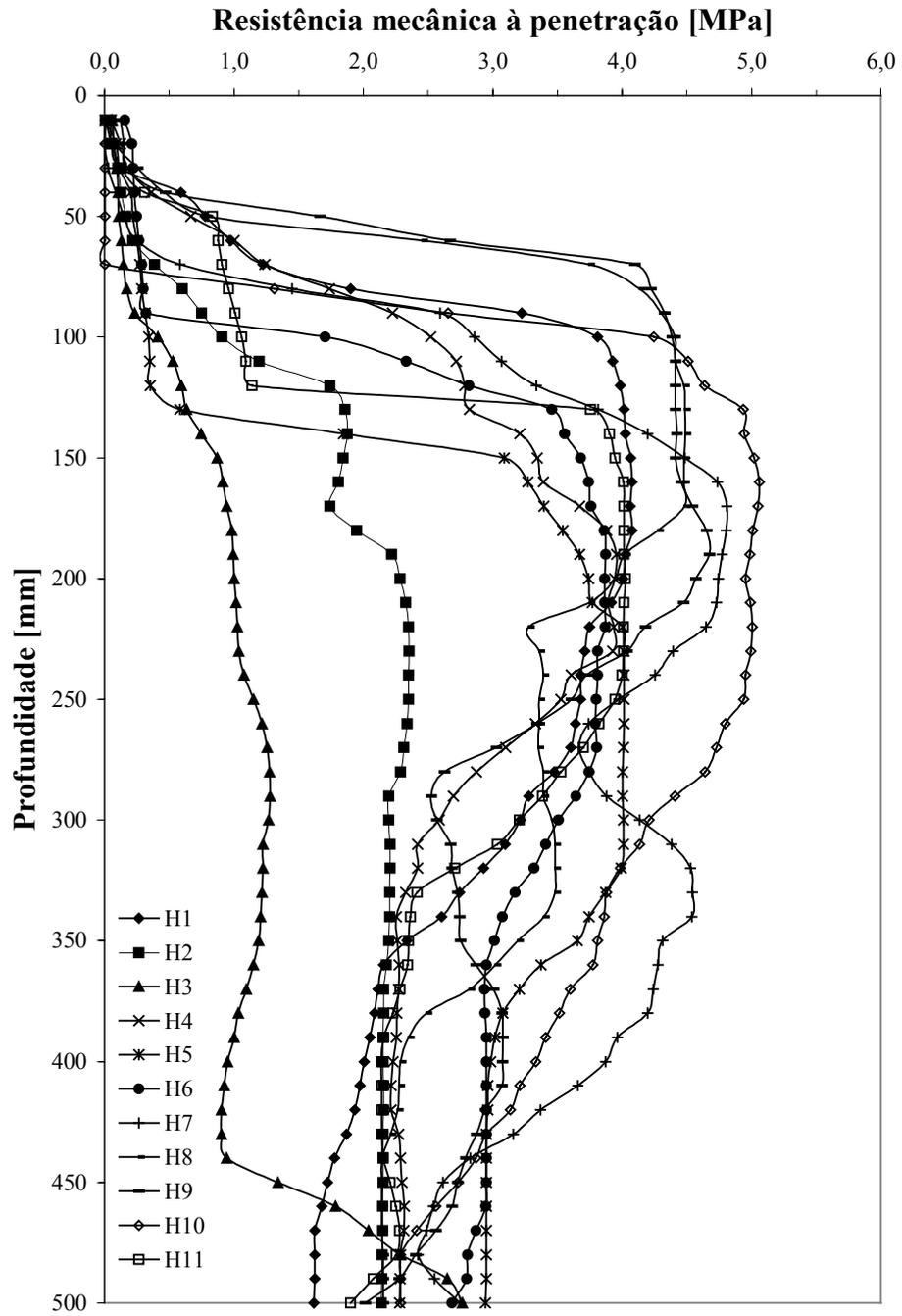
Apêndice 16 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna "F".



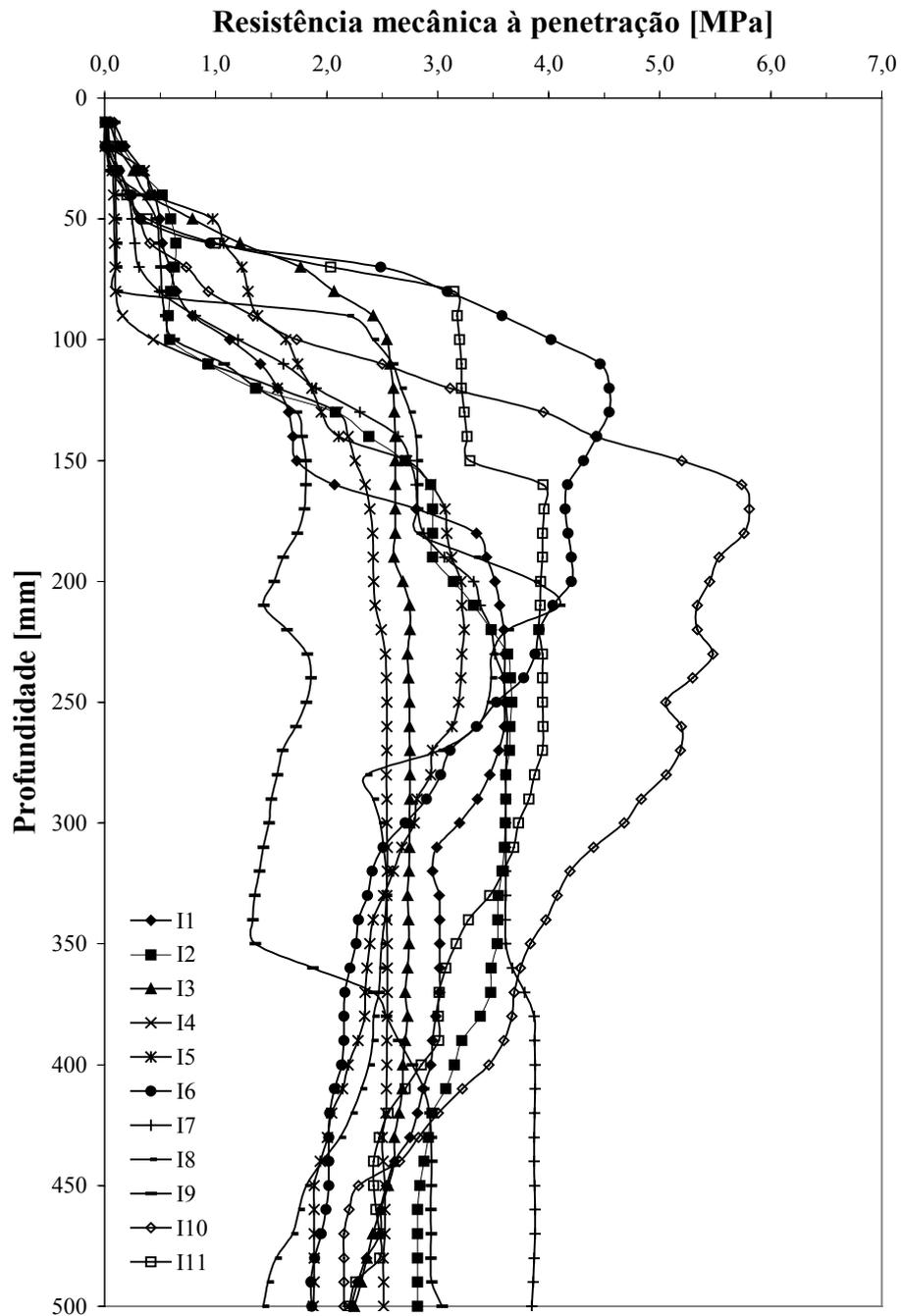
Apêndice 17 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna "G".



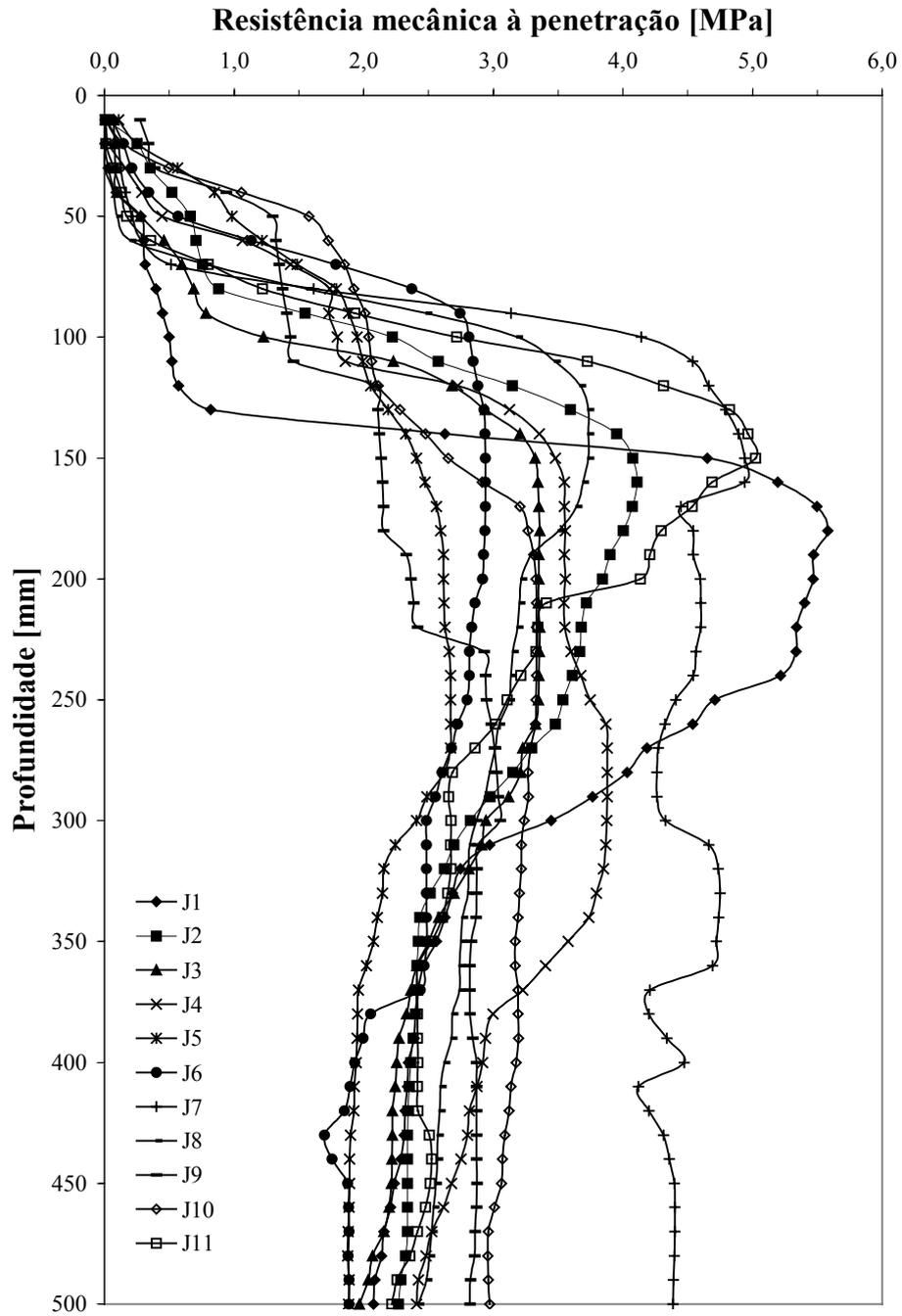
Apêndice 18 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna "H".



Apêndice 19 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna "I".



Apêndice 20 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna "J".



Apêndice 21 - Resistência mecânica à penetração dos pontos amostrados na coluna "K".

