UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA TRIDIMENSIONAL DO SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA

CARLOS PETRÔNIO LEITE DA SILVA

ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD – 072/2011

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO/2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA TRIDIMENSIONAL DO SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA

CARLOS PETRÔNIO LEITE DA SILVA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)

ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

JOSÉ EDUARDO PEREIRA SOARES, DSc (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

ALBERTO DE SAMPAIO FERRAZ JARDIM SAYÃO, PhD (PUC-Rio)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 20 DE DEZEMBRO DE 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, CARLOS PETRÔNIO LEITE

Cartografia Geotécnica Tridimensional do Setor Noroeste de Brasília.

xxiv, 265 p., 210 mm x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2011)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília.
Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Cartografia Geotécnica	2. Mapeamento 2D, 2,5D e 3D
3. Interpolações	4. Geofísica
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, C.P.L. (2011). Cartografia Geotécnica Tridimensional do Setor Noroeste de Brasília. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-072/2011, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 265 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Carlos Petrônio Leite da Silva

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Cartografia Geotécnica Tridimensional do Setor Noroeste de Brasília.

GRAU / ANO: Doutor / 2011

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

Carlos Petrônio Leite da Silva

DEDICATÓRIA

Aos Meus Pais, José Carlos Marinho da Silva e
Maria Lígia Leite da Silva.

EPÍGRAFE

"Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes." (Isaac Newton)

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais, pelos ensinamentos de vida.

À Carmem Lúcia, por estar ao meu lado compartilhando cada momento dessa caminhada. À minha filha Beatriz.

Ao meu orientador, Professor Newton Moreira de Souza, pelo privilégio que tive por ser seu orientando. Agradeço, também, pelo profissionalismo, humanidade, compreensão e amizade.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pelos conhecimentos transmitidos e pela relação amigável. Em especial aos Professores André Assis e Camapum de Carvalho pelo forte apoio.

Agradeço ao Programa de Pós Graduação em Geologia da UnB, pelo apoio técnico. Em especial aos Professores Augusto Pires, José Soares, Welitom Borges e Marcelo Rocha.

Agradeço a colaboração das empresas Embre Ltda, Sonda Engenharia Ltda, Soltec, Odebecht, SVC, VIA Engenharia, Intergeo, Reforsolo, BMS e demais que se propuseram a colaborar cedendo dados de campo para a pesquisa.

Agradeço ao amigo Carlos Medeiros pela amizade, pelo apoio e por acreditar desde o inicio nesta pesquisa.

Agradeço ao CNPq e FAP/DF pelo apoio financeiro.

Agradeço aos amigos, Luis Abel, Bernardo, Elmagno, Andrelisa, Wisley, Alexandre, Paulo, pelo apoio, pela troca de ideias e pela feliz convivência.

Por fim, agradeço a todos aqueles que por acaso deixei de citar, mas que, de alguma forma, contribuíram com esta pesquisa. Meus sinceros agradecimentos a todos!

RESUMO

CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA TRIDIMENSIONAL DO SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA

Os solos no Distrito Federal do Brasil apresentam, de maneira geral, grande variabilidade, tanto de ocorrência quanto de propriedades. No caso desta pesquisa, os métodos e soluções utilizadas, fazem referência a esses solos, que se caracterizam por serem solos porosos e colapsíveis com espessura que chega a ser superior a 10 m. Por esse motivo, empresas locais e profissionais da área de fundações tem buscado cada vez mais conhecer as variáveis que envolvem as soluções de obras de fundações. A construção de um novo bairro na área tombada de Brasília – Setor Noroeste – movimenta a indústria da construção civil no local, que tem forte interesse por informações da geotecnia e geologia do local. De maneira que esta pesquisa tem por finalidade mostrar a necessidade de criar modelos tridimensionais e bidimensionais de subsuperfícies que possam explicar melhor a complexidade do solo. Três estudos de caso foram realizados a fim de estabelecer e conhecer o fator de escala empregado no bairro, o que facilitou a análise dos resultados obtidos no mesmo. O método empregado utilizou dados de relatórios de sondagens do tipo SPT (*Standard Penetration Test*) e dados geofísicos de resistividade elétrica e sísmica de refração rasa. Os resultados apresentados objetivam contribuir para a melhoria dos métodos de dimensionamento de fundações, escavações de subsolos, desenvolver técnicas de controle de campo e aprimorar as análises de provas de carga objetivando a otimização de projetos e execução de obras. A pesquisa permite concluir que os modelos tridimensionais que caracterizam a sub-superfície facilitam as análises de comportamento e desempenho das fundações, controle de escavação, maior autonomia para desenvolver projetos de fundações, controle da execução e otimização integrada de projeto/execução.

ABSTRACT

THREE-DIMENSIONAL MAPPING OF GEOTECHNICAL NORTHWESTERN SECTOR OF BRASILIA

The soils in the Federal District of Brazil have, in general, high variability, both the occurrence and properties. In this research, methods and solutions used refer to these soils, which are characterized by being collapsible soils and porous with a thickness that becomes greater than 10 m. For this reason, local companies and professionals in foundations seek to understand the variables that involve the construction of foundations solutions. The construction of a new neighborhood in Brasília - Northwest Sector - mobilizes the construction industry, which has a strong interest in geology and geotechnical information from the site. So this research show the need to create two-dimensional and three-dimensional models of subsurface that could better explain the complexity of the soil. Three case studies were conducted to establish and meet the scaling factor used in the district, which facilitated the analysis of results obtained in the same. The method used data from reports of surveys like SPT (Standard Penetration Test) and geophysical data of electrical resistivity and shallow seismic refraction. The results presented aim to contribute to the improvement of design of foundations, excavation of basements, develop techniques for field control and improve the analysis of load tests in order to optimize the design and execution of constructions. The survey shows that three-dimensional models that characterize the subsurface facilitate the analysis of behavior and performance of foundations, excavation control, autonomy for developing foundations projects, execution control and integrated optimization design / implementation.

SUMÁRIO

Capítulo **Página**

1- INTRODUÇÃO 1
1.1- OBJETIVOS 2
1.2- BREVE DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO 3
1.3- ESCOPO DA TESE 4
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6
2.1- CONCEITOS BÁSICOS DE CARTOGRAFIA 6
2.2- CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA (IAEG, 1976) 7
2.2.1- PRINCÍPIOS DA CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA 7
2.2.2- CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA PARA ÁREAS URBANAS 8
2.2.3- DEFINIÇÃO DE UMA CARTA GEOTÉCNICA (IAEG, 1976) 9
2.2.4- PRINCÍPIOS DE CLASSIFICAÇÃO DE ROCHAS E SOLOS PARA CARTAS GEOTÉCNICAS (IAEG, 1976) 10
2.2.5- CONDIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS (IAEG, 1976) 11
2.2.6- PRINCÍPIOS DO ZONEAMENTO GEOTÉCNICO 12
2.3- TÉCNICAS PARA AQUISIÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS 13
2.3.1- MÉTODOS GERAIS DE MAPEAMENTO GEOLÓGICO - PREPARAÇÃO DO MAPA BASE TOPOGRÁFICO E AQUISIÇÃO DE INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS 13
2.3.2- MAPEAMENTO DE ROCHAS E SOLOS PARA FINALIDADE DE ENGENHARIA (IAEG, 1976) 13
2.3.3- FOTOINTERPRETAÇÃO 14
2.3.4- MAPEAMENTO COM GEOFÍSICA - MEDIDAS DE RESISTIVIDADES 14
2.3.5- MAPEAMENTO COM GEOFÍSICA - MEDIDAS SÍSMICAS 15
2.3.6- MAPEAMENTO COM SONDAGENS E TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM 15
2.4- APRESENTAÇÃO DOS DADOS EM CARTAS GEOTÉCNICAS 15
2.4.1- REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL EM CARTAS 15
2.4.2- SEÇÕES CRUZADAS GEOTÉCNICAS 16
2.5- ATRIBUTOS 16
2.6- CARTAS DERIVADAS – MÊCANISMOS DE ELABORAÇÃO (ZUQUETTE, 1987) 17
2.6.1- CARTA DE FUNDAÇÕES (Dearman, 1991) 18
2.6.2- CARTA DE ESCAVABILIDADE (Dearman, 1991) 19
2.7- MÉTODOS GEOFÍSICOS 20
2.7.1- LEVANTAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS – SÍSMICA DE REFRAÇÃO 23
2.7.2- MÉTODOS GEOELÉTRICOS 28
2.8- INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA 38
2.8.1- SONDAGEM À PERCUSSÃO SPT (*STANDARD PENETRATION TEST*) 43

2.9- GEOESTATÍSTICA E MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO....48
2.9.2- KRIGEAGEM, KRIGAGEM OU *KRIGING* 57
2.10- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL (3D) DE DADOS GEOTÉCNICOS 66
2.10.1- DESENVOLVIMENTO DE MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE SUB-SUPERFÍCIES – EXPERIÊNCIA NO DISTRITO FEDERAL 67
3- MATERIAIS E MÉTODOS....69
3.1- INTRODUÇÃO 69
3.2- BREVE CARACTERIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO....69
3.2.1- ESTUDO DE CASO 1 – OBRA "BRISAS DO LAGO"....70
3.2.2- ESTUDO DE CASO 2 – OBRA "SAUN"....70
3.2.3- ESTUDO DE CASO 3 – OBRA "VERANO - BLANC"....71
3.2.4- SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA-DF 72
3.3- PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS NA PESQUISA....74
3.4- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS....79
3.4.1- GPS TOPOGRÁFICO 79
3.4.2- ESTAÇÃO TOTAL LEICA TC307 81
3.4.3- EQUIPAMENTO DE SÍSMICA DE REFRAÇÃO....81
3.4.4- EQUIPAMENTO PARA LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE....84
3.5- INVENTÁRIO CARTOGRÁFICO DO SETOR NOROESTE....85
3.5.1- ORGANIZAÇÃO DOS DADOS EM BANCO DE DADOS DIGITAL E USO DO SISTEMA GEOGRÁFICO DE INFORMAÇÕES 88
3.6- PLANEJAMENTO DOS TRABALHOS DE CAMPO....90
3.6.1- PLANEJAMENTO PARA LEVANTAMENTO DE DADOS SÍSMICOS 90
3.6.2- PLANEJAMENTO PARA LEVANTAMENTO DE DADOS DE ELETRORRESISTIVIDADE 94
3.6.3- CARTA DE USO E COBERTURA DO SOLO PARA O SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA....100
3.6.4- CERRADO RALO....102
3.6.5- CERRADO TÍPICO....103
3.6.6- CERRADO ANTRÓPICO....103
3.6.7- CAMPO SUJO 105
3.6.8- ÁREAS ALTERADAS....105
3.6.9- ÁREAS DEGRADADAS 106
3.6.10- ÁREA CONSTRUÍDA 108
3.6.11- SOLO EXPOSTO 108
3.7- RELATÓRIOS TÉCNICOS DE SONDAGEM 109
3.8- PROCESSAMENTO DOS DADOS SÍSMICOS 112
3.9- PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ELETRORRESISTIVIDADE 116
3.9.1- INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA (Modelo Físico) 119

3.10- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE DADOS GEOTÉCNICOS E GEOFÍSICOS 121
3.10.1- CADASTRAMENTO DOS DADOS 122
3.10.2- DEFINIÇÃO DE UMA GRADE 3D 125
3.10.3- NÍVEL D'ÁGUA, EDIFICAÇÕES 3D E ESCOLHA DOS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO NO ROCKWORKS 15 125
3.10.4- MODELAGEM 3D DE DADOS GEOFÍSICOS 128
4- RESULTADOS 130
4.1- BREVE DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO DISTRITO FEDERAL 130
4.1.1- CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA ÁREA DE ESTUDO 136
4.2- ESBOÇO GEOMORFOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO 139
4.3- BREVE CARACTERIZAÇÃO GEOLOGICA DAS ÁREAS DE ESTUDO 143
4.4- RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO - OBRA "BRISAS DO LAGO" 143
4.4.1- CONTEXTO GEOLÓGICO DO ESTUDO DE CASO 1 – OBRA "BRISAS DO LAGO" 143
4.4.2- CARTAS BÁSICAS COM LOCAÇÃO DAS SONDAGENS MECÂNICAS, LOCAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES, LOCAÇÃO DAS ESTACAS DE CONTENÇÃO E HIPSOMETRIA DO TERRENO 146
4.4.3- MODELO TRIDIMENSIONAL DE SOLO/ROCHA 149
4.4.4- CARTA DE NÍVEL D'ÁGUA 152
4.4.5- MODELO TRIDIMENSIONAL DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA 153
4.4.6- MODELO 3D DE Nspt COM SOBREPOSIÇÃO DOS VALORES DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA 155
4.4.7- SEÇÕES BIDIMENSIONAIS (2D) DE Nspt E SOLO 157
4.4.8- FATIAMENTO HORIZONTAL (2D) DE Nspt 161
4.5- RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO - OBRA "SAUN" 167
4.5.1- CONTEXTO GEOLÓGICO DO ESTUDO DE CASO 2 – OBRA "SAUN" 170
4.5.2- MODELO 3D DE Nspt 173
4.5.3- DIAGRAMA DE CERCAS 3D (*FENCE* 3D) DE Nspt 174
4.5.4- SEÇÕES BIDIMENSIONAIS (2D) DE Nspt 175
4.5.5- MODELO 3D DE RECUPERAÇÃO (%) 176
4.5.6- DIAGRAMA DE CERCAS 3D (*FENCE* 3D) DE RECUPERAÇÃO (%) 179
4.5.7- SEÇÕES BIDIMENSIONAIS (2D) DE RECUPERAÇÃO (%) 179
4.5.8- MODELO 3D DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA (Ohm.m) 180
4.5.9- DIAGRAMA DE CERCAS 3D (*FENCE* 3D) DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA (Ohm.m) 181
4.5.10- SEÇÕES 2D DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA 182
4.5.11- FATIAMENTO HORIZONTAL DE VALORES DE Nspt E VALORES DE GRAU DE RECUPERAÇÃO (%) 182
4.5.12- OUTROS PRODUTOS DERIVADOS 184

4.6- RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 3 – OBRA "VERANO - BLANC" 188
4.6.1- CONTEXTO GEOLÓGICO DO ESTUDO DE CASO 3 – OBRA "VERANO - BLANC".....190
4.6.2- MODELO 3D DE SOLO 192
4.6.3- DIAGRAMA DE CERCAS 3D (*FENCE* 3D) DE Nspt 192
4.6.4- FATIAMENTO HORIZONTAL DE VALORES DE Nspt 193
4.6.5- SEÇÕES BIDIMENSIONAIS (2D) DE Nspt.....197
4.6.6- DIAGRAMA DE CERCAS (*FENCE* 3D) DE CAPACIDADE DE CARGA 201
4.6.7- SEÇÕES 2D DE CAPACIDADE DE CARGA (tf).....202
4.6.8- SEÇÕES HORIZONTAIS 2D DE CAPACIDADE DE CARGA.....206
4.7- RESULTADOS DO SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA.....208
4.7.1- CONTEXTO GEOLÓGICO DO SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA-DF.....208
4.7.2- CARTAS BÁSICAS – (CARTA-IMAGEM, HIPSOMETRIA, Orientação DAS VERTENTES E DECLIVIDADE) 212
4.7.3- CARTA DE USO E COBERTURA DO SOLO 221
4.7.4- LOCALIZAÇÃO DOS TRABALHOS DE CAMPO.....226
4.7.5- RESULTADO DO PROCESSAMENTO DA LINHA GEOFÍSICA NORTE-SUL "LINHÃO GEOFÍSICO" 229
4.8- MODELO TRIDIMENSIONAL DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....233
4.8.1- DIAGRAMA *FENCE* 3D DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....234
4.8.2- SEÇÕES 2D DE ELETRORRESISTIVIDADE.....235
4.9- DIAGRAMA *FENCE* 3D DE SÍSMICA DE REFRAÇÃO 244
4.10- DIAGRAMA FENCE 3D DE NSPT 245
4.11- SEÇÕES 2D DE NSPT E SÍSMICA DE REFRAÇÃO.....247
4.12- CARTA DE NÍVEL D'ÁGUA 250
5- CONCLUSÕES 252
5.1- SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....256
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 257

LISTA DE TABELAS

Tabela **Página**

Tabela 2.1 –Número mínimo de observações (Zuquette, 1987).....17

Tabela 2.2– Adequação dos métodos geofísicos aos problemas (modificado de Souza *et al*., 1998).....22

Tabela 2.3 – Velocidade propagação da onda P para vários materiais (Modificado de Herzig, 2003).....25

Tabela 2.4 – Valores de resistividade para rocha ou solo (Fernandes, 1984). 34

Tabela 2.5 – Problemas típicos decorrentes de ausência de investigação geotécnica para os diferentes tipos de fundações (Milititsky, 2008). 42

Tabela 2.6 – Vantagens e desvantagens do interpolador inverso ponderado da distância (Modificado de Landim, 2000).....56

Tabela 2.7 – Vantagens e desvantagens da krigeagem (Modificado de Landim, 2000). 58

Tabela 2.8 – Comparação de resultados entre os principais interpoladores (Modificado de Landim, 2000). 59

Tabela 2.9 – Modelos transitivos de semivariograma (Camargo, 1997).....64

Tabela 4.1 – Previsão de escavabilidade (sem fator de empolamento) baseado no modelo 3D de Recuperação (%) até a cota 1040.5m para o estudo de caso "Obra SAUN".....179

LISTA DE FIGURAS

Figura **Página**

Figura 1.1 – Objetivos específicos da pesquisa. 3

Figura 1.2 – Localização simples das áreas de estudo da pesquisa. 4

Figura 2.1 – Esquema do equipamento de sísmica de refração segundo a ASTM D5777-00 (ASTM, 2000). 24

Figura 2.2 – Deformações elásticas e movimento das partículas associada com a propagação das ondas de corpo: a) Ondas P; b) Ondas S (Barton, 2007). 25

Figura 2.3 – Raios de onda P refletido e refratado associados ao raio P obliquamente incidente sobre uma interface de contraste de impedância acústica (Kearey *et al.*, 2002). 27

Figura 2.4 – Difração causada pelo truncamento de uma camada falhada (Kearey *et al*., 2002). 28

Figura 2.5 – Possível classificação dos métodos geoelétricos de prospecção geofísica (Braga, 1988). 31

Figura 2.6 – Parâmetros utilizados na definição física de resistividade (Kearey *et al.*, 2002). 33

Figura 2.7 – Intervalo aproximado de valores de resistividade dos tipos comuns de rochas (Kearey *et al.*, 2002). 34

Figura 2.8 – Esquema simples de medida de eletrorresistividade (Braga, 1988). 35

Figura 2.9 – Disposição no campo do arranjo dipolo-dipolo (Braga, 1988). 36

Figura 2.10 – Pseudo-seção de resistividade aparente – arranjo dipolo-dipolo (Braga, 1988). 36

Figura 2.11 – Variação nos custos da obra em função do comprimento de sondagens realizadas em obras de túneis (Hoek & Palmeiri, 1998). 41

Figura 2.12 – Dimensões em milímetros de parte do amostrador Raymond (amostrador padrão) mostrando a cabeça e sapata de acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2001). 44

Figura 2.13 – Esquema de elaboração do ensaio SPT. 45

Figura 2.14 – Distribuição dos furos de sondagens - (a) Sugestão para distribuição em planta dos furos (b) Tabela com o número mínimo de furos. (NBR 8036/83). 47

Figura 2.15 – Exemplo de semivariograma experimental (Camargo, 1997). 62

Figura 2.16 – Representação gráfica de semivariogramas experimentais (Camargo, 1997). 64

Figura 3.1 – Localização da área do estudo de caso 1 – Projeto “Brisas do Lago”. 70

Figura 3.2 – Localização da área do estudo de caso 2 – Obra “SAUN”. 71

Figura 3.3 – Localização da área do estudo de caso 3 – Obra “VERANO-BLANC”. 71

Figura 3.4 – Carta de Localização do Setor Noroeste – Brasília/DF. 73

Figura 3.5 – Tela do Programa Computacional Spring 4.3.3. 74

Figura 3.6 – Tela do Programa Computacional *RockWorks 15* adquirido pelo Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB. 75

Figura 3.7 – Tela do programa *Pickwin* do pacote *SeisImager*, utilizado para o tratamento de dados sísmicos. 76

Figura 3.8 – Tela do Programa Computacional *LogPlot 7* adquirido pelo Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB. 76

Figura 3.9 – Tela do Programa Computacional *Google Earth*. 77

Figura 3.10 – Tela do Programa Computacional *Electre II.* 78

Figura 3.11 – Tela do Programa Computacional *Prosys II.* 78

Figura 3.12 – Tela do Programa Computacional *RES2DINV*. 79

Figura 3.13 – Conjunto de GPS topográfico Ashtech, utilizado em campo. 80

Figura 3.14 – GPS Topográfico, do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, em funcionamento no Setor Noroeste de Brasília. 80

Figura 3.15 – Estação Total Leica TC307, do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, utilizada nos trabalhos de campo. 81

Figura 3.16 – Detalhe da ligação do geofone ao cabo de dados. 82

Figura 3.17 – Detalhe do equipamento de sísmica de refração. 83

Figura 3.18 – Detalhe de uma linha sísmica montada em campo. 83

Figura 3.19 – Conjunto marreta+*trigger*, caixa decodificadora de disparo+rádio amador e placa metálica. 83

Figura 3.20 – Detalhe do programa computacional utilizado pelo equipamento no processo de aquisição de dados. 84

Figura 3.21 – Detalhe do equipamento Syscal Pro de 72 canais. 84

Figura 3.22 – Base cartográfica do setor noroeste de Brasília na escala 1:2000, exibida no Spring 4.3.3 (Codeplan, 1998) 85

Figura 3.23 – Foto aérea de Brasília do ano de 1958. 86

Figura 3.24 – Imagem do ano de 2004 do setor noroeste de Brasília – satélite *Quickbird*. 87

Figura 3.25 – Carta de Solos (Eia/Rima, 1997). 87

Figura 3.26 – Imagem do setor noroeste de Brasília, ano de 2010, disponibilizada pelo *Google Earth*. 88

Figura 3.27 – Marcação de linha georreferenciada para levantamento de campo com sísmica de refração. 90

Figura 3.28 – Esquema de montagem da linha de sísmica de refração. 91

Figura 3.29 – Georreferenciamento dos geofones com auxílio do GPS topográfico. 91

Figura 3.30 – Estaqueamento com tiro de marreta de 10 kg. 92

Figura 3.31 – Configuração da sobreposição de dados entre as linhas de sísmica de refração. 93

Figura 3.32 – Linhas sísmicas realizadas no Setor Noroeste de Brasília. 93

Figura 3.33 – Malha de amostragem usada no estudo de caso 1 (Brisas do Lago) sobre imagem de satélite (Google) e da carta com a locação das sondagens. 96

Figura 3.34 – Malha de amostragem usada no estudo de caso 2 (SAUN) sobre imagem de satélite (Google) e da carta com a locação das sondagens. 97

Figura 3.35 – Esquema de medição empregado. Pseudo-seção com a posição dos pontos medidos em superfície. 98

Figura 3.36 – Malha de amostragem usada Setor Noroeste de Brasília/DF sobre imagem de satélite (Google). 100

Figura 3.37 – Processo de segmentação de imagem para posterior classificação do uso e cobertura do solo pelo processo de treinamento de amostras. 101

Figura 3.38 - Cerrado Ralo próximo ao Setor Terminal Norte. 102

Figura 3.39 - Cerrado Típico próximo a Epia. 103

Figura 3.40 - Cerrado Antrópico próximo a Epia. 104

Figura 3.41 - Campo Sujo próximo a Epia. 105

Figura 3.42 - Áreas Alteradas. 106

Figura 3.43 - Área alterada por erosão antrópica, com grande acúmulo de resíduo sólido urbano e resíduo de construção civil 107

Figura 3.44 - Área alterada por erosão antrópica – Início da erosão próximo ao Setor Militar Urbano. 107

Figura 3.45 - Visita feita pelos pesquisadores da UnB no Santuário Sagrado dos Pajés, localizado no centro do Setor Noroeste de Brasília. 108

Figura 3.46 - Solo exposto nas vias de acesso do Setor Noroeste. 109

Figura 3.47 – Relatório de sondagem SPT contido no banco de dados digital da pesquisa. 110

Figura 3.48 – Adequação de valores de Nspt acima de 60 golpes nos relatórios de sondagem. 111

Figura 3.49 – Descrição de um sismograma obtido no setor noroeste de Brasília com 24 geofones espaçados de 5 m de distância. 112

Figura 3.50 – Aplicação de ganho em sinal sísmico. (a) sem ganho; (b) com aplicação de ganho. 113

Figura 3.51 – Marcação de primeiras quebras de sinal. 114

Figura 3.52 – Resultado final da marcação de primeiras quebras de sinal de uma linha sísmica. 114

Figura 3.53 – Resultado final da marcação das linhas de velocidade. 115

Figura 3.54 – Exemplo de um modelo de inversão de sinal sísmico. 116

Figura 3.55 – Correção da topografia (*datum*) das linhas de eletrorresistividade. 117

Figura 3.56 – Exemplo de exclusão de *bad data points* (dados espúrios) de uma linha de eletrorresistividade. 118

Figura 3.57 – Exemplo de uma pseudo-seção geoelétrica de resistivididade aparente. 118

Figura 3.58 – Exemplo de uma seção invertida de eletrorresistividade. 121

Figura 3.59 – Locação dos furos de sondagem no *RockWorks* 15. 122

Figura 3.60 – Descrição das camadas de solo/rocha em cada furo de sondagem no *RockWorks* 15. 123

Figura 3.61 – Função *Onlap* no *RockWorks* 15 força o programa a seguir a ordem das camadas estratigráficas. 124

Figura 3.62 – Descrição de valores pontuais numéricos das sondagens no *RockWorks* 15. .. 124

Figura 3.63 – Geração da grade 3D no programa computacional *RockWorks* 15. 125

Figura 3.64 – Descrição dos valores de nível d'água no programa computacional *RockWorks* 15. 126

Figura 3.65 – Descrição de arquivo ASCII para modelagem de edificações em 3D no *RockWorks* 15. 126

Figura 3.66 – Escolha do tipo de interpolador para modelagem no *RockWorks* 15. 127

Figura 3.67 – Efeito do ajuste *hight fidelity* no interpolador para modelagem no *RockWorks* 15, a) Sem *hight fidelity*; b) Com *hight fidelity*. 128

Figura 3.68 – Inserção de dados geofísicos no *RockWorks* 15. 129

Figura 4.1 – Coluna estratigráfica do Grupo Paranoá, definida na área-tipo de São João d'Aliança – Alto Paraíso de Goiás (Faria, 1995). 132

Figura 4.2 – Recomposição litoestratigráfica do DF (Silva & Campos, 1999). 133

Figura 4.3 – Identificação da área de estudo na carta geológica de Silva & Campos (1999). 137

Figura 4.4 – Unidades geomorfológicas do Distrito Federal (Pinto, 1987). 141

Figura 4.5 – Carta geológica simplificada do Distrito Federal e breve descrição da camada de metassiltito encontrada na obra (modificado de Silva & Campos, 1999). 145

Figura 4.6 – Carta hipsométrica com locação das sondagens mecânicas e locação das edificações do estudo de caso "Brisas do Lago". 147

Figura 4.7 – Carta hipsométrica com locação das estacas de contenção e locação das edificações do estudo de caso "Brisas do Lago". 148

Figura 4.8 – Modelo tridimensional de solo/rocha com espacialização do nível d'água e edificações para o estudo de caso "Brisas do Lago". 150

Figura 4.9 – Modelo tridimensional de solo/rocha com espacialização dos furos de sondagens e contenções para o estudo de caso "Brisas do Lago". 151

Figura 4.10 – Carta da cota do nível d'água do estudo de caso "Brisas do Lago". 152

Figura 4.11 – Modelo 3D dos pontos de resistividade elétrica coletados no levantamento geofísico do estudo de caso "Brisas do Lago". 153

Figura 4.12 – Modelo 3D de resistividade elétrica para valores acima de 5.000 Ohm.m do estudo de caso "Brisas do Lago". 154

Figura 4.13 – Locação de fatias para construção de diagrama de cercas do estudo de caso "Brisas do Lago". 155

Figura 4.14 – Modelo 3D de Nspt com sobreposição dos valores de resistividade elétrica do estudo de caso "Brisas do Lago". 156

Figura 4.15 – Seção 2D de Nspt e Solo com a solução de estacas projetas para as contenções da obra do estudo de caso "Brisas do Lago". 158

Figura 4.16 – Seção 2D de Nspt e Solo com a solução de estacas projetas para as contenções da obra do estudo de caso "Brisas do Lago". 159

Figura 4.17 – Seção 2D de Nspt e Solo com a solução de estacas projetas para as contenções da obra do estudo de caso "Brisas do Lago". 160

Figura 4.18 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 1 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago". 161

Figura 4.19 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 2 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago". 162

Figura 4.20 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 6 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago". 163

Figura 4.21 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 7 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago". 164

Figura 4.22 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 8 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago". 165

Figura 4.23 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 9 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago". 166

Figura 4.24 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 8 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago". 167

Figura 4.25 – Planta topográfica com locação dos furos de sondagem mista para o estudo de caso "Obra SAUN". 168

Figura 4.26 – Carta hipsométrica com locação dos furos de sondagem mista para o estudo de caso "Obra SAUN". 169

Figura 4.27 – Planta de locação das linhas geoelétricas para o estudo de caso "Obra SAUN". 170

Figura 4.28 – Vista parcial do canteiro da obra. Notar os quartzitos saprolitizados envoltos pelo evidente manto de intemperismo. 170

Figura 4.29 – Depósitos tecnogênicos construído envolvendo o Latossolo Vermelho Escuro. O Horizonte A já foi decapeado. O nível esbranquiçado é o quartzito alterado. 171

Figura 4.30 – Vista parcial de um corte na escavação da obra. Notar os níveis de quartzitos formando suave ondulação. 172

Figura 4.31 – Aspecto da passagem transicional do quartzito para o LVE (Latossolo Vermelho Escuro). 173

Figura 4.32 – Modelo 3D de Nspt para o estudo de caso "Obra SAUN". 174

Figura 4.33 – Diagrama de cercas 3D (*Fence* 3D) de Nspt para o estudo de caso "Obra SAUN". 175

Figura 4.34 – Seção 2D de Nspt entre os furos SM-13 e SM-18 para o estudo de caso "Obra SAUN". 176

Figura 4.35 – Modelo 3D de Recuperação (%) para o estudo de caso "Obra SAUN". 178

Figura 4.36 – Previsão de volume de rocha a ser escavada até a cota 1040,5m baseada no modelo 3D de recuperação (%) para o estudo de caso "Obra SAUN". 178

Figura 4.37 – Diagrama de cercas 3D (*Fence* 3D) de recuperação (%). 179

Figura 4.38 – Seção 2D de Recuperação (%) entre os furos SM-13 e SM-18. 180

Figura 4.39 – Modelo 3D de Resistividade Elétrica (Ohm.m) para o estudo de caso "Obra SAUN". 181

Figura 4.40 – Diagrama de Cercas 3D (Fence 3D) de Resistividade Elétrica (Ohm.m) para o estudo de caso "Obra SAUN". 181

Figura 4.41 – Seção 2D de Resistividade Elétrica (Ohm.m) entre os furos SM-13 e SM-18. 182

Figura 4.42 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt na cota 1040,5 m do estudo de caso "Obra SAUN". 183

Figura 4.43 – Fatiamento horizontal de valores de grau de recuperação de rocha (%) na cota 1040,5 m do estudo de caso "Obra SAUN". 184

Figura 4.44 – Espacialização tridimensional das fundações e contenções do estudo de caso "Obra SAUN". 185

Figura 4.45 – Seções verticais de interesse com espacialização das fundações do estudo de caso "Obra SAUN". 186

Figura 4.46 – Seções verticais de interesse com espacialização das cortinas de contenção do estudo de caso "Obra SAUN". 187

Figura 4.47 – Carta hipsométrica com a locação dos furos de sondagem SPT e locação das obras do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 189

Figura 4.48 – Localização do Córrego Vicente Pires e Córrego Guará. 190

Figura 4.49 – Vista parcial do corte no encontra das vias que demandam o *Park Shopping* (edifício comercial) e o Guará II. Apresenta siltitos profundamente alterados (saprolito), laterizados, diaclasados. 191

Figura 4.50 – Modelo tridimensional de solo com espacialização das edificações do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 192

Figura 4.51 – Diagrama de cercas 3D de valores de Nspt do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 193

Figura 4.52 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 12 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 194

Figura 4.53 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 13 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 194

Figura 4.54 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 14 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 194

Figura 4.55 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 15 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 194

Figura 4.56 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 16 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 195

Figura 4.57 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 17 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 195

Figura 4.58 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 18 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 195

Figura 4.59 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 19 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 195

Figura 4.60 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 20 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 196

Figura 4.61 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 21 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 196

Figura 4.62 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 22 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 196

Figura 4.63 – Locação das estacas de interesse do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 197

Figura 4.64 – Seções verticais de Nspt do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 199

Figura 4.65 – Seções verticais de Nspt do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 200

Figura 4.66 – Diagrama de cercas 3D de Nspt do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 201

Figura 4.67 – Seção O-O' de capacidade de carga do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 202

Figura 4.68 – Seção 1-1' de capacidade de carga do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 204

Figura 4.69 – Seção 3-3' de capacidade de carga do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 205

Figura 4.70 – Seção horizontal de capacidade de carga a 16 metros de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 206

Figura 4.71 – Seção horizontal de capacidade de carga a 20 metros de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC". 207

Figura 4.72 – Boçoroca do Noroeste – Evolução – 2002 – 2011. 209

Figura 4.73 – Leque de deposição de sedimentos da Boçoroca do Setor Noroeste. 210

Figura 4.74 – Blocos de quartzitos exumados, próximo a estação de bombeamento da Caesb – Setor Noroeste de Brasília/DF. 211

Figura 4.75 – Metapelito crenulado muito alterado – Setor Noroeste de Brasília/DF. 211

Figura 4.76 – Nível centimétrico de óxido de manganês nos metapelitos crenulados – Setor Noroeste de Brasília/DF. 212

Figura 4.77 – Carta-Imagem (Ano 2004) – Setor Noroeste de Brasília/DF. 214

Figura 4.78 – Carta-Imagem (30 de Agosto de 2011) – Setor Noroeste de Brasília/DF.....215

Figura 4.79 – Carta Hipsométrica – Setor Noroeste de Brasília/DF. 216

Figura 4.80 – Resumo das classes hipsométricas – Setor Noroeste de Brasília/DF.....217

Figura 4.81 – Carta de Orientação de Vertentes – Setor Noroeste de Brasília/DF. 218

Figura 4.82 – Resumo das classes da carta de orientação de vertentes – Setor Noroeste de Brasília/DF. 219

Figura 4.83 – Carta de Declividade em porcentagem– Setor Noroeste de Brasília/DF. 220

Figura 4.84 – Resumo das classes da carta de declividade em porcentagem– Setor Noroeste de Brasília/DF. 221

Figura 4.85 – Medida de Classes da Carta de Uso e Cobertura do Solo (Ano 2004) – Setor Noroeste de Brasília/DF. 222

Figura 4.86 – Depósito de bota fora e pneus inservíveis próximo a estação de bombeamento da Caesb (Setembro 2009) – Setor Noroeste de Brasília/DF. 223

Figura 4.87 – Área degradada pela erosão (Setembro 2009) – Setor Noroeste de Brasília/DF. 223

Figura 4.88 – Construções abandonadas no bairro (Novembro 2009) – Setor Noroeste de Brasília/DF. 224

Figura 4.89 – Depósito de lixo urbano no meio da área de cerrado (Novembro 2009) – Setor Noroeste de Brasília/DF. 224

Figura 4.90 – Carta de Uso e Cobertura do Solo (Ano 2004) – Setor Noroeste de Brasília/DF. 225

Figura 4.91 – Resultado final da localização dos ensaios de campo no Setor Noroeste de Brasília.....227

Figura 4.92 – Localização da linha Norte-Sul de eletrorresistividade e sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF.....228

Figura 4.93 – Resultado do processamento da linha principal de eletrorresistividade e sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF.....230

Figura 4.94 – Resultado da interpretação geotécnica a partir dos resultados geofísicos de eletrorresistividade e sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF.....232

Figura 4.95 – Modelo 3D de resistividade elétrica (Ohm.m) – Setor Noroeste de Brasília/DF. 233

Figura 4.96 – Diagrama de cercas 3D de resistividade elétrica (Ohm.m) – Setor Noroeste de Brasília/DF. 234

Figura 4.97 – Disposição das linhas de eletrorresistividade no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF. 235

Figura 4.98 – Seção LN-1 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF. 236

Figura 4.99 – Registro fotográfico em trincheira aberta após a execução do ensaio geofísico na Seção LN-1 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF. 237

Figura 4.100 – Seção LN-2 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF. 238

Figura 4.101 – Seção LN-3 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF. 239

Figura 4.102 – Seção LN-4 de resistividade elétrica – Setor Noroeste de Brasília/DF..... 240

Figura 4.103 – Registro fotográfico de trincheira aberta próximo a Seção LN-4 de resistividade elétrica – Setor Noroeste de Brasília/DF. 240

Figura 4.104 – Seção LN-5 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF. 241

Figura 4.105 – Registro fotográfico próximo a Seção LN-5 de resistividade elétrica – Setor Noroeste de Brasília/DF. 241

Figura 4.106 – Seção LN-6 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF. 242

Figura 4.107 – Sondagem SPT próximo a Seção LN-6 de resistividade elétrica – Setor Noroeste de Brasília/DF. 243

Figura 4.108 – Diagrama *fence* 3D de sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF. 244

Figura 4.109 – Sondagem SPT inseridas no modelo de sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF..... 245

Figura 4.110 – Diagrama *fence* 3D de Nspt – Setor Noroeste de Brasília/DF. 246

Figura 4.111 – Diagrama *fence* 3D de Nspt com sobreposição do nível d'água – Setor Noroeste de Brasília/DF. 246

Figura 4.112 – Localização de três seções para modelagem de valores de Nspt e sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF. 247

Figura 4.113 – Seção A-A' de valores de sísmica de refração e Nspt– Setor Noroeste de Brasília/DF. 248

Figura 4.114 – Seção B-B' de valores de sísmica de refração e Nspt– Setor Noroeste de Brasília/DF. 249

Figura 4.115 – Seção C-C' de valores de sísmica de refração e Nspt – Setor Noroeste de Brasília/DF. 250

Figura 4.116 – Carta de nível d'água – Setor Noroeste de Brasília/DF. 251

LISTA DE ABREVIAÇÕES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

2 D	Duas dimensões
2,5 D	Duas dimensões e meia
3 D	Três dimensões
4 D	Quatro dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCII	*American Standard Code For Information Intercharge*
CA	Circulação de água
CAD	Desenho assistido por computador *(Computer Aided Design)*
cm	Centímetro (s)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Codeplan	Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central
CPT	Ensaio de Cone *(Cone Penetration Test)*
dxf	*Drawing Exchange File*
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
GPS	Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System*)
GRID	Grade regular
IDW	Inverso Ponderado da Distância (*Inverse Distance Weighted*)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
km	Quilômetro (s)
km^2	Quilômetro (s) quadrado (s)
m	Metro (s)
mm	Milímetro (s)
MNT	Modelo Numérico de Terreno
N	Norte
NA	Nível d'água
NBR	Norma Brasileira
Nspt	Número de golpes do SPT
PDOT	Plano Diretor de OrganizaçãoTerritorial
RN	Referência de Nível
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
S	Sul
SIG	Sistema de Informações Geográficas
Spring	Sistema para Processamento de Informações Geográficas
SPT	Ensaio de sondagem à percussão (*Standard Penetration Test*)
t	tempo
TH	Trado Helicoidal
TIFF	Tagged Image File Format
TIN	Rede de Triângulos Irregulares (*Triangular Irregular Network*)
UnB	Universidade de Brasília
UTM	Projeção Universal Transversa de Mercator *(Universal Transverse Mercator)*

Voxel	*Volume elementar*
W	Oeste (*West*)
X	Eixo Cartesiano X
x	Coordenada cartesiana x
Xmax	Coordenada máxima de x (UTM) na grade tridimensional
Xmin	Coordenada mínima de x (UTM) na grade tridimensional
Y	Eixo Cartesiano Y
y	Coordenada cartesiana y
Ymax	Coordenada máxima de y (UTM) na grade tridimensional
Ymin	Coordenada mínima de y (UTM) na grade tridimensional
z	Profundidade em metros (coordenada cartesiana z)
Z	Eixo Cartesiano Z
Zmax	Coordenada máxima de z (UTM) na grade tridimensional
Zmin	Coordenada mínima de z (UTM) na grade tridimensional

1- INTRODUÇÃO

O uso adequado do solo para a construção de obras civis necessita de conhecimentos específicos que envolvam as condições geotécnicas e ambientais de determinadas localidades. Brasília, Capital da República Federativa do Brasil, localizada no território do Distrito Federal, apresenta solos problemáticos em relação à capacidade de suporte em seu estado natural e compactado, conhecidos como solos porosos e colapsíveis, de forma que em quase toda a área urbana ocorre uma camada superficial de argila com baixa resistência ou capacidade de suporte.

O projeto de pesquisa Cartografia Geotécnica Tridimensional do Setor Noroeste de Brasília teve por objetivo mapear as condições geotécnicas da área onde se pretende implantar um novo bairro em Brasília, o Setor Noroeste. No inicio da tese a área em questão não possuía levantamentos geotécnicos detalhados que permitissem prever as dificuldades para a implantação urbana, notadamente as condições de fundações, de execução de obras enterradas e de implantação da rede de drenagem.

No entanto, para que os objetivos da pesquisa pudessem ser alcançados, foi necessário desenvolver mecanismos que subsidiassem os resultados esperados. Para isso, foram realizados três estudos de caso, referentes a projetos em grande escala (maiores que 1:2.000), com o intuito de aprimorar os métodos de espacialização tridimensional dos dados obtidos em campo. A justificativa para desenvolver esses estudos de casos torna-se evidente quando se quer medir o quanto os modelos podem ser úteis e confiáveis, além de medir o próprio fator de escala empregado nos modelos e suas consequências nos resultados obtidos.

A elaboração e utilização desses modelos tridimensionais, baseados em dados provenientes de levantamentos geotécnicos, geológicos e geofísicos, passaram a ganhar um bom espaço em obras de engenharia, principalmente em obras de fundações e escavações, e baseado nesse argumento, tomou-se como premissa para a pesquisa o que há de mais elementar em projetos de fundações. Primeiro conhecer quais são as solicitações (cargas) de projeto; segundo é estabelecer que modelo de sub-superfície (camadas de solo) será utilizado na solução de fundação a ser adotada.

Sabe-se que para solucionar os problemas citados, inúmeros métodos foram desenvolvidos para o cálculo e soluções de fundações. Contudo, nem mesmo o melhor dos métodos, aquele

que melhor se adapta ao solo local e as expectativas da obra, podem fugir da variabilidade natural do solo, de forma que explicar essa variabilidade torna-se um grande desafio para a engenharia geotécnica. Esse argumento torna-se o ponto chave da pesquisa, que propõe uma maneira, se não nova, mas eficiente de: organizar, tratar e espacializar, tanto bidimensionalmente quanto tridimensionalmente, dados de solo, com intuito de fornecer informações que ajudem no processo de tomada de decisão para obras de engenharia.

A pesquisa começou com a aquisição de dados de solo e rocha por meio de métodos indiretos (geofísica), e por meio de métodos diretos (sondagens). Após o processo de aquisição de dados passou-se para a etapa de tratamento dos dados e análise de projeto até a etapa de espacialização tridimensional de dados de solo/rocha. Um dado adicional foi usado nessa pesquisa a fim de medir a qualidade dos modelos tridimensionais, trata-se do uso de provas de carga, que reduziu satisfatoriamente as incertezas sobre o que era a real condição de execução e posterior comportamento estrutural das fundações em campo, infelizmente não foi possível obter dados de provas de carga para todos os estudos, mas foi possível vislumbrar nos modelos a importância desse tipo de ensaio para obras de fundações.

Ao final, mostram-se os produtos obtidos a partir da espacialização tridimensional dos dados por meio da metodologia proposta. A pesquisa mostra que ao contrário de métodos tradicionais, a interpolação de dados durante o processo de modelagem tridimensional diminui as incertezas provenientes da variabilidade natural do solo.

1.1- OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver uma metodologia para reunir, organizar, e desenvolver técnicas para a espacialização tridimensional de dados de investigação geotécnica e geofísica, coletados dos relatórios de sondagem SPT e nos levantamentos geofísicos (sísmica de refração e resistividade elétrica), tendo como objetivos mais específicos utilizar ferramentas tradicionais de mapeamento cartográfico, definir a escala de trabalho de acordo com os estudos apresentados na pesquisa, usar o Sistema de Informação Geográfica (SIG) nas análises de resultados, usar métodos diretos e indiretos de investigação de campo e por fim gerar modelos tanto bidimensionais quanto tridimensionais dos resultados obtidos e pertinentes à fase de modelagem desta pesquisa. Para facilitar a visualização do fluxo de trabalho, cada item dos objetivos está esquematizado na Figura 1.1.

Observa-se na Figura 1.1 que os três primeiros objetivos específicos da pesquisa não são atualmente nenhuma novidade quando se trata de mapeamento cartográfico. O quarto item dos objetivos também é bastante conhecido apesar de alguns métodos de investigação ainda serem pouco utilizados na maioria das obras de engenharia, entretanto, quando se trata de integração de dados com o objetivo de aplicar os resultados especificamente em obras de engenharia, o discurso passa a ser mais interessante, uma vez que a integração desses dados em um ambiente computacional que permite a visualização tridimensional e trabalho dessas informações de forma integrada ainda não é algo considerado como prática habitual na engenharia civil/geotécnica.

Portanto, de forma resumida, integrar esse conjunto de dados obtidos e interagir com os mesmos, de forma a extrair informações importantes dos modelos para os objetivos da obra, passou a ser o verdadeiro objetivo da pesquisa.

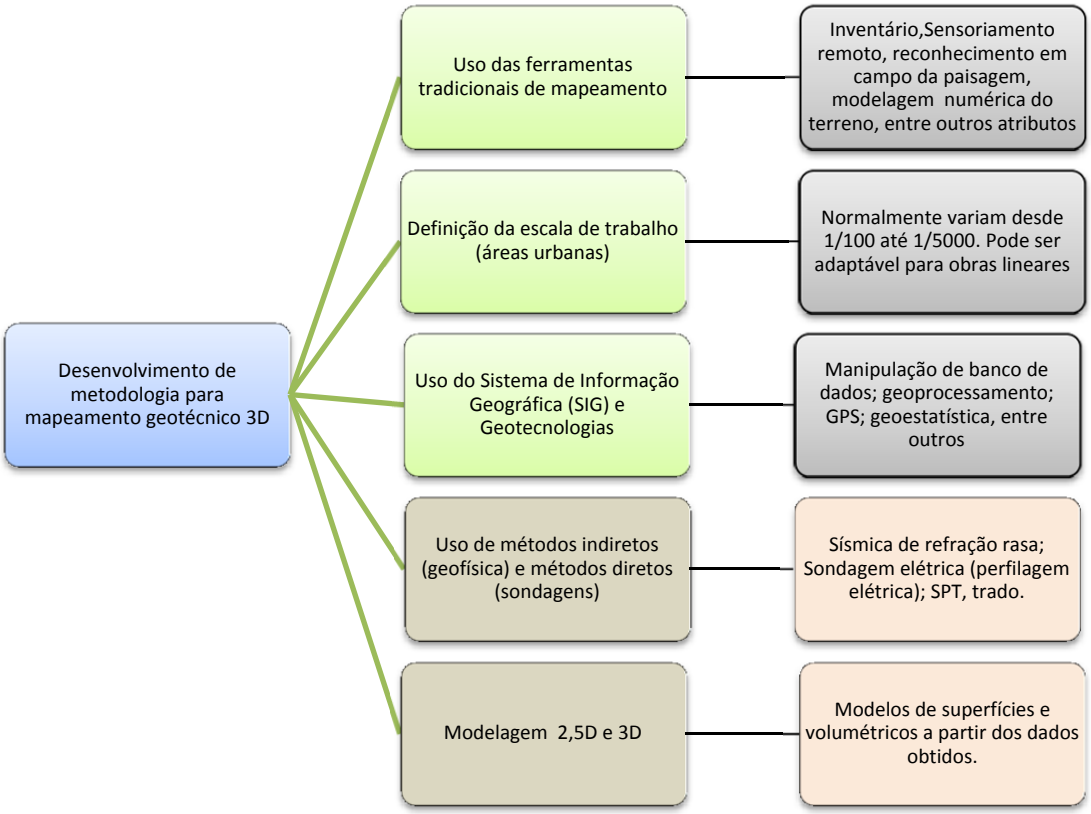


Figura 1.1 – Objetivos específicos da pesquisa.

1.2- BREVE DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

As áreas de estudo desta pesquisa estão descritas de acordo com os estudos de caso apresentados, além do Setor Noroeste de Brasília. Na Figura 1.2 estão identificados os locais estudados em que se pode notar, na referida figura, que dos quatro estudos realizados, três

estão na área tombada de Brasília, que é basicamente a área relativa ao plano piloto, o outro ponto, marcado como Verano-Blanc, está localizado na cidade satélite conhecida como Guará II. O Setor Noroeste de Brasília é talvez a última região dentro do plano piloto de Brasília a ser construído, a implantação do bairro começou no ano de 2010 e vem sofrendo várias intervenções da justiça desde a sua concepção como bairro até a implantação do mesmo. O bairro tem estimativa de construir 210 projeções residenciais e 62 blocos comerciais.



Figura 1.2 – Localização simples das áreas de estudo da pesquisa.

1.3- ESCOPO DA TESE

Para atingir os objetivos traçados na seção anterior, a tese organizou-se em cinco capítulos, descritos sucintamente de acordo com o conteúdo de cada um.

O Capítulo 1 até aqui descrito, contém a introdução, objetivos, breve caracterização e localização da área de trabalho e escopo da tese.

O Capítulo 2 contém a revisão bibliográfica a respeito de: conceitos sobre cartografia, cartografia geotécnica para áreas urbanas, sistema de informação geográfica (SIG), métodos geofísicos, métodos geotécnicos (sondagens SPT), métodos de interpolação de dados, modelagem tridimensional.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos empregados na pesquisa. Informações sobre os materiais são resumidas, seguidas pelo detalhamento das metodologias de aquisição e tratamento dos dados, desenvolvimento do banco de dados digital, escolha das áreas de estudo (estudo de caso) para análises geoestatísticas e as técnicas de modelagem bidimensional (2D), pseudo-tridimensional (2,5D) e tridimensional (3D) dos parâmetros obtidos dos relatórios de sondagem SPT, sísmica e eletrorresistividade.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos: banco de dados digital, cartas de localização dos furos de sondagem, cartas hipsométricos, cartas de localização de seções de interesse, modelos 3D de camadas de solo, modelos 3D de N_{SPT}, modelos 2,5D de superfícies de interface de cada camada de solo.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões inerentes aos assuntos tratados nos capítulos anteriormente descritos, como também estão presentes algumas sugestões para pesquisas futuras.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no decorrer da pesquisa e os apêndices.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- CONCEITOS BÁSICOS DE CARTOGRAFIA

A cartografia é a arte de conceber, de levantar, de redigir e de divulgar os mapas (Joly, 1917).

A Associação Cartográfica Internacional (ICA – *International Cartography Association*), por meio de uma comissão para a formação de cartógrafos, em Paris – França, conceituou o termo cartografia como "o conjunto dos estudos e das operações científicas, artísticas e técnicas que intervêm a partir dos resultados de observações diretas ou da exploração de uma documentação, em vista da elaboração e do estabelecimento de mapas, planos e outros modos de expressão, assim como de sua utilização" (ICA, 1966).

Um mapa, por sua vez, é uma representação geométrica plana, simplificada e convencional, do todo ou de parte da superfície terrestre, numa relação de semelhança conveniente denominada escala. Um mapa dá uma imagem incompleta do terreno, ele nunca é uma reprodução tão fiel quanto pode sê-lo e por isso pode-se dizer que o mais detalhado dos mapas é apenas uma simplificação da realidade (Joly, 1917).

Ainda, segundo Joly (1917), essas considerações acentuam a importância primordial da escala do mapa. Segundo o autor, é mais que uma simples relação matemática, a escala é um fator de aproximação do terreno cheio de significado científico e técnico. A escala tanto pode influenciar no nível de análise em função do espaço a cobrir e dos detalhes a atingir quanto pode influenciar na precisão, legibilidade, boa apresentação e na eficiência do mapa. Quanto menor for a escala, mais severa é a seleção e mais abstrata a simbologia, e por isso, resolver esse problema torna-se o objetivo da generalização, que aumenta ainda mais o caráter esquemático e convencional da representação cartográfica.

Nogueira (2009) argumenta que se os mapas são modelos da realidade e a realidade é vista de maneira individual, então eles são subjetivos e não podem ser considerados como retrato da realidade ou a própria realidade reduzida.

O fato é que a cartografia encontra-se no curso de uma longa e profunda revolução, iniciada em meados do século passado, e que com a evolução tecnológica novos elementos surgiram para alavancar esse processo, como por exemplo, o emprego de fotografia aérea e o sensoriamento remoto, métodos de gravação e impressão e, mais recentemente, o emprego de

computadores e o Sistema de Informação Geográfica (SIG), vieram alterar profundamente a forma como os dados geográficos são adquiridos, processados e representados, bem como o modo como os interpretamos e exploramos (Nogueira, 2009).

2.2- CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA (IAEG, 1976)

O mapeamento geotécnico iniciou e desenvolveu-se por meio da cooperação entre geólogos e engenheiros na construção de grandes obras de engenharia. Os primeiros mapas pouco diferenciavam dos mapas estruturais, tectônicos e lito-estatigráficos comuns. Gradualmente a exigência crescente por parte dos engenheiros de mais dados geológicos, guiou o aparecimento dos primeiros textos explicativos, aumentando a legenda e finalizando nos mapas geológicos atuais com mais informações específicas no aspecto técnico do fenômeno geológico e sua interpretação ligada à engenharia (Souza, 2004).

Uma carta geotécnica mostra a distribuição e relação espacial de certos componentes básicos da geotecnia, pode simplesmente refletir a história como também a dinâmica do desenvolvimento das condições geotécnicas, permitindo prognosticar a influência do ambiente na obra, como também prever em qual aspecto a obra interferirá com o ambiente. Evidentemente tais mapas não podem substituir uma investigação detalhada local, mas poderão auxiliar no projeto racional da investigação local e na interpretação dos resultados.

As cartas podem servir somente a certas finalidades específicas, ou podem apresentar um extenso propósito de múltiplas finalidades necessárias para resolver problemas mais gerais. Elas podem ser úteis nas primeiras etapas do planejamento, como também nos estágios finais dos projetos de engenharia.

2.2.1- PRINCÍPIOS DA CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

Os principais fatores criadores da condição geotécnica são: a rocha e solo, água, condição geomorfológica e fenômeno geodinâmico. Um mapa fornece uma melhor ideia de um ambiente geológico quando inclui o caráter e a variação das condições geotécnicas, seus componentes individuais e suas interelações. Entretanto, mapas são modelos simplificados dos fatos e a complexidade dos vários fatores geológicos nunca poderá ser inteiramente representadas. O grau de simplificação depende principalmente da finalidade e escala do mapa, da importância relativa dos fatores geotécnicos específicos ou relacionados, da precisão das informações e técnicas de representação usada (IAEG, 1976).

Um mapa geotécnico deve satisfazer as seguintes exigências:

- Retratar as informações objetivas necessárias para avaliar as características geotécnicas relativas ao planejamento regional, à seleção do lugar e ao método mais adequado de construção.

- Fazer o possível para prever as variações na situação geológica induzida pelo empreendimento proposto e para sugerir medidas preventivas necessárias.

- Apresentar informações de forma a facilitar o entendimento por profissionais que o usarão, os quais podem não ser geólogos. Cartas geotécnicas podem ser baseadas nas cartas geológicas, hidrogeológicas e geomorfológicas, mas devem apresentar e avaliar os fatos básicos fornecidos por estas cartas em termos de Geotecnia (Souza, 2004).

2.2.2- CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA PARA ÁREAS URBANAS

Um ponto fundamental a ser levado em consideração a respeito de cartografia geotécnica é a diferenciação entre as expressões cartografia geotécnica e mapeamento geotécnico. A diferença fica evidenciada na medida em que se compreende mapeamento geotécnico como o processo que contém em si toda a técnica necessária para obtenção da carta geotécnica, ao passo em que a expressão cartografia geotécnica constitui a representação gráfica dos produtos do mapeamento.

O mapeamento geotécnico tem sido usado nos mais diferentes países como uma ferramenta que ajuda a definir e fiscalizar a ocupação territorial das regiões, de uma maneira tecnicamente ajustada, respeitando as áreas de interesse ambiental e as condições necessárias para que a população as desfrute sem alterar suas condições básicas de vida (Matula, 1979).

Na definição proposta por Zuquette (1987), mapa ou carta geotécnica é a representação gráfica na qual são avaliados todos os componentes de um ambiente geológico de particular interesse para o planejamento, projeto e construção civil. Zuquette (1987) e Rêgo (1997) comentam em suas pesquisas que no Brasil, a aplicação dos trabalhos pioneiros que tratam da metodologia de mapeamento geotécnico ou similar teve seu inicio nas décadas de 60 e 70. A extensão territorial do país, a realidade sócio-econômica, a carência de dados básicos sobre o meio físico e a carência de planos diretores levaram à necessidade da produção de uma metodologia que propusesse técnicas simples, baratas e objetivas; que não exigissem uma

equipe numerosa de profissionais especialistas, e que utilizasse ao máximo os dados existentes.

Dearman (1991) diz que mapeamento urbano é geralmente feito com escalas médias, ou sejam, escalas variando de 1/100.000 até 1/10.000. Acentua que estes limites estão vinculados às condições de uso e cobertura do solo, como uma possível atividade de construção em terrenos com restrições diversas, que exijam informações suficientes para o estudo de viabilidade e implantação de tal atividade. Nesse caso, a escala deve ser adequada para tais propósitos, podendo variar de 1:5.000 até 1:1.000, e mais severamente podem-se utilizar escalas ainda maiores, na ordem de 1:500 ou até mesmo 1:100.

A elaboração de cartas geotécnicas é mais frequente para o ambiente urbano, visando subsidiar a definição do direcionamento da expansão urbana. O mapeamento geotécnico, de acordo com Romão & Souza (1996), auxilia no planejamento da ocupação do meio físico, amenizando os impactos ambientais provenientes da ação antrópica. São outras possibilidades de aplicação do mapeamento geotécnico: orientação de anteprojetos de grandes obras de engenharia (projetos de urbanização, barragens, estradas, linhas de transmissão de energia), assim como a avaliação dos impactos causados por essas obras; localização de depósitos de rejeitos; definição de áreas a serem preservadas para proteção de recursos hídricos, entre outras possibilidades.

2.2.3- DEFINIÇÃO DE UMA CARTA GEOTÉCNICA (IAEG, 1976)

Uma carta geotécnica é um tipo de mapa geológico, que fornece uma representação generalizada de todos os componentes do ambiente geológico de significado no planejamento do uso da terra, e em projetos, construção e manutenção aplicada a obras civis e de mineração.

As feições geológicas representadas nas cartas geotécnicas são:

Caráter das rochas e solos, incluindo sua distribuição, arranjo estratigráfico e estrutural, idade, gênese, litologia, estado físico e suas propriedades mecânicas e físicas.

Condições hidrogeológicas, incluindo a distribuição da capacidade de água no solo e rochas, zonas de saturação em descontinuidades abertas, profundidade do nível de água e suas variações flutuantes, regiões de água confinada e níveis piezométricos, coeficiente de

estocagem, direção de fluxo, fontes, rios, lagos e o limite e intervalo de ocorrência de enchentes, pH, salinidade e corrosividade.

Condições geomorfológicas, incluindo superfície topográfica e elementos importantes da paisagem.

Fenômeno geodinâmico, incluindo erosão e deposição, fenômeno eólico, *permafrost*, movimentos de encostas, formação de condições cársticas, subsidência, variação no volume do solo, dados de fenômeno sísmicos (inclusive falhas ativas), movimentos tectônicos regionais correntes e atividades vulcânicas.

2.2.4- PRINCÍPIOS DE CLASSIFICAÇÃO DE ROCHAS E SOLOS PARA CARTAS GEOTÉCNICAS (IAEG, 1976)

As unidades de uma carta geotécnica são caracterizadas por certo grau de homogeneidade nas propriedades geotécnicas básicas. O principal problema no mapeamento geotécnico é determinar as características geológicas da rocha e solo que sejam estreitamente relacionadas com as propriedades físicas, tais como resistência, deformabilidade, durabilidade, permeabilidade, que são importantes na geotecnia.

Este problema se dá pela falta de dados sobre a variabilidade regional das propriedades das rochas e solo e por não existirem métodos e técnicas para a determinação rápida e de baixo custo capaz de fornecer dados em quantidades suficientes. Por esta razão se usam algumas propriedades geológicas que melhor indiquem as características geotécnicas e físicas:

- Composição mineralógica, estreitamente relacionada à densidade específica, limites de Atterberg e índice de plasticidade;

- Características estruturais e texturais, relacionadas ao peso específico, tais como distribuição granulométrica e porosidade.

- Umidade, grau de saturação, consistência, fissuração, grau de intemperismo e de alteração, relacionados com o estado físico dos solos e rochas e indicam propriedades de resistência, característica de deformação, permeabilidade e durabilidade.

Classificação baseada na litologia e modo de origem:

I. Suíte Litológica (L.S.): compreende muitos complexos litológicos desenvolvidos sob condições tectônicas e paleogeográficas, no geral, similares. Somente algumas propriedades geotécnicas gerais podem ser definidas. São usadas em mapas de pequena escala.

II. Complexo Litológico (L.C.): compreende um grupo de tipos litológicos geneticamente relacionados, desenvolvidos sobre condições geotectônicas e paleogeográficas específicas. Em cada complexo o arranjo espacial do tipo litológico é uniforme e distinto, mas um complexo litológico não é necessariamente uniforme em seu estado físico e características litológicas. Não é possível definir propriedades mecânicas e físicas para todo o complexo, mas somente fornecer dados dos tipos litológicos individuais e indicar o comportamento geral do complexo. Usual em mapas de escalas pequena e média.

III. Tipo Litológico (L.T.): é homogêneo em relação a composição, textura e estrutura, mas usualmente não é uniforme no estado físico. Somente uma ideia geral das propriedades de engenharia pode ser apresentada. Usuais em mapas de grande escala e, onde possível, em de média escala.

IV. Tipo Geotécnico (G.T.): tem um alto grau de homogeneidade física. Apresenta uniformidade na litologia e no estado físico. São caracterizados por valores determinados estatisticamente a partir de determinações individuais de propriedades mecânicas e físicas. Usual em mapas de grande escala.

2.2.5- CONDIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS (IAEG, 1976)

Mapeamento geomorfológico é auxiliar na explicação da história recente do desenvolvimento da paisagem, tal como a formação dos vales, terraços, configuração das encostas e os processos operantes na paisagem atual. Este é parte essencial no mapeamento geotécnico, e pode ser realizado rapidamente e a um baixo custo, sendo frequentemente um fator decisivo no planejamento das investigações geotécnicas.

A apreciação das condições geomorfológicas num mapeamento geotécnico pode ser mais do que uma simples descrição da superfície topográfica. Pode-se incluir uma explanação das relações entre condições de superfície e a situação geológica; a origem, desenvolvimento e idades dos elementos geomorfológicos individuais; a influência das condições geomorfológicas na hidrologia e processos geodinâmico. É importante a previsão de ameaças

às feições geomorfológicas, tais como a erosão lateral das margens dos rios, movimento de dunas, colapso em zonas cársticas ou áreas enfraquecidas, pela mineração.

Superfície topográfica é mostrada por meio de curvas de nível, e atualmente por meio de modelagem numérica de terreno (MNT) que é a representação computacional do relevo, realizada com auxilio dos computadores, em cartas de todas as escalas. Símbolos pontuais são usados para indicar elementos geomorfológicos em cartas de pequena escala. Em cartas de média e grande escala, se pode representar os atuais limites e detalhes das feições geomorfológicas.

2.2.6- PRINCÍPIOS DO ZONEAMENTO GEOTÉCNICO

Segundo Dearman (1991), cartas geotécnicas sintéticas podem apresentar informações em termos de zoneamento geotécnico. Estas são áreas individualizadas nas cartas e que são aproximadamente homogêneas em termos de condições geotécnicas. O detalhe e o grau de homogeneidade de cada unidade geotécnica dependem da escala e finalidade da carta. Numa carta de zoneamento para finalidade geral, as seguintes unidades territoriais naturais taxonômicas podem ser reconhecidas:

I. Região: baseada na uniformidade dos elementos estruturais geotectônicos individuais.

II. Área: baseados na uniformidade das unidades geomorfológicas regionais.

III. Zonas: baseadas na homogeneidade litológica e no arranjo estrutural do complexo formado pelas litofácies de rochas e solos.

IV. Distritos: onde as condições hidrogeológicas e os fenômenos geodinâmicos são uniformes.

Por este caminho as características de um território podem ser definidas por zoneamento, que por sua vez, pode ser usado para avaliar a complexidade das condições geotécnicas.

Uma carta de zoneamento geotécnico de finalidade especial pode ser preparado com um tipo de interesse específico, por exemplo: estradas, barragens, túneis, ocupação urbana. Em tais mapas as unidades de zoneamento devem ser baseadas na análise dos fenômenos geológicos e nos parâmetros geotécnicos, avaliados em termos de finalidade geotécnica particular.

2.3- TÉCNICAS PARA AQUISIÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS

Um mapa geológico é base fundamental para o mapeamento geotécnico, considerando-se sempre que, naqueles mapas, as rochas com propriedades geotécnicas marcadamente diferentes podem ser agrupadas como uma unidade única, por terem a mesma idade e origem. Assim para acrescentar as informações necessárias ao mapeamento geotécnico, deve-se fazer uso de técnicas e métodos específicos. A dificuldade principal, independente da técnica usada, é que as variações das características da rocha e do solo, frequentemente gradacionais, podem ocorrer tanto na vertical como na horizontal (Dearman, 1991).

2.3.1- MÉTODOS GERAIS DE MAPEAMENTO GEOLÓGICO - PREPARAÇÃO DO MAPA BASE TOPOGRÁFICO E AQUISIÇÃO DE INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS

Quando o local a ser mapeado não possui um mapa base topográfico, ou este está em escala menor do que a necessária para o trabalho de campo, um mapa topográfico deverá ser feito especialmente para o trabalho e servir como uma base para o mapa geológico (Dearman, 1991).

O trabalho exigido na obtenção das informações geológicas para a preparação de um mapa geotécnico segue um padrão, compreendendo um determinado número de estágios. Inicialmente se procuram as informações geológicas existentes, suplementadas por estudo de mapas e aerofotos existentes. Seque-se um reconhecimento da área na qual são avaliadas evidências e novas informações geológicas, geomorfológicas e geodinâmicas são reunidas. Finalmente, podem-se avaliar aspectos gerais ou específicos de um local de construção, baseado em trabalhos de campo, envolvendo variadas investigações de campo e ensaios laboratoriais e *in situ* (Dearman, 1991).

2.3.2- MAPEAMENTO DE ROCHAS E SOLOS PARA FINALIDADE DE ENGENHARIA (IAEG, 1976)

O resultado de uma investigação geotécnica deverá produzir um mapa no qual as unidades são definidas por propriedades de engenharia. Em geral os limites das unidades seguem os limites litológicos, mas as propriedades de engenharia não apresentam relações com os limites estratigráficos ou estruturais.

A seleção de um método apropriado para traçar os limites das unidades mapeadas no campo depende da finalidade para a qual o mapeamento está sendo realizado. Por sua vez, a

finalidade dita a escala e esta define a taxonomia básica. Os métodos usados para limitar e caracterizar cada unidade de mapeamento ou taxonômica básica são:

I. Suíte litológica: a interpretação dos mapas geológicos existentes, mapeamento de reconhecimento e fotogeologia. A avaliação do provável comportamento rochoso, com base no conhecimento das propriedades e dos tipos rochosos.

II. Complexo litológico: mapeamento da área com análise da fácies para o grupo geneticamente relacionado ao tipo litológico. Investigação geofísica, amostragem e sondagem sistemática no campo. Ensaio "*in situ*". Ensaios das propriedades e índices físicos em laboratório ou laboratório de campo. Investigação petrográfica e avaliação do comportamento rochoso com base no conhecimento das propriedades dos tipos rochosos conhecidos.

III. Tipo litológico: mapeamento e investigação petrográfica detalhada. Ensaios geofísicos de campo. Determinação sistemática das propriedades índices em laboratório. Ensaios de laboratório e "*in situ"* das propriedades mecânicas das rochas e outras propriedades.

IV. Tipo geotécnico: investigação detalhada do estado físico das massas de solo e rocha. Teste "*in situ*" das propriedades mecânicas das rochas e outras propriedades. Ensaios sistemáticos em laboratório das propriedades físicas e mecânicas.

2.3.3- FOTOINTERPRETAÇÃO

A fotointerpretação é um importante auxílio para os estudos geotécnicos, pela sua rapidez, custo relativamente baixo, e por ser um método preciso para a primeira avaliação de uma grande área. A escala adotada em fotos aéreas é usualmente entre 1:8.000 (escala usada em bases cartográficas na escala 1:2000) e 1:60.000 (escala usada para base cartográfica na escala 1:100.000) é essencial que os resultados do serviço de geologia sejam suplementados por observações do terreno em locais selecionados.

2.3.4- MAPEAMENTO COM GEOFÍSICA - MEDIDAS DE RESISTIVIDADES

O método baseia-se na medida da resistividade elétrica do terreno, a qual depende primariamente da porosidade, fraturamento, grau de saturação e a salinidade da água dos vazios. Para que o método funcione efetivamente é preciso um bom contraste entre as propriedades físicas.

2.3.5- MAPEAMENTO COM GEOFÍSICA - MEDIDAS SÍSMICAS

Densidade e módulo de deformação das rochas e solos determinam a velocidade de transmissão das ondas sísmicas através deste meio.

A técnica de refração é usada para determinar a profundidade dos diferentes níveis de refração, por exemplo: topo ou base da zona intemperizada e depende de haver um crescimento da velocidade com a profundidade.

2.3.6- MAPEAMENTO COM SONDAGENS E TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM

A sondagem é entendida como fornecedora de amostras deformadas e indeformadas de rochas e solos, ou fornecedora de um furo para testes "*in situ*" e a instalação de instrumentos no terreno. Uma variedade de métodos é necessária, incluindo sondagens rotativas, percussão e outras. As amostras devem ser, tanto quanto o possível, verdadeiramente representativas das condições do terreno e devem ser retiradas, acondicionadas e transportadas dentro das normas existentes. É recomendado, como condição mínima, obter amostras indeformadas para cada litologia.

2.4- APRESENTAÇÃO DOS DADOS EM CARTAS GEOTÉCNICAS

O conteúdo da carta geotécnica e a quantidade de dados das condições geotécnicas são baseados na finalidade e na escala da carta. É conveniente ter em mente a finalidade da carta geotécnica, a elaboração da carta geotécnica deve seguir princípios gerais independente do fato de que cartas de diferentes escalas serem realizadas para resolver problemas de diferentes tipos. Isto tornará possível comparar diretamente cartas realizadas em uma mesma escala para áreas diferentes e a produção, por exemplo, de cartas de média a pequena escala a partir de cartas de grande escala, sem necessidade de qualquer mudança radical.

2.4.1- REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL EM CARTAS

Devido às estruturas de engenharia terem influência na sub-superfície e, frequentemente estenderem-se para baixo da superfície do terreno ou serem construídas abaixo da superfície, é desejável a representação em três dimensões em mapas ou cartas geotécnicas. Nenhum método usado deve saturar as cartas até o ponto da ilegibilidade.

2.4.2- SEÇÕES CRUZADAS GEOTÉCNICAS

Seções cruzadas são adendos necessários a todos os principais tipos de cartas geotécnicas. O número e a direção das seções cruzadas são escolhidos, de acordo com a geomorfologia e a estrutura geológica, para ilustrar as relações entre os componentes das condições geotécnicas. Todas as informações apresentadas numa carta também deverão ser mostradas na seção cruzada. O grau de detalhe deve corresponder ao detalhe mostrado na carta.

2.5- ATRIBUTOS

Segundo Zuquette (1987), atributos são as qualidades pertinentes aos componentes do meio físico e que são utilizados para caracterizá-los. Para a IAEG (*International Association for Engineering Geology and the Environment*) atributos são qualidades ou propriedades inerentes de alguma coisa (IAEG, 1976). Para Ferreira (1975) atributos são características, qualitativas ou quantitativas, que identificam um membro de um conjunto observado.

Para obtenção dos atributos deve-se proceder a uma análise da forma e validade das observações por meio de:

- Observações qualitativas: são obtidas em superfície e/ou em sub-superfície (poços, galerias ou similares). Podem ser semânticas e pragmáticas.

- Observações quantitativas: obtidas por análise de campo, sondagens e ensaios sobre amostras deformadas e indeformadas (prevalece o uso das deformadas). Tais informações são numéricas e gráficas.

- Amostragem: considerando-se os limites da Tabela 2.1 –.

- Áreas chaves: representam melhor e de maneira mais completa as variações (vertical e horizontal) da área maior.

- Extrapolação - valores ou informações devem ser creditadas a uma área e não a situações pontuais, observando-se: compatibilidade das características obtidas quantitativamente; as deficiências existentes; validade dos índices básicos; grau de similaridade; apresentação de ressalvas quanto a origem geológica e condições climáticas; e a experiência do profissional.

- Interpolação - devem-se verificar as seguintes limitações: distância, homogeneidade; tipificação e seleção de atributos; objetividade; escala.

Tabela 2.1 –Número mínimo de observações (Zuquette, 1987).

Finalidade do mapeamento geotécnico	Escala	NÚMERO MÍNIMO DE PONTOS OBSERVADOS POR km²						Áreas chaves (mín. 10km²)	
		Atributos							
		Qualitativos				Quantitativos			
		Metamórficas e Ígneas		Sedimentares		Geral		Escala	Pontos Observados por km²
Básico	1:250.000	1/10	Distância entre os pontos observados (m) 3162	1/10	Distância entre os pontos observados (m) 3162	1/10	Distância entre os pontos observados (m) 3162	1:50.000	1/1
Regional	1:100.000	4/10	1581	3/10	1825	2/10	2236	1:25.000	4/1
	1:50.000	6/5	912	1/1	1000	3/10	1825		
	1:25.000	3/1	577	2/1	707	1/10	1000		
Detalhe	1:25.000	5/1	447	4/1	500	4/10	500		
	1:10.000	15/1	258	15/1	258	10/1	316		
	1:5.000	25/1	200	20/1	223	15/1	258		
	1:2.000	40/1	158	35/1	169	25/1	200		

2.6- CARTAS DERIVADAS – MÊCANISMOS DE ELABORAÇÃO (Zuquette, 1987)

As cartas derivadas são documentos gráficos elaborados a partir do conhecimento e registros dos componentes de meio físico (fundamentais básicos), normalmente registrados em mapas por um conjunto de atributos, com diferentes finalidades e destinadas aos usuários para orientar as diferentes fases de processos diversos, tais como: zoneamento de eventos perigosos, zoneamento ambiental, orientação e planejamento de investigações geológico-geotécnicas específicas e detalhadas, entre outros.

As cartas derivadas podem ser elaboradas por diferentes mecanismos utilizando recursos manuais (gráficos, mesas de luz, entre outros) e/ou automatizados (SIGs, CADs, entre outros). Deve-se ressaltar que os documentos básicos devem ser elaborados por meio da avaliação de atributos dos componentes do meio ambiente (meio físico, meio biótico e meio antrópico) considerando uma amostragem representativa, ensaios laboratoriais adequados e uma metodologia segura para controlar as interpolações e extrapolações.

É fundamental que os mecanismos utilizados possibilitem a elaboração de cartas derivadas e que registrem informações e suas variações de tal forma que os usuários possam avaliar os seguintes pontos quanto ao comportamento do meio físico de cada região:

- A natureza probabilística dos eventos naturais.

- Grau de significância das informações geológico-geotécnicas contidas nos documentos gráficos.
- As variações possíveis de ocorrer no tempo e espaço.
- Objetivos múltiplos do vetor em análise.
- Separar fatos e valores, principalmente, quando são analisados os processos naturais.
- Custo, tempo e rendimento em relação à ocupação em análise.
- Validade das análises.
- Seleção lógica dos atributos que devem ser considerados para um determinado fim ou na análise de um problema em desenvolvimento.
- Avaliação do grau de generalização tipológica e cartográfica para cada atributo ou para o documento cartográfico.

2.6.1- CARTA DE FUNDAÇÕES (Dearman, 1991)

São vários os objetivos e recomendações para a elaboração de uma carta de fundações, dentre eles podem-se destacar alguns, tais como:

- Orientar investigação local, para projeto de fundações;
- Tipos de fundações;
- Diminuir: custos, tempo e número de situações à estudar;
- Capacidade de carga/recalque;
- Fornecer valores de capacidade de carga pode induzir à erros;
- Informações pontuais, análise por área;
- Dados quantitativos devem ter fontes citadas e/ou justificadas;

- Análise deve ser dividida por níveis de profundidade, onde os valores dos níveis dependem do objetivo da análise, por exemplo, projeto de garagens subterrâneas, túneis, subsolo de edifícios, entre outros;

- Para cada nível: seleção de tipo de fundação;

- Para 1° nível, fundações superficiais, para os demais fundações profundas.

Dentre os atributos, podem-se destacar:

- Material inconsolidado ao longo do perfil. Considerar: textura, espessura, compacidade, capacidade de carga, camadas compressíveis/ colapsíveis, camadas endurecidas, presença de matacões.

- Substrato Rochoso. Considerar: tipo rochoso, profundidade, litologia, resistência, estruturas, alterabilidade.

- Condições hidrogeológicas. Considerar: profundidade do nível dágua, áreas de acúmulo d'água.

2.6.2- CARTA DE ESCAVABILIDADE (Dearman, 1991)

A carta de escavabilidade tem por objetivo apresentar as condições de escavabilidade dos terrenos, seja para obras enterradas ou para outras finalidades. Os materiais (dentre os mais comuns: solo e rocha) devem ser considerados em classes segundo a facilidade de serem escavadas, condições de escavação e equipamento exigido.

Os atributos a serem levados em consideração são:

- Material Inconsolidado. Considerar: origem, profundidade, variação com a profundidade, presença de matacões, camadas compressíveis ou endurecidas, textura, características físicas, compacidade, resistência mecânica;

- Substrato Rochoso. Considerar: tipo rochoso, profundidade, litologia, resistência, estruturas, fraturamento, alterabilidade;

- Condições hidrogeológicas. Considerar: profundidade do nível dágua, áreas de acumulo d'água, escoamento superficial;

- Condições geomorfológicas. Considerar: declividade, formas das encostas;

- Fatores antrópicos: Sistema viário (condições de acesso), valor das terras, tendência de crescimento.

2.7- MÉTODOS GEOFÍSICOS

A ciência geofísica, conhecida como geofísica de exploração, nasceu em 1920, acompanhando o sucesso dos métodos de prospecção elétricos desenvolvidos pelos irmãos Conrad e Marcel Schlumberger na França, e o método de sísmica de refração nas descobertas de poços de petróleo nos Estados Unidos da América (EUA) por Karcher, Mintrop e outros pioneiros (*Engineering Geophysics*, 1988).

Apesar de no inicio, grande parte dos recursos econômicos, gastos com investigações geofísicas, estarem voltados para a indústria do petróleo e da mineração, no ano de 1982 foi registrado um forte aumento de gastos econômicos na engenharia civil com investigações geofísicas, principalmente com a sísmica de refração. Como a maioria das obras de engenharia civil raramente passam de 100 m de profundidade a serem investigados, os equipamentos sofreram forte adaptação tornando-se, sobretudo, leves e portáteis. A maior diferença entre as aplicações geofísicas na engenharia, principalmente entre geofísica de exploração mineral e geofísica para a engenharia civil, é que a primeira está preocupada em detectar e determinar certa quantidade de recursos econômicos (mineral) e a segunda está preocupada com a avaliação das camadas de solo/rocha e a capacidade que as mesmas têm de sustentar certa estrutura ou construção civil (*Engineering Geophysics*, 1988).

Os métodos geofísicos podem ser divididos, a grosso modo, em dois grupos, ativos e passivos. Métodos passivos envolvem a detecção e medição precisa de variações nos campos naturais, tais como campos gravitacional e magnético da Terra, a fim de localizar e delinear suas características. Com os métodos ativos, alguma forma de energia é direcionada para o solo (chão na linguagem popular), ou estrutura de engenharia e do retorno de sinais ou campos resultantes são medidos em locais adequados. A maioria dos métodos, tais como sísmica, resistividade elétrica e métodos eletromagnéticos vai se enquadrar nesta segunda categoria (McDowell *et al*., 2002).

Luiz & Silva (1995) explicam que a base da geofísica de prospecção é a investigação de feições da sub-superfície de dimensões relativamente pequenas, a partir da observação de seus

efeitos nos campos físicos e na propagação de ondas. Portanto, os métodos geofísicos são, em sua maioria, técnicas indiretas de investigação das estruturas de subsuperfície por meio da aquisição e interpretação de dados instrumentais, caracterizando-se, assim, como métodos não invasivos ou não destrutivos.

Portugal (2006) explica, sob outro ponto de vista, a diferença entre os métodos invasivos e não invasivos. Os invasivos se utilizam de alguma fonte de energia para excitar o meio a ser investigado. Os métodos não invasivos são os que medem, passivamente, alguma forma de energia emanada pelo meio. Sob esse ponto de vista os métodos invasivos mais conhecidos são: sísmica de reflexão e refração; métodos elétricos e eletromagnéticos; perfilagem de poços e georadar (GPR). Os métodos não invasivos mais conhecidos são os seguintes: potencial elétrico, gravimetria e magnetometria (métodos potenciais) e método magneto-telúrico.

Um método alternativo para investigar a geologia de sub-superfície é a perfuração de poços ou sondagens, mas é um método caro e somente fornece informações localizadas. Os levantamentos geofísicos, embora algumas vezes passíveis de grandes ambiguidades ou incertezas na interpretação, proporcionam um meio relativamente rápido e barato de se obter informações distribuídas em área da geologia de subsuperfície. O levantamento geofísico não dispensa a necessidade de perfurações (sondagens), mas, corretamente aplicado, pode aperfeiçoar ao máximo os programas de sondagens (Kearey *et al*., 2009).

A utilização de geofísica aplicada à engenharia civil no Brasil aumenta ano a ano. Essa demanda crescente de serviços pode ser justificada pelo avanço das técnicas de aplicação juntamente com o avanço da eletrônica, que propicia equipamentos mais precisos e portáteis, influindo diretamente na precisão e rapidez dos serviços de campo e no desenvolvimento da computação, que possibilita uma interpretação de dados mais rápida e segura (Dourado, 1984).

Vários fatores são importantes para o sucesso de um método geofísico, entre eles, podem-se destacar a profundidade de penetração, resolução e relação sinal-ruído. Esses fatores estão intimamente relacionados e são particularmente relevantes no campo da geofísica e da engenharia (McDowell *et al*., 2002)..

Existem, na literatura, várias tabelas com exemplos, comparações e aplicações dos métodos geofísicos, para exemplificar, na Tabela 2.2, adaptada de Souza *et al.* (1998), apresenta-se resumidamente as principais aplicações dos métodos geofísicos aos problemas.

Tabela 2.2– Adequação dos métodos geofísicos aos problemas (modificado de Souza *et al*., 1998).

APLICAÇÃO	SÍSMICA DE REFRAÇÃO	SÍSMICA DE REFLEXÃO TERRESTRE	PERFILAGEM SÍSMICA CONTÍNUA	CROSS-HOLE	UP/DOWN HOLE	SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL (SEV)	CAMINHA-MENTO ELÉTRICO	RADAR (GPR)	ELETROMA-GNETOMETRIA	GRAVIME-TRIA
Análise de escorregamentos	2	2	4	0	0	0	1	2	2	0
Caracterização de litologias	3	2	2	3	3	4	3	3	2	1
Cubagem de depósitos minerais	2	2	4	0	0	2	2	2	2	0
Cubagem de material para escavação	4	3	4	0	0	3	1	2	0	0
Determinação da densidade de rochas	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3
Determinação da direção do fluxo d'água	0	0	0	0	0	2	3	1	3	0
Determinação da integridade de estruturas e zoneamento de maciços	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0
Determinação do topo rochoso	4	3	4	2	3	4	2	4	3	2
Determinação do nível d'água	3	2	0	0	0	4	4	3	3	0
Determinação dos módulos elásticos dinâmicos	1	0	0	4	3	0	0	1	0	0
Detecção de cavidades	1	2	0	3	1	2	4	3	3	3
Detecção de poluentes	0	0	1	0	0	0	1	3	3	0
Estratigrafia geológica e geotécnica	4	3	4	2	3	3	3	4	2	0
Estudos de escarafibilidade de maciços	4	1	1	2	3	1	1	1	0	0
Localização de materiais ferromagnéticos em áreas submersas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Localização de depósitos minerais pesados	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0
Localização de objetos enterrados, cabos, dutos, etc.	1	2	3	2	0	1	2	4	3	1
Localização de paleocanais	2	3	4	0	0	1	2	3	2	1
Localização de zonas de falhas	4	2	3	1	2	2	4	3	3	1
Mapeamento de contatos geológicos	4	2	4	3	3	4	3	2	2	1
Mapeamento de diques	4	3	3	1	1	3	4	2	2	0
Prospecção de materiais de construção	4	3	4	1	0	2	2	2	1	0
Zonas de fraturamentos	3	2	2	3	2	2	4	3	4	1

0 - Não aplicavel; 1 - Uso restrito; 2 - Usado, porém com algumas limitações; 3 - Excelente potencial, com algumas restrições ou aplicação em desenvolvimento; 4 - Larga aplicação (bem desenvolvido)

Gandolfo (2011) explica que a geofísica geralmente precede uma campanha de sondagens. Embora esta seja uma sequencia esperada nas etapas de investigação em uma obra, isto nem sempre ocorre. A geofísica, atuando preliminarmente em um projeto de engenharia, tem o papel de orientar a locação e auxiliar o planejamento das sondagens que serão realizadas na área a ser investigada. De posse das informações de sondagens realizadas posteriormente, pode haver uma reinterpretação dos dados, ou mesmo um ajuste em função dos dados diretos até então inexistentes.

Gandolfo (2011) ainda explica que pode acontecer de as sondagens serem efetuadas simultaneamente aos levantamentos geofísicos. Nesse caso, as informações advindas destas, serão muito úteis para a interpretação dos dados e no refinamento do modelo geofísico final. Pode também ocorrer uma ampla campanha de sondagem sem previsão alguma de se utilizar a

geofísica no estudo da área. Nesse caso, quando a geofísica é solicitada, geralmente é para elucidação de algum tipo de problema, em local de alguma complexidade geológica ou com o aparecimento de algum imprevisto. Independentemente do caso, é altamente recomendado utilizar de forma integrada as informações de sondagens mecânicas com os resultados de um levantamento geofísico. Primeiro, porque a informação da sondagem é pontual. Por outro lado, apesar da geofísica fornecer uma informação com menor precisão (por ser um método indireto), será capaz de investigar um maior volume do maciço e em seu estado natural (o que é muito importante quando se deseja a obtenção de parâmetros desse) ou ainda auxiliará na identificação de possíveis zonas de anomalia não detectadas pelas sondagens.

2.7.1- LEVANTAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS – SÍSMICA DE REFRAÇÃO

O método geofísico conhecido como sísmica de refração é um dos métodos mais antigos no campo de pesquisa da geofísica. Foi extremamente utilizado no campo da exploração de petróleo. Com o avanço da tecnologia, que melhorou e muito os equipamentos de aquisição dos sinais sísmicos e, com o próprio avanço da ciência, que desenvolveu o método de sísmica de reflexão, que hoje é o mais utilizado na investigação de poços de petróleo, a sísmica de refração tomou novos caminhos. Tem sido amplamente utilizada, no que é denominado pelos geólogos, como um método de investigação rasa, ou seja, investigação geológico/geotécnica em profundidades que podem variar de 20m a 100m de profundidade (Barton, 2007).

O método de sísmica de refração permite determinar, basicamente, a distribuição em profundidade de parâmetros físicos dos maciços, tais como, velocidade de propagação de ondas acústicas, avaliação de feições geológico-estruturais, mapeamento de feições estratigráficas, determinação de níveis para escarificação, identificação da profundidade do topo rochoso, avaliação de algumas propriedades das rochas (densidade, coeficiente de Poisson, módulo de Young, RQD, entre outras) das rochas, estimativa da profundidade do nível da água, investigação de paleocanais subterrâneos, mapeamento de fraturas em rochas, determinação de fraturas em camadas sedimentares (Kearey *et al.*, 2002).

O método de sísmica de refração é utilizado na fase de reconhecimento de uma área de interesse, normalmente onde existirão obras civis. Neste caso, o objetivo é a definição de grandes feições, como contatos litológicos, zonas de fraturas e profundidade do topo rochoso (Kearey *et al.*, 2002).. Assim, na análise dos dados geofísicos, juntamente com dados de sondagens mecânicas (SPT, CPT, Panda, entre outros), permite a tomada de decisões,

principalmente na definição dos melhores locais para implantação de determinados tipos de obras civis.

Os métodos sísmicos se fundamentam na geração de ondas acústicas e na medição do tempo requerido para que estas ondas se propaguem da fonte de emissão até um conjunto de sensores (geofones ou hidrofones) dispostos em superfície ao longo de um perfil. Um equipamento de registro de dados (sismógrafo) capta os sinais recebidos pelos sensores e os armazena em formato digital para posterior processamento e apresentação (Figura 2.1). A partir de sua geração, as ondas acústicas podem sofrer refrações ou reflexões nas interfaces entre dois meios em sub-superfície, sendo que os tempos de trânsito e as velocidades de propagação das ondas nesses meios estão relacionados às propriedades geológico/geotécnicas dos materiais (ASTM D 5777, 2006).

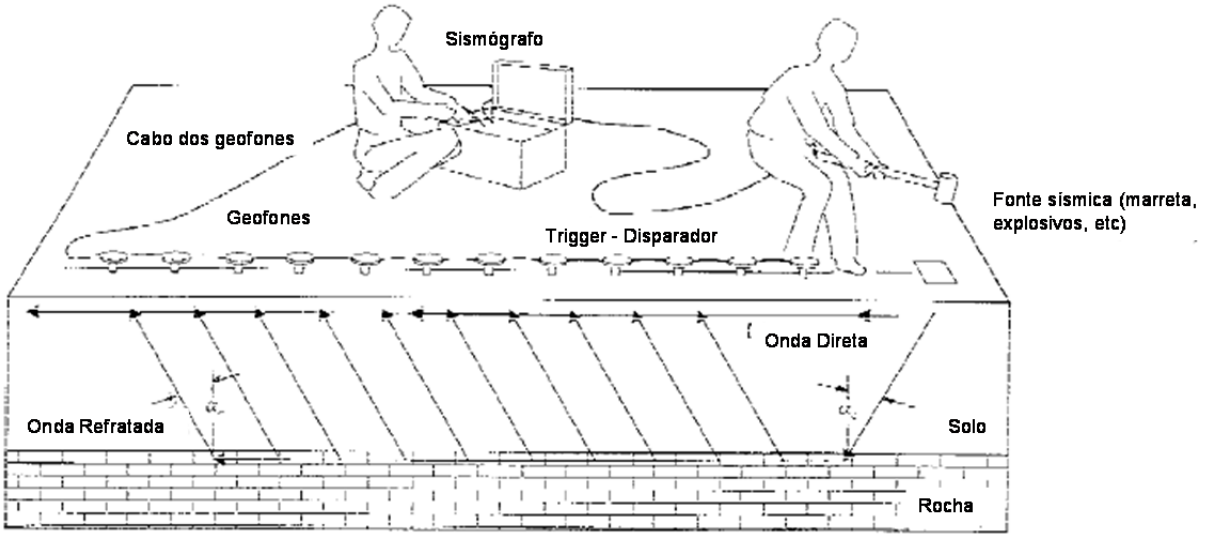


Figura 2.1 – Esquema do equipamento de sísmica de refração segundo a ASTM D5777-00 (ASTM, 2000).

Existem duas classes principais de tipos de ondas sísmicas: as que se propagam até o interior da Terra chamadas ondas de corpo e, as ondas superficiais assim denominadas por serem atenuadas rapidamente com a profundidade. As ondas de corpo são de dois tipos: a primeira é conhecida como onda longitudinal ou onda P (primária), devido ao fato de ser o primeiro evento observado na gravação de um abalo sísmico (Figura 2.2a); o segundo tipo é chamado de onda cisalhante, transversal, rotacional ou S (secundária), por ser normalmente o segundo evento observado na gravação de um abalo sísmico (Figura 2.2b). Na onda P, as partículas oscilam na direção de propagação da frente de onda por meio de movimentos de compressão e

de dilatação. Na onda S, o movimento das partículas se dá transversalmente à direção de propagação da frente de onda e ocorre por deformação cisalhante (Herzig, 2003).

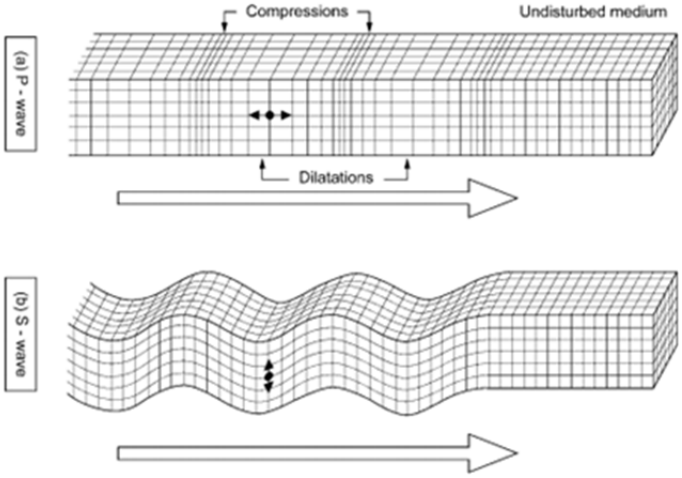


Figura 2.2 – Deformações elásticas e movimento das partículas associada com a propagação das ondas de corpo: a) Ondas P; b) Ondas S (Barton, 2007).

A leitura e interpretação da velocidade de propagação das ondas sísmicas, no interior das camadas, permite dentre outras relações, inferir, qualitativamente, a litologia dos materiais que compõem as camadas alcançadas pelas ondas sísmicas. A Tabela 2.3 mostra alguns resultados dessa relação entre velocidade e rocha ou meio.

Tabela 2.3 – Velocidade propagação da onda P para vários materiais (Modificado de Herzig, 2003).

Rocha ou Meio	**Velocidade Vp em m/s**	
	Mínimo	**Máximo**
Ar	310	360
Argila	1200	2500
Areia Saturada	200	1800
Água	1430	1590
Arenito (Friável)	1500	2500
Arenito (Denso)	1800	4000
Pedregulho, Brita, Areia Seca	100	600
Rocha Ígnea	4000	5700
Rocha Metamórfica	4500	6800

As principais vantagens da aplicação da técnica de sísmica de refração são: empregam-se poucos pontos de tiro e poucos receptores quando comparados à reflexão. Portanto o custo de aquisição é menor; o processamento é relativamente rápido; o desenvolvimento do modelo e a interpretação dos dados não apresentam maiores dificuldades que em outros métodos. As desvantagens da sísmica de refração são: utiliza maiores afastamentos fonte-receptor quando comparados à sísmica de reflexão; a técnica da refração só funciona ou é melhor interpretada

quando a velocidade de propagação das ondas sísmicas aumenta com a profundidade; um modelo de sub-superfície é constituído pela tentativa de reprodução dos tempos de chegada observados (Herzig, 2003).

2.7.1.1- ONDAS SÍSMICAS

Ondas sísmicas são pacotes de energia de deformação elástica que se propagam radialmente a partir de uma fonte sísmica, como um terremoto ou uma explosão. As fontes apropriadas para levantamentos sísmicos comumente geram trens de onda de curta duração, conhecidos como pulsos. Exceto nas proximidades imediatas da fonte, as deformações associadas à passagem de um pulso sísmico são minúsculas, e se admite que são elásticas. Sob tal proposição, pode-se dizer que as velocidades de propagação de pulsos sísmicos são determinadas pelos módulos elásticos e densidades dos materiais através dos quais eles se propagam. Há dois grupos de ondas sísmicas, as ondas de corpo (*body waves*) e as ondas superficiais (*surface waves*) (Kearey *et al.*, 2002).

As ondas de corpo propagam-se através do volume de um sólido elástico e podem ser de dois tipos. As ondas compressionais ou compressivas, já citadas como ondas longitudinais, primárias ou ondas P. As ondas de cisalhamento, também conhecidas como ondas transversais, secundárias ou onda S (Telford *et al*., 2004).

A maior parte dos levantamentos sísmicos tem utilizado somente ondas compressionais, pela simplificação tanto de aquisição quanto de processamento, além da diminuição dos custos, por esse motivo, vários equipamentos não fazem leitura das ondas de cisalhamento. Para a engenharia civil, o ideal é obter sempre as ondas v_p e v_s, o que permite o cálculo da razão de Poisson e a estimativa dos módulos elásticos, os quais fornecem informações valiosas sobre as propriedades geotécnicas *in situ* (Kearey *et al.*, 2002).

2.7.1.2- PRINCÍPIOS GERAIS DA REFRAÇÃO SÍSMICA

Segundo Dourado (1984), a técnica da sísmica de refração consiste em captar na superfície ondas refratadas em profundidade em interfácies de meios que possuam velocidades de propagação de ondas com valores contrastantes. Os princípios físicos da sísmica de refração são os mesmos da óptica geométrica e seguem as leis de Snell-Descartes (Figura 2.3) que de maneira geral diz que um raio ao atravessar uma interface que separa meios com velocidades

de propagação de onda com valores diferentes se desviará da sua trajetória de acordo com a relação:

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen}\theta_2}{v_2} \tag{2.1}$$

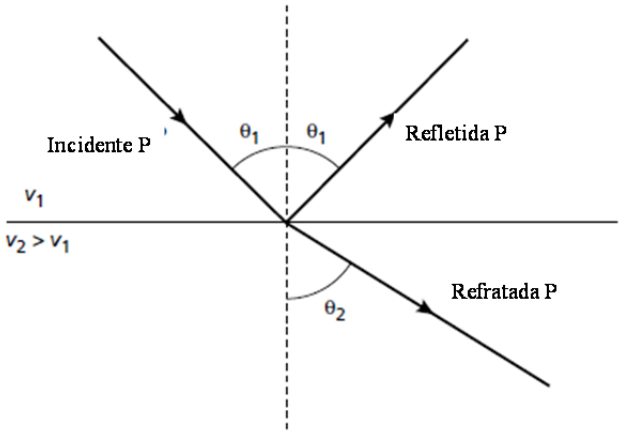


Figura 2.3 – Raios de onda P refletido e refratado associados ao raio P obliquamente incidente sobre uma interface de contraste de impedância acústica (Kearey *et al.*, 2002).

Quando a velocidade for mais alta na camada inferior, há um ângulo característico de incidência, conhecido como ângulo crítico, para o qual o ângulo de refração é 90 graus. Isso gera um raio criticamente refratado que viaja ao longo da interface a uma velocidade mais alta v_2. Para qualquer ângulo de incidência maior haverá reflexão interna total da energia incidente (exceto para raios de onda S convertidas em uma gama de ângulos maiores) (Kearey *et al.*, 2002, Telford *et al*., 2004). Assim, pode-se escrever o ângulo crítico como:

$$\frac{\text{sen}\theta_c}{v_1} = \frac{\text{sen}90}{v_2} = \frac{1}{v_2} \tag{2.2}$$

$$\text{ou} \quad \theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \tag{2.3}$$

Quando as interfaces apresentam superfícies com descontinuidades ou em estruturas cujo raio de curvatura é menor que o comprimento de onda das ondas incidentes, surge um novo conceito que é a difração. A difração pode ser explicada por meio do princípio de Huygens, que proporciona um método geométrico para encontrar, a partir de uma forma conhecida da frente de ondas em certo instante, a forma que adotará esta frente em outro instante posterior. O princípio supõe que cada ponto da frente de ondas primária da origem a uma fonte de ondas secundárias que produzem ondas esféricas que tem a mesma frequência e se propaga em todas

as direções com a mesma velocidade que a onda primária em cada um destes pontos (Figura 2.4) (Dourado, 1984).

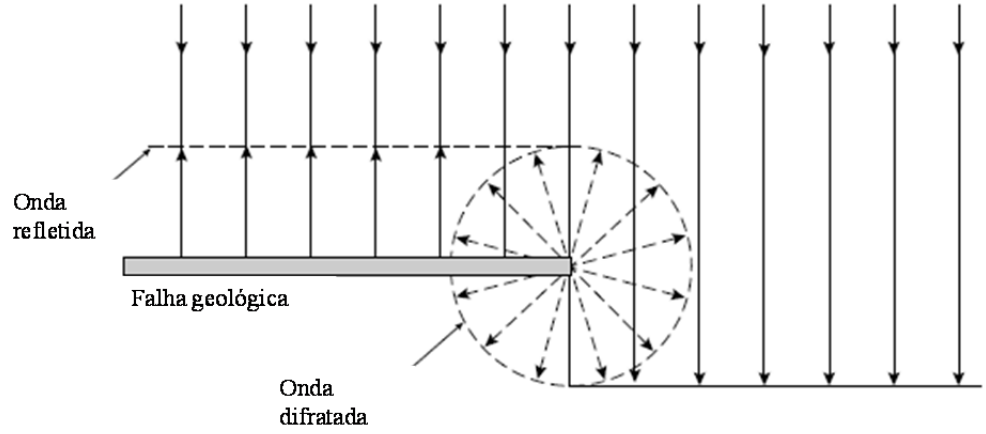


Figura 2.4 – Difração causada pelo truncamento de uma camada falhada (Kearey *et al*., 2002).

2.7.2- MÉTODOS GEOELÉTRICOS

Luis & Silva (1995) explicam que o fluxo de corrente elétrica na sub-superfície é governado primordialmente pela condutividade elétrica das rochas ali presentes. A corrente elétrica pode ser contínua ou alternada, de modo que podem ser considerados, respectivamente, fenômenos puramente galvânicos ou indutivos, que refletem a distribuição de condutividade da subsuperfície e, portanto, a distribuição dos materiais nela presentes.

Segundo Braga (1988), os métodos geoelétricos de prospecção, formados pelos métodos elétricos e eletromagnéticos, estudam por meio de medições, efetuadas na superfície ou interior de furos, a distribuição em profundidade de alguma magnitude eletromagnética. Existem três magnitudes eletromagnéticas principais que a princípio poderiam ser usadas para identificar os corpos situados no subsolo ou em subsuperfícies:

- Permeabilidade magnética;
- Constante dielétrica;
- Resistividade.

Segundo Braga (1988), entre elas, a resistividade é sem dúvida a mais importante em prospecção geoelétrica.

Um detalhe importante é abordado por Fernandes (1984), que explica que a passagem de uma corrente elétrica nos solos e nas rochas se dá através da água contida nos seus vazios, pois a maioria dos minerais é má condutora de corrente elétrica. À exceção dos metais nativos, como Fe, Ag, Cu e Ni, e dos compostos minerais semimetálicos, como FeS_2 (pirita), quase todos os minerais que formam as rochas são, na realidade, isolantes. A presença, porém, de umidade nas mais finas fraturas de uma rocha pode torná-la uma condutora. A condutividade elétrica dos solos e das rochas, portanto, é eletrolítica, pois se faz através de um eletrólito (a água); se essa água for salgada, por exemplo, será melhor a condutividade da rocha ou solo.

Segundo Campanella & Weemees (1990), a resistividade aparente do solo é função tanto da resistividade do fluido intersticial quanto da resistividade das partículas sólidas e de seu arranjo. O mecanismo dominante da condução é a transferência de carga através da condução eletrolítica da água intersticial, isto é, do movimento dos íons em resposta à aplicação de um campo elétrico. Em geral, a maioria dos íons presentes na água intersticial tem resistividade menor e maior condutividade. É muito importante a determinação do perfil do solo, visto que o tipo de solo é de grande relevância na resistividade deste como um todo (Oliveira, 2004).

O tipo de solo é outro fator que influencia a resistividade elétrica devido, principalmente, à forma dos grãos. Um índice de vazios maior faz com que seja aumentada a área para passagem de corrente, aumentando a condutividade elétrica. Os solos finos apresentam grãos com formatos lamelares o que provoca um aumento da superfície de contato entre as partículas. Isso afeta o comportamento resistivo do meio podendo resultar na geração de corrente pela superfície de partículas finas (Weemees, 1990).

Segundo Fukue *et al.* (1999), a resistividade do solo depende, no mínimo, dos seguintes fatores:

- Grau de saturação;
- Resistividade do líquido nos poros;
- Porosidade;
- Tamanho, forma e distribuição das partículas sólidas;
- Espessura e composição da camada catiônica dos argilominerais.

Fernandes (1984) ainda explica que uma argila é muito melhor condutora do que uma areia, o que se compreende pelas características do sistema de partículas da argila, que mantém água por adesão. Os grãos de um solo têm carga elétrica negativa em suas superfícies e a espessura da água fixada por adesão não varia muito com o tamanho do grão; como os grãos de argila têm dimensões da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} dos grãos de uma areia média, a proporção relativa de água fixada por adesão é consequentemente, bem maior nas argilas do que nas areias.

2.7.2.1- APLICAÇÕES DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS

Segundo Braga (1988) as informações que os métodos geoelétricos fornecem sobre o subsolo, podem ser utilizadas para os mais diversos fins. De um modo geral, as mais importantes e difundidas são:

- Investigações tectônicas na prospecção de petróleo;
- Estudo para a localização de águas subterrâneas;
- Auxílio a mapeamento geológico;
- Localização de jazimentos minerais;
- Investigações do maciço rochoso e zonas de recobrimento;
- Estudos de zonas profundas na Terra.

2.7.2.2- CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS

Segundo Braga (1988) são muitas as modalidades dos métodos de investigação elétrica de sub-superfícies, cada uma delas com seu próprio campo de aplicação, suas vantagens e desvantagens. Como as características de cada procedimento são múltiplas, não é fácil estabelecer uma classificação para eles, e como tentativa, pode-se estabelecer a seguinte classificação (Figura 2.5):

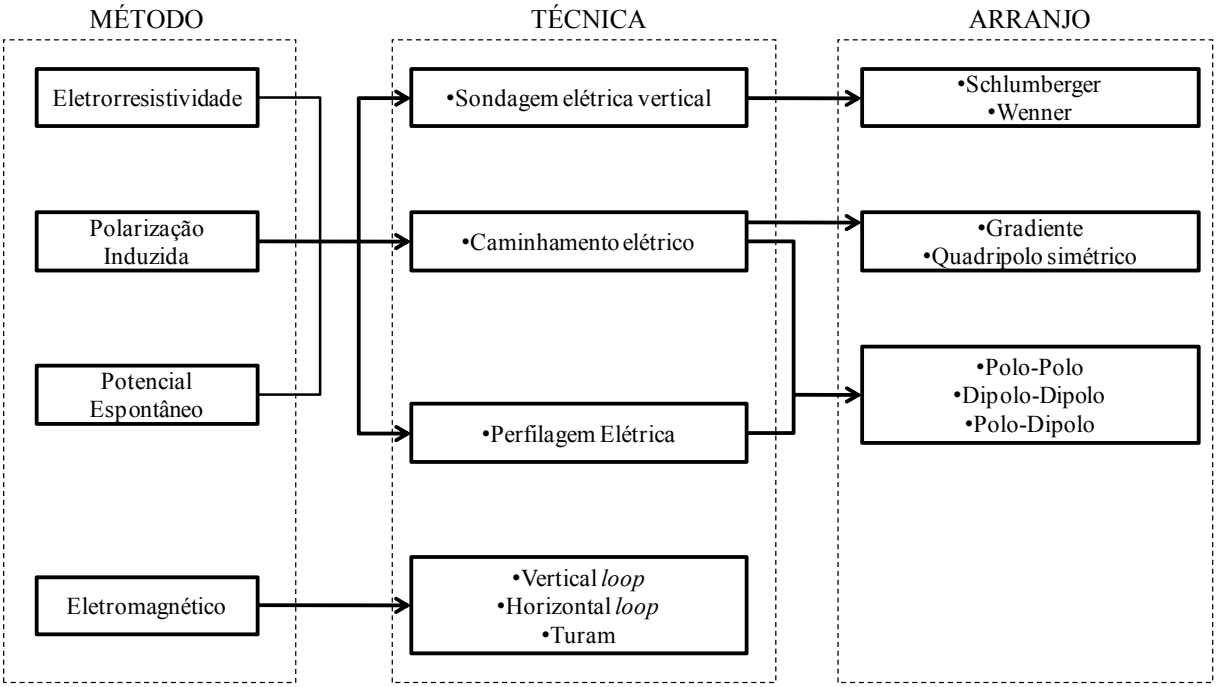


Figura 2.5 – Possível classificação dos métodos geoelétricos de prospecção geofísica (Braga, 1988).

2.7.2.3- SELEÇÃO DO MÉTODO DE PROSPECÇÃO E SUA MODALIDADE CONCRETA DE EMPREGO

Segundo Braga (1988) a resolução de problemas que envolvem o uso de técnicas geofísicas devem estar claramente definidos em termos geológicos/geotécnicos. Não se pode aplicar um método geofísico se não existe contraste de propriedades físicas entre a formação de interesse e o meio circundante. Em geral é necessário obter o máximo de informações a respeito da área a ser estudada, tais como:

- Mapas topográficos;
- Fotografias aéreas;
- Mapas e seções geológicas;
- Informações sobre o subsolo (poços, trincheiras, sondagens, entre outros);
- Dados resultantes de campanhas geofísicas anteriores executadas na área ou nas proximidades;
- Outros dados de interesse prático: vias de comunicação e clima da área, presença de fios ou estações de alta tensão próximas, instalações industriais, rios, tubulação enterrada, entre outros.

De posse do máximo de informação da área, faz-se a seleção do método/técnica geofísica a ser empregada, na qual deve-se dar preferência ao procedimento que seja capaz de localizar com máxima segurança e precisão o corpo ou estrutura de interesse (Braga, 1988).

Dentre os fatores de seleção do método/técnica adequados, Braga (1988), cita os seguintes:

1) Tamanho, profundidade e forma do objetivo;

2) Contrastes de propriedades físicas entre o objetivo e o meio circundante;

3) Poder de resolução, custo e rapidez;

4) Sensibilidade destes aos acidentes topográficos e outras causas de perturbação.

2.7.2.4- MÉTODO DE RESISTIVIDADE

O método resistivimétrico teve origem na década de 20, a partir dos trabalhos dos irmãos Schlumberger. Durante aproximadamente 60 anos, foi normalmente empregada a interpretação quantitativa de sondagens elétricas convencionais (*Engineering Geophysics*, 1988). Neste método o ponto central do arranjo de eletrodos permanece fixo, mas o espaçamento entre eles é expandido com o objetivo de obter-se informações mais profundas sobre a seção geoelétrica.

No método de resistividade, correntes elétricas artificialmente geradas são introduzidas no solo, e as diferenças de potencial resultantes são medidas na superfície. Os desvios do padrão de diferenças de potencial esperado do solo homogêneo fornecem informações sobre a forma e as propriedades elétricas das heterogeneidades da sub-superfície (Kearey *et al*., 2002).

Todos os métodos de resistividade empregam uma fonte artificial que é introduzida no solo por meio de eletrodos metálicos. O procedimento é medir diferenças de potencial em outros eletrodos próximos ao fluxo de corrente. Como a corrente é medida também é possível determinar a resistividade aparente do sub-superfície. Neste sentido a técnica de resistividade é superior, pelo menos teoricamente, a todos os outros métodos elétricos, porque os resultados quantitativos são obtidos a partir de uma fonte controlada e de dimensões específicas (Telford *et al*., 2004).

No método de resistividade o principal inconveniente é a alta sensibilidade a pequenas variações de condutividade perto da superfície, em jargão eletrônico pode-se dizer que o nível de ruído é alto (Telford *et al*., 2004).

A resistividade (*resistivity*) é uma propriedade fundamental do material, que o caracteriza, fornecendo uma oportunidade para a distinção entre um tipo e outro sem a necessidade de escavação física (Braga, 1988).

A resistividade de um material é definida como a resistência em ohms entre as faces opostas de um cubo unitário do material. Para um cilindro condutor de resistência δR, comprimento δL e área de seção transversal δA (Figura 2.6), a resistividade ρ pode ser definida pela (2.4.

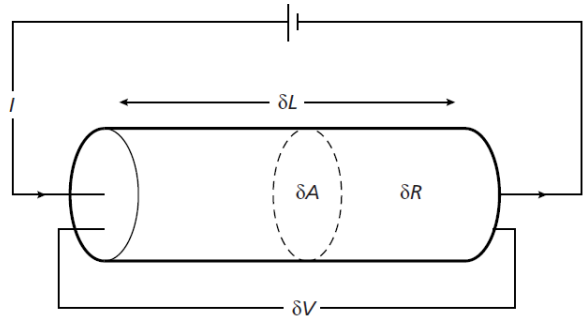


Figura 2.6 – Parâmetros utilizados na definição física de resistividade (Kearey *et al.*, 2002).

$$\rho = \frac{\delta R \delta A}{\delta L} \tag{2.4}$$

A unidade no SI da resistividade é o ohm-m (ohm.m) e o inverso da resistividade, denominado de condutividade, tem unidade conhecida como siemens (S) por metro; 1 Sm^{-1}; ou 1 $ohm^{-1}m^{-1}$.

Como a resistividade é uma propriedade física muito variável, muitos autores, como Fernandes (1984), Kearey *et al*. (2002), Telford *et al*. (2004), entre outros, explicam que a resistividade não é um parâmetro que possa definir o tipo de rocha ou solo, conforme pode ser observado na

Tabela 2.4 e Figura 2.7, que mostra as faixas de variação de resistividade em função da rocha ou solo. Pode-se observar que não há um consenso de valores, entre os autores, o que explica a dificuldade de utilizar a resistividade como parâmetro para definir tipo de rocha/solo.

Tabela 2.4 – Valores de resistividade para rocha ou solo (Fernandes, 1984).

ROCHA OU SOLO	RESISTIVIDADES (ohm.m)	
Granito	de 300 a >	1.000
Diabásio	de 20 a	20.000
Sienito	de 100 a	100.000
Folhelho	de 10 a	10.000
Calcário	de 50 a	500.000
Areia	de 1 a	5.000
Silte	de 20 a	1.500
Argila	de 5 a	1.500

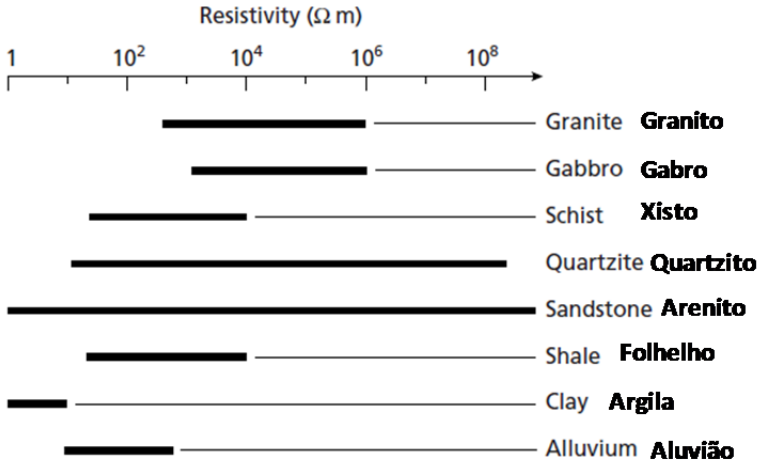


Figura 2.7 – Intervalo aproximado de valores de resistividade dos tipos comuns de rochas (Kearey *et al.*, 2002).

2.7.2.5- INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação utilizada nas medidas de eletrorresistividade é geralmente simples. A fonte de energia consiste de baterias ou motor gerador que alimentam uma unidade transmissora; a corrente pode assumir a forma de um pulso longo ou pode ser uma onda quadrada de baixa frequência; neste caso circuitos retificadores, temporizadores e comutadores na unidade transmissora, encarregam-se de alternar o sentido da corrente em intervalos que vão desde décimos de segundo até dezenas de segundos (Figura 2.8). Os eletrodos de corrente são geralmente estacas de aço ou cobre cravadas no solo. Em áreas de terrenos secos, o solo em torno dos eletrodos é umedecido para melhorar o contato. Quando não existe solo, situação em que não é possível cravar o eletrodo de aço em rocha aflorante, utiliza-se um bolo de argila úmida em contato com uma peça de cobre (Braga, 1988).

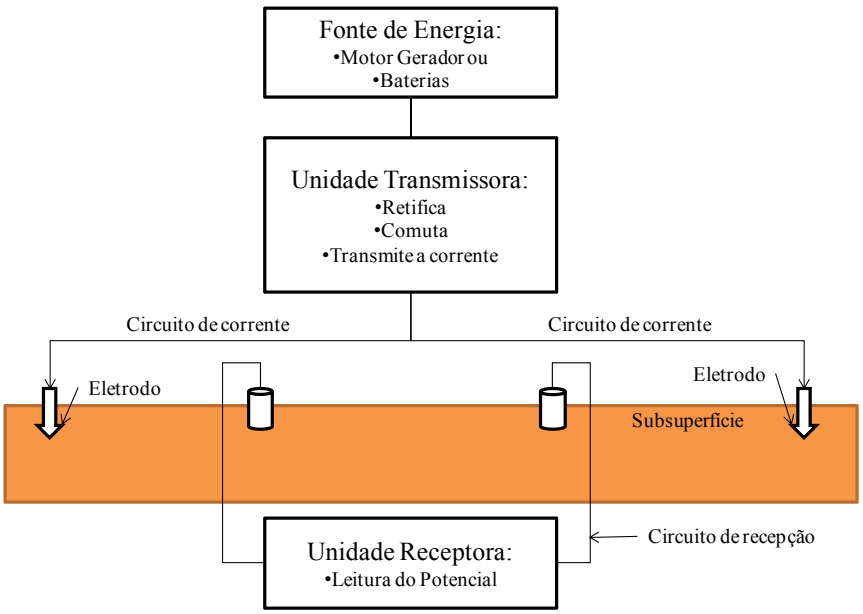


Figura 2.8 – Esquema simples de medida de eletrorresistividade (Braga, 1988).

Quase todos os métodos geoelétricos requerem o uso de no mínimo quatro eletrodos cravados no solo, sendo que um par de eletrodos serve para introduzir uma corrente elétrica no solo, enquanto o outro par é utilizado para medir a diferença de potencial que se estabelece entre eles como resultado da passagem da corrente elétrica (Braga, 1988).

2.7.2.6- TÉCNICA DO CAMINHAMENTO ELÉTRICO (ARRANJO DIPOLO-DIPOLO)

A técnica de caminhamento elétrico está baseada na realização de medidas de resistividade aparente ao longo de uma linha, com o objetivo de investigar variações em um ou mais níveis em profundidade (Sherrif, 1989).

Os arranjos de campo, para a execução da técnica do caminhamento elétrico, apresentam vários padrões que atendem a certas particularidades em campo. Dentre os diversos tipos de arranjos de campo disponíveis para a técnica do caminhamento elétrico, o presente trabalho utiliza o arranjo dipolo-dipolo.

Considerando a Figura 2.9, o arranjo dipolo-dipolo é caracterizado por utilizar espaçamento igual entre MN e AB, com deslocamento do centro de ambos os dipolos ao longo da linha. O espaçamento entre os dipolos AB e MN pode ser variado a partir do uso simultâneo de vários dipolos MN ao longo da linha (Sherrif, 1989).

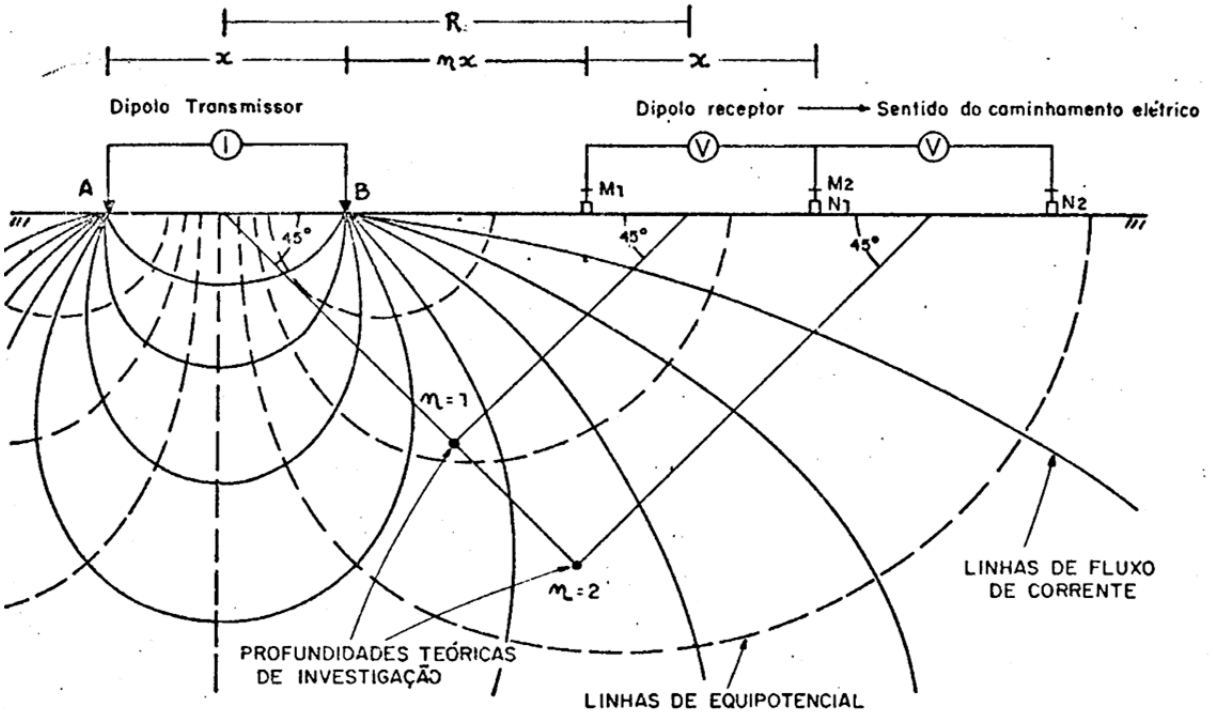


Figura 2.9 – Disposição no campo do arranjo dipolo-dipolo (Braga, 1988).

No arranjo da Figura 2.9, os eletrodos A e B de envio de corrente e os eletrodos M e N de recepção são alinhados sobre um mesmo perfil. O arranjo é definido pelos espaçamentos $X = \overline{AB} = \overline{MN}$. A profundidade de investigação cresce com "R" e teoricamente corresponde a $\frac{1}{2}R$ (Elis & Zuquette, 1996).

Segundo Braga (1988) as medidas são feitas em várias profundidades de investigação, isto é, n=1,2,3,4,5..., e atribuídas na interseção das linhas que partem a 45^0 dos centros de $\overline{AB}$ e $\overline{MN}$. A cada estação os dois dipolos são deslocados de uma distância igual a X, e os dados obtidos são impressos nas posições n=1,2,3,4,5..., e interpolados, gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente (Figura 2.10). Loke (1999) sugere que o valor de "n" não ultrapasse 8.

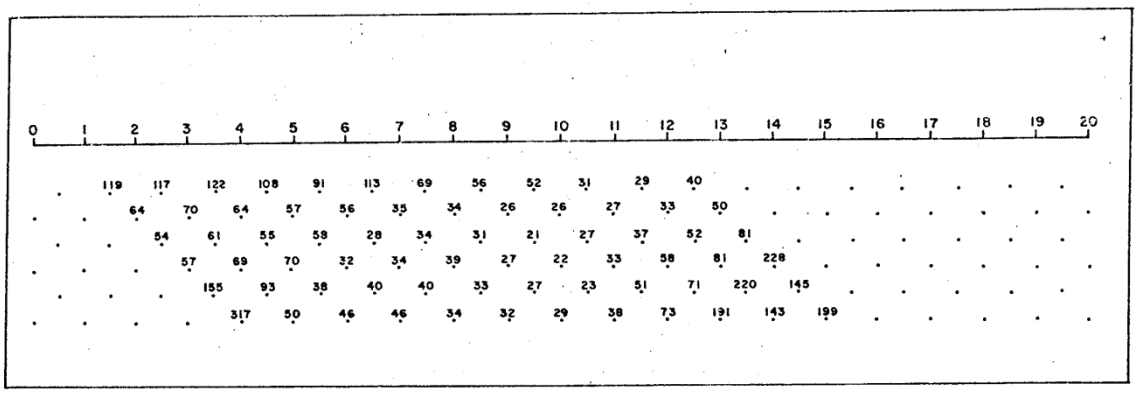


Figura 2.10 – Pseudo-seção de resistividade aparente – arranjo dipolo-dipolo (Braga, 1988).

O fator geométrico K do arranjo dipolo-dipolo pode ser escrito segundo:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \quad (2.5)$$

Esse fator pode ser simplificado, de acordo com:

$$K = 2\pi Gx \quad (2.6)$$

Em que o valor G pode ser calculado segundo:

$$G = \frac{1}{\left(\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}\right)} \quad (2.7)$$

Portanto, para n=1, 2, 3, 4, 5..., tem-se G=3, 12, 30, 60, 105..., até o limite permitido pelo arranjo e pelas limitações do equipamento.

Uma possível desvantagem deste arranjo é a fraca intensidade de sinal para valores elevados do fator "n". A voltagem é inversamente proporcional ao cubo do fator "n". Isto significa que para a mesma corrente, a voltagem medida cai cerca de 200 vezes quando "n" é aumentado de 1 a 6. Uma forma de contornar este problema é aumentar o espaçamento entre os eletrodos de corrente para reduzir a queda de potencial quando o comprimento geral do arranjo é aumentado para incrementar a profundidade investigada. Os equipamentos mais modernos já realizam esse procedimento automaticamente (Ferreira, 2002).

2.7.2.7- PESQUISAS NO DF UTILIZANDO O MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Várias pesquisas foram realizadas no DF, com métodos de medição da resistividade elétrica, com propósitos diferenciados. Nascimento *et al*., (1999) analisaram uma área do Jardim Botânico de Brasília por meio de perfilagem elétrica e de poços de monitoramento, observaram que a variação da umidade do solo, conforme a época do ano, influência os valores de resistividade elétrica aparente, e que esta variação é ainda maior nos solos arenosos. Este estudo foi ampliado em 2003 onde o autor apresentou procedimentos para reconhecimento e cartografia de solos, baseados em medições de sua resistividade elétrica e de sua radioatividade natural. O autor mostra que é possível utilizar medidas de resistividade elétrica como instrumento para diferenciar solos. Sondagens elétricas verticais possibilitaram identificar a variação da resistividade em sub-superfície.

Nascimento *et al.,* (1999) ainda realizaram vários outros estudos voltados para contaminação do solo, como o desenvolvido no campus da Universidade de Brasília, em Brasília, Distrito Federal. Os levantamentos geofísicos e as amostragens foram realizados próximo ao alojamento estudantil, no local de disposição dos efluentes gerados nos blocos residenciais, concluindo que o monitoramento era perfeitamente acompanhado pelo método (monitoramento da pluma de contaminação) e que a área contaminada pelos efluentes estava aumentando, isto é evoluindo com o tempo.

Oliveira (2004) estudou o desempenho do cone resistivo *in situ*, quanto à determinação e ao monitoramento de áreas sujeitas à contaminação com substâncias orgânicas ou inorgânicas, verificando a sua eficácia na investigação de contaminantes. Para isso, fez-se um estudo correlacionando os parâmetros de resistividade elétrica de campo com os resultados das análises feitas nas amostras coletadas do solo e do fluido.

Aquino (2010) realizou um estudo inicial e avaliativo, em laboratório, sobre o comportamento da resistividade elétrica de um solo argilo-arenoso compactado característico do Distrito Federal frente às variações de suas características físicas. Verificou-se, de modo geral, que as relações entre resistividade elétrica e os teores de umidade gravimétrica e volumétrica são boas e sua utilização se mostra, em um primeiro momento, como boa alternativa em um processo de controle de compactação, destacando-se, porém, a necessidade de se avaliar melhor a sensibilidade do método.

2.8- INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

Rebello (2008) explica que o conhecimento das características físicas do solo é muito importante, não só para a escolha do tipo de fundação e seu dimensionamento, que é bastante óbvio para obras de engenharia, como também para a determinação dos "acidentes", tais como a existência de água no subsolo, de matacões e de vazios que possam influenciar o próprio processo construtivo.

Segundo Schnaid (2000) o reconhecimento das sub-superfícies é pré-requisito para projetos de fundações seguros e econômicos. No Brasil o custo envolvido na execução de sondagens de reconhecimento varia normalmente entre 0,2 e 0,5% do custo total da obra, sendo as informações geotécnicas obtidas indispensáveis à previsão dos custos fixos associados ao projeto e sua solução.

Milititsky *et al.* (2008) explicam que a falta de investigação das sub-superfícies é a causa mais frequente de problemas de fundações. Na medida em que o solo é o meio que vai suportar as cargas, sua identificação e a caracterização de seu comportamento são essenciais à solução de qualquer problema.

Tsutsumi (2000) explica que um programa de investigação deve levar em consideração a importância e o tipo da obra, bem como a natureza do subsolo e da rocha. Solos que apresentam características peculiares de comportamento, como colapso, alta compressibilidade, elevada sensibilidade e outras características geotécnicas de importância para um projeto de engenharia, exigem cuidados e técnicas diferentes das utilizadas em solos com comportamento típico.

Um programa de investigação deve fornecer várias informações das sub-superfícies e da rocha. Dentre as mais importantes pode-se considerar:

- Espessura e dimensões em planta de cada camada para a profundidade de interesse do projeto, além da caracterização de cada camada com base em observações locais ou de resultados de laboratório;

- Profundidade do topo da camada rochosa ou do material impenetrável ao amostrador;

- No caso de rocha, o tipo litológico e suas condições geológicas, além de propriedades e características intrínsecas à rocha como a presença de descontinuidades, permeabilidade, porosidade, densidade, resistência, entre outras características;

- Existência de água com a respectiva posição do nível d'água no período da investigação e, se possível, sua variação durante o ano. Se for o caso indicar a existência de pressões artesianas;

- As propriedades do solo, tais como permeabilidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento.

Nem sempre os projetos necessitam de todas estas informações. Já para certos projetos específicos, alguns dados não relacionados acima podem ser necessários.

O conceito de investigação geotécnica atualmente está inserido num contexto maior que é o risco geológico/geotécnico de obras de engenharia. Sabe-se que os riscos geológicos/geotécnicos sempre estarão presentes em qualquer tipo de obra em maior ou menor grau dependendo de inúmeras variáveis, entre as quais as mais importantes são a complexidade geológica, a qualidade do programa de investigação e o tipo de obra. As principais consequências do risco geológico/geotécnico nas obras são a ocorrência de acidentes de pequenas ou grandes proporções com perdas materiais e humanas, os custos adicionais devido à necessidade de modificações no projeto básico ou básico consolidado durante o projeto executivo, com acréscimos consideráveis de volumes de escavação e de concreto, acréscimos nos quantitativos de tratamentos de taludes e sistemas de suporte de túneis, atrasos nos marcos contratuais com pagamento de multas e adiamento da geração no caso de usinas hidrelétricas, entre outros (Pastore, 2009).

A investigação geotécnica é uma etapa tão importante nos projetos de engenharia que algumas entidades, tais como a *American Society of Civil Engineers* (1997), recomenda as seguintes medidas para redução de riscos geológicos:

- Destinar um orçamento adequado para investigação geológica de sub-superfície;
- Recorrer a profissionais experientes e qualificados para investigar, avaliar potenciais riscos, preparar desenhos e especificações e um relatório consistente de análise de riscos;
- Alocar recursos e tempo suficiente para preparar um relatório de diretriz geotécnica clara e consistente com outros documentos de projeto.

A Figura 2.11 exemplifica a importância da realização de investigações geológica/geotécnica devido à sua consequência nos acréscimos dos custos contratuais da obra, decorrentes de imprevistos geológicos, relacionando custos *versus* razão entre o comprimento de sondagens exploratórias e o comprimento do túnel, elaborado com base em dados coletados de 84 túneis pelo *U.S. National Committee on Tunnel Technology* (Hoek & Palmeiri, 1998). Observa-se na Figura 2.11 que um investimento de 0,5% do custo da obra em investigação, neste caso, pode aumentar o custo da obra em até aproximadamente 80% a partir de 2% de investimento em investigação geológica/geotécnica, para este tipo de obra, o acréscimo nos custo pode cair drasticamente para algo em torno de 2% a 5% do valor, a partir de 2% o acréscimo nos custos

da obra não reduz mais, onde a parcela residual representa a própria variabilidade natural do material investigado (solo/rocha).

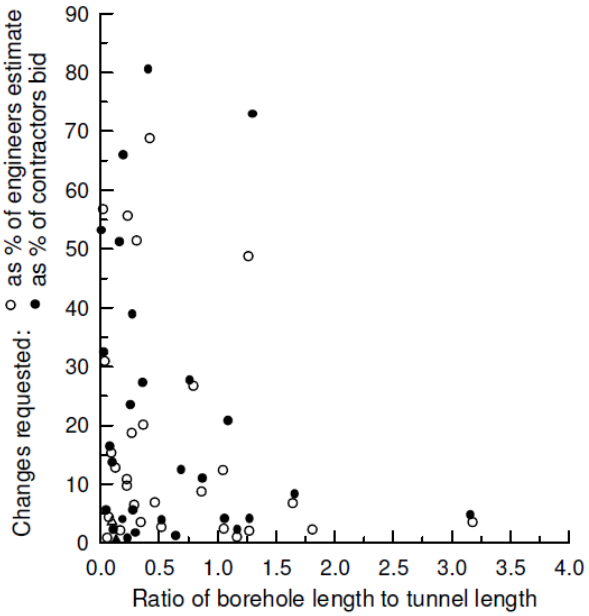


Figura 2.11 – Variação nos custos da obra em função do comprimento de sondagens realizadas em obras de túneis (Hoek & Palmeiri, 1998).

Outro ponto importante para obras de engenharia é o fator de segurança a ser adotado. O fator de segurança tem o objetivo de compatibilizar os métodos de dimensionamento às incertezas decorrentes das hipóteses simplificadoras adotadas nos cálculos, das estimativas das cargas de projeto e das previsões de propriedades mecânicas do solo. Um programa de investigação bem feito pode otimizar a relação custo/benefício da obra e por conseguinte modificar os valores de fator de segurança a serem adotados pelas obras (Schnaid, 2000).

Atualmente, conceitos mais elaborados, e cada vez mais implementados em obras civis, foram propostos a respeito do fator de segurança, trata-se do conceito de probabilidade de ruína que engloba o fator de segurança adotado pelas normas mais o conceito de análise de confiabilidade. Países do hemisfério norte e a comunidade europeia já possuem normas sobre o tema, no Brasil já existem vários estudos como o de Silva (2006) e os trabalhos desenvolvidos por Cintra & Aoki (2010).

Segundo Milititsky (2008) a ausência de investigação geotécnica representa 80% dos casos de mau desempenho de fundações de obras pequenas e médias, a ausência completa de investigação é o motivo da adoção de solução inadequada. Um resumo destas ocorrências é apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Problemas típicos decorrentes de ausência de investigação geotécnica para os diferentes tipos de fundações (Milititsky, 2008).

Tipo de Fundação	Problemas Típicos Decorrentes
Fundações Diretas	Tensões de contato excessivas, incompatíveis com as reais características do solo, resultando em recalques inadmissíveis ou ruptura
	Fundações em solos/aterros heterogêneos, provocando recalques diferenciais
	Fundações sobre solos compressíveis sem estudo de recalques, resultando grandes deformações
	Fundações apoiadas em materiais com comportamento muito diferente, sem junta, ocasionando o aparecimento de recalques diferenciais
	Fundações apoiadas em crosta dura sobre solos moles, sem análise de recalques, ocasionando a ruptura ou grandes deslocamentos da fundação.
Fundações Profundas	Estacas de tipo inadequado ao subsolo, resultando mau comportamento
	Geometria inadequada, comprimento ou diâmetro inferiores aos necessários
	Estacas apoiadas em camadas resistentes sobre solos moles, com recalques incompatíveis com a obra
	Ocorrência de atrito negativo não previsto, reduzindo a carga admissível nominal adotada para a estaca

Milititsky (2008) alerta que mesmo realizando-se um programa de investigação, o mesmo pode se mostrar inadequado para identificar problemas que podem comprometer o comportamento da fundação projetada. Casos típicos deste grupo são:

- Número insuficiente de sondagens ou ensaios para áreas extensas ou de subsolo variado, eventualmente cobrindo diferentes unidades geotécnicas, causa comum de problemas em obras correntes pela extrapolação indevida de informações;

- Profundidade de investigação insuficiente, não caracterizando camadas de comportamento distinto, em geral de pior desempenho, também solicitadas pelo carregamento;

- Propriedades de comportamento não determinadas por necessitar ensaios especiais (expansibilidade, colapsibilidade, entre outros);

- Situações com grande variação de propriedades, ocorrência localizada de anomalia ou situação não identificada.

A interpretação inadequada dos dados provenientes de programas de investigação geotécnica é outro fato que deve ser levado em consideração. Em muitos casos é necessário que o projetista necessariamente adote um modelo para descrever o subsolo, com propriedades de comportamento representativo das diversas camadas (Milititsky, 2008).

A adoção de valores não representativos ou ausência de identificação de problemas pode provocar desempenho inadequado das fundações. Em obras de maior porte e/ou complexidade geotécnica, faz-se necessário o cruzamento de dados provenientes de ensaios de campo e laboratório para aumentar a confiabilidade das previsões de projeto (Milititsky, 2008).

2.8.1- SONDAGEM À PERCUSSÃO SPT (*STANDARD PENETRATION TEST*)

O ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) é o mais utilizado pelos projetistas de fundações no Brasil, devido ao seu baixo custo e por fornecer dados como a resistência à penetração do solo, descrição dos horizontes de solo e obtenção fácil de amostras deformadas. A sua execução está normatizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6484 (ABNT, 2001) e as recomendações constantes, tanto para equipamento quanto para procedimento, devem ser rigorosamente seguidas para a obtenção de resultados comparáveis com ensaios realizados em outros lugares.

Segundo a Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) a sondagem à percussão é um método para investigação de solos em que a perfuração é feita por meio de trado ou de lavagem, sendo utilizada para obtenção de amostras de solo, medida de índices de resistência à penetração e execução de vários ensaios *in situ*. É possível, ainda, no final do ensaio à penetração, medir o torque necessário para ruptura da amostra, bem como executar outros ensaios aproveitando-se da perfuração (ABGE, 1999).

Schnaid (2000) descreve o ensaio SPT como uma medida de resistência dinâmica conjugada a uma sondagem de simples reconhecimento. A perfuração é realizada por tradagem e circulação de água utilizando-se um trépano de lavagem como ferramenta de escavação. Amostras representativas do solo são coletadas a cada metro de profundidade por meio de amostrador padrão, de diâmetro externo de 50 mm. A normatização do ensaio SPT foi realizada em 1958 pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*), sendo comum em todo o mundo o uso de procedimentos não padronizados e equipamentos diferentes da norma americana ASTM D-1586 que padronizou o ensaio SPT.

Segundo Tsutsumi (2000), a história da sondagem de simples reconhecimento começa em 1902 com uma proposta do engenheiro Cow para um processo de amostragem, utilizando um amostrador de parede grossa com diâmetro de 25,4 mm e comprimento cravado variando entre 300 e 450 mm, em substituição à amostragem por circulação de água, de forma que o

amostrador era cravado no solo, usando-se um martelo de massa aproximada de 50 kg. Em 1927, Hart e Fletcher introduziram um amostrador, com diâmetro externo e interno de 51 e 35 mm, respectivamente, constituído por três partes, engate, corpo e sapata, tendo como principal modificação o fato do corpo ser bipartido, possibilitando uma coleta mais fácil da amostra retirada. Este amostrador, conhecido como amostrador Raymond ou Terzaghi-Peck é, atualmente, o único que deve ser usado no ensaio de penetração realizado durante a elaboração de uma sondagem de simples reconhecimento. A Figura 2.12 mostra um corte de parte do amostrador, indicando as principais dimensões da cabeça e sapata para fabricação.

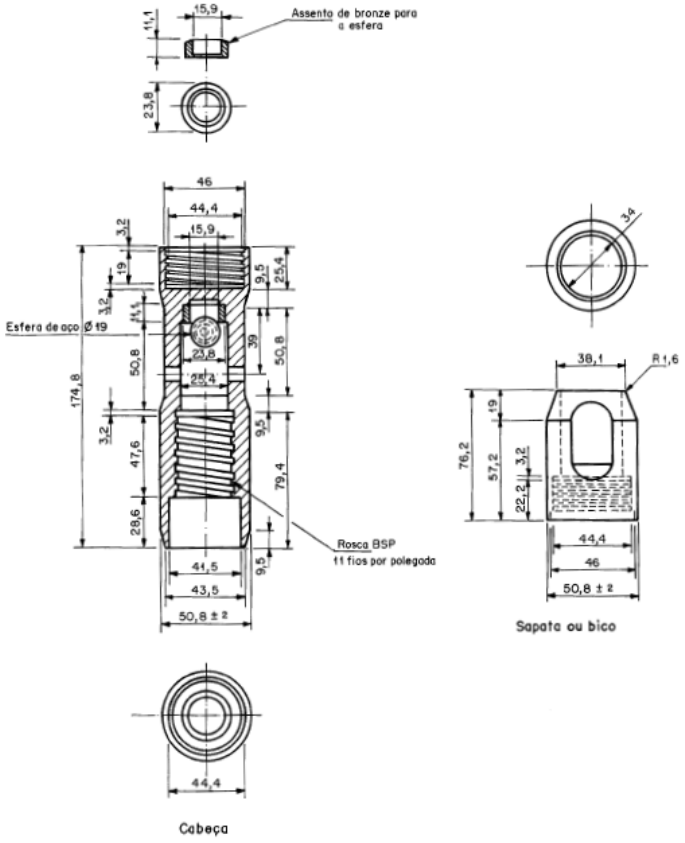


Figura 2.12 – Dimensões em milímetros de parte do amostrador Raymond (amostrador padrão) mostrando a cabeça e sapata de acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2001).

Segundo Oliveira (1996), em 1930, H. A. Mohr introduziu a contagem do número de golpes para fazer penetrar o amostrador no terreno. O ensaio fornece dados de posição do nível d'água ou dos níveis d'água encontrados durante a perfuração; descrição do tipo de solo encontrado a cada metro perfurado e permite a retirada de amostras deformadas. Ao número de golpes aplicados convencionou-se chamar de N_{SPT}.

Tsutsumi (2000) explica que a sondagem de simples reconhecimento foi introduzida no Brasil em 1939, pela Seção de Solos e Fundações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São

Paulo (IPT), que em face das dificuldades encontradas em conseguir tubos com as dimensões do amostrador Raymond, desenvolveu seu próprio amostrador, utilizando-o até a década de 70. Com a tendência internacional de normalização do equipamento e procedimento de ensaio este equipamento deixou de ser usado.

Seguindo a NBR 6484 (ABNT, 2001), pode-se descrever o processo, de forma simplificada, do ensaio SPT nas seguintes etapas:

- Abertura do furo de sondagem;
- Ensaio de penetração dinâmica;
- Amostragem do solo;
- Avaliação do nível d'água (caso exista);
- Identificação e classificação das amostras de solo;
- Relatório técnico da sondagem.

Segundo a NBR 6484 (ABNT, 2001) a elaboração de uma sondagem é um processo repetitivo das três primeiras fases, para cada metro de solo sondado, conforme esquema mostrado na Figura 2.13. Assim, em cada metro faz-se inicialmente a abertura do furo de um comprimento igual a 55 cm, deixando-se os restantes 45 cm de solo para a realização do ensaio de penetração e amostragem.

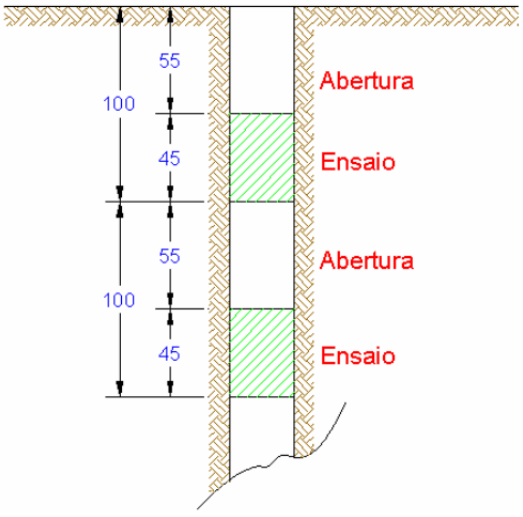
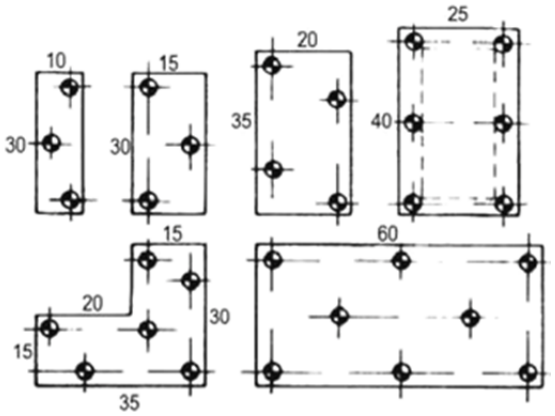


Figura 2.13 – Esquema de elaboração do ensaio SPT.

Seguindo os procedimentos de norma, os resultados de uma sondagem devem ser apresentados em forma de relatório e anexos. O relatório fornece dados gerais sobre o local e o tipo de obra, descrição sumária sobre equipamentos e outras julgadas pertinentes. Uma planta de localização dos furos e da referência de nível (RN) adotada, bem como o perfil de cada furo, deve ser apresentada como anexo em cada boletim de sondagem. Em cada perfil deverão constar as seguintes informações:

- Número do furo de sondagem;
- Cota da boca do furo;
- Data de início e término da sondagem;
- Posição das amostras coletadas e das não recuperadas;
- Profundidade das diversas transições entre camadas e do fim do furo;
- Os índices de resistência à penetração (N_{SPT});
- Identificação, classificação e a convenção gráfica das amostras segundo a NBR 6484(ABNT, 2001) e NBR 13441 (ABNT, 1995);
- Posição do NA e data de observação;
- Processos de perfuração empregados e profundidades atingidas: TH para trado helicoidal, CA para circulação de água;
- Cota da boca do tubo de revestimento.

O número e distribuição de sondagens em planta dependerão do tipo de obra e da fase em que se encontra a investigação do subsolo. Quando a área de projeção em planta do edifício tem sua localização bem definida dentro do terreno, segundo a NBR 8036 (ABNT, 1983), o número mínimo de sondagens a serem realizadas é função de tal área de projeção, conforme mostrado na Figura 2.14.



(a)

ÁREA CONSTRUÍDA (m²)	NÚMERO MÍNIMO DE FUROS
200	2
200 – 400	3
400 – 600	3
600 – 800	4
800 – 1000	5
1000 – 1200	6
1200 – 1600	7
1600 – 2000	8
2000 – 2400	9
> 2400	A critério

(b)

Figura 2.14 – Distribuição dos furos de sondagens - (a) Sugestão para distribuição em planta dos furos (b) Tabela com o número mínimo de furos. (NBR 8036/83).

Segundo a NBR 8036 (ABNT, 1983), nos casos em que não houver ainda disposição em planta dos edifícios, como nos estudos de viabilidade ou escolha de local, o número de sondagens deve ser fixado de forma que a distância máxima entre elas seja de 100 m, com um mínimo de três sondagens.

Segundo Schnaid (2000) o ensaio SPT tem sido usado para inúmeras aplicações, desde amostragem para identificação dos diferentes horizontes, previsão da tensão admissível de fundações diretas em solos granulares, até correlações com outras propriedades geotécnicas. O autor adverte que as correlações de origem empírica são obtidas em geral em condições particulares e específicas, com a expressa limitação de uso por parte dos autores, mas acabam extrapoladas na prática, muitas vezes de forma não apropriada.

Além disso, Schnaid (2000) resume bem o ensaio SPT quando explica que a interpretação do ensaio SPT é de natureza empírica. O uso dos resultados deve obedecer a critérios estabelecidos pelo projetista, normas, recomendações de especialistas, experiência profissional local e julgamento geotécnico.

É fato que apesar de normas e critérios bem definidos, o ensaio SPT ainda é um ensaio bastante questionado tanto no ambiente acadêmico como no ambiente profissional. Delatim (2011) relata em texto a qualidade dos serviços de sondagem executadas no Brasil. Segundo o autor, alguns fatores podem ser apontados como responsáveis pela queda na qualidade dos serviços executados e consequentemente dos resultados apresentados:

- Falta de equipamento adequado;

- Falta de pessoal qualificado;
- Falta de treinamento da equipe de campo;
- Falta de Fiscalização.

Delatim (2011) conduz para uma reflexão sobre a qualidade do ensaio SPT e explica que há muito que resgatar para que se possa atingir um nível satisfatório de qualidade aos serviços de sondagens e aponta em suas conclusões o que deve ser trabalhado para melhoria do ensaio, citando alguns problemas detectados em suas avaliações a respeito do tema, tais como:

- O padrão de qualidade das sondagens tem demonstrado que está aquém do esperado e preconizado pelas normas vigentes, ou seja, as normas não estão sendo respeitadas.
- A queda no padrão de qualidade decorre de três fatores principais:
    - Falta de mão de obra qualificada – falta de treinamento;
    - Falta de um controle de qualidade por parte de quem executa;
    - Falta de fiscalização por parte de quem contrata os serviços.
- Há uma frequente falta de comprometimento das empresas de sondagem com o contexto geológico do local onde estão sendo realizadas as investigações, refletindo em descrições equivocadas tanto dos solos quanto dos testemunhos de sondagem.

A consequência óbvia de todos esses fatores é a não confiabilidade nos resultados e/ou nas informações fornecidas, o que pode resultar em riscos e/ou ônus para os projetos elaborados a partir dessas sondagens.

2.9- GEOESTATÍSTICA E MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

A maior parte da teoria sobre geoestatística foi criada muito antes da disponibilidade de computadores que permitiam sua aplicação em ciências da terra. O desenvolvimento da geoestatística, desde o fim dos anos 1960, foi realizado principalmente para atender aplicações voltadas para engenheiros. Pode-se dizer que as aplicações mais precoces da geoestatística foram relacionadas com a distribuição espacial de um ou mais atributos, também denominado de mapeamento espacial de dados (Deutsch & Journel, 1998).

A geoestatística pode ser considerada um sub-ramo da estatística espacial na qual os dados consistem de uma amostra finita de valores medidos, relativos a uma base espacial de um fenômeno contínuo. Os exemplos incluem: altitudes acima do nível do mar em um levantamento topográfico; medidas de poluição advindas de uma rede finita de estações de monitoramento; determinações das propriedades do solo a partir de amostras em campo; entre outros. A geoestatística tem uma história interessante, pode-se atribuir originalmente o termo a Georges Matheron em Fontainebleau, França na década de 1960 (Diggle & Ribeiro Jr., 2007).

Contudo, foi o engenheiro sul-africano Daniel Krige junto com o estatístico Sichel, que iniciaram, ainda na década de 1950, a publicação de resultados de estudos, por eles desenvolvidos (de forma ainda empírica), sobre dados relativos a atividades desenvolvidas em minas de ouro do Rand, na África do Sul. Esses estudos geraram a geoestatística como instrumento de avaliação de jazidas minerais (Andriotti, 2009).

O engenheiro francês Georges Matheron, por sua vez, formalizou matematicamente e estatisticamente o que se tornou posteriormente o termo geoestatística, para descrever seu trabalho, também abordando problemas de previsão espacial que surgiam no setor de mineração. As ideias da escola de Fontainebleau foram desenvolvidas em grande parte independente da popular estatística espacial, com uma terminologia distinta e um estilo que tende a esconder a forte conexão com desenvolvimentos paralelos em estatística espacial. Segundo Diggle & Ribeiro Jr. (2007), estes desenvolvimentos paralelos incluíram o trabalho de Kolmogorov (1941), Mat'ern (1960, reeditado como Mat'ern (1986), Whittle (1954, 1962, 1963), Bartlett (1964, 1967) e outros. Por exemplo, o método conhecido como krigagem simples é equivalente ao erro quadrático médio mínimo de previsão sob um modelo linear de Gauss com valores de parâmetros conhecidos. Trabalhos de Watson (1971, 1972) e o livro de Ripley (1981) fizeram esta ligação explícita.

A geoestatística trata as variáveis como regionalizadas (variáveis com condicionamento espacial), e pode ser considerada uma aplicação prática da teoria das variáveis regionalizadas. Um ponto importante a ser destacado nessa teoria é a importância dada às relações espaciais existentes entre as observações que compõem uma amostra. A geoestatística possibilita, também, a quantificação dos erros cometidos nas avaliações (Andriotti, 2009).

As técnicas geoestatísticas podem ser usadas para descrever e modelar padrões espaciais (variografia), para predizer valores em locais não amostrados (krigagem), para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados (variância da krigagem) e para otimizar malhas de amostragem (Andriotti, 2009).

A krigagem, usada para mapeamento, não é significativamente melhor do que qualquer método determinístico ou outra técnica de interpolação que seja personalizada para tratar de anisotropia, agrupamento de dados, entre outros aspectos espaciais importantes de uma variável que esteja sendo mapeada. O algoritmo de krigagem também fornece uma variância do erro. Infelizmente, a variância de krigagem é independente dos valores dados e não pode ser usada, em geral, como uma medida de precisão da estimativa (Deutsch & Journel, 1998).

Interpolação é o procedimento pelo qual se estimam valores de uma variável em área interior aos pontos de amostragem disponíveis permitindo representar em mapa, de forma contínua, o comportamento de variáveis amostradas pontualmente; a extrapolação estima valores da variável fora dos limites da área amostrada (Andriotti, 2009).

Burrough & Mcdonnell (1998) explicam que os dados de observações pontuais são convertidos para campos contínuos por meio de interpolação de valores em pontos com valores conhecidos, tal como passar um mapa vetorial para matricial (*raster)*. Toma-se por princípio que o valor de um atributo num ponto tende a ser semelhante aos de pontos vizinhos por comparação.

A interpolação, de maneira geral, tem a capacidade de apoiar os processos de decisão espacial, bem como passar informação vetorial (pontos) para matricial (*raster)*. A dúvida que se tem é saber que tipo de interpolador se ajusta melhor aos dados que serão interpolados e ao resultado esperado (Burrough & Mcdonnell, 1998).

Há vários tipos de interpolação e qualquer uma pode ser feita a partir de dados pontuais, linhas e áreas. Nos interpoladores globais usa-se uma única função para toda a área em estudo. Por sua vez, os interpoladores locais aplicam algoritmos repetidamente a subconjuntos dos pontos de amostragem. Os interpoladores exatos respeitam os dados existentes, enquanto que os aproximados assumem incertezas (erros) nos dados existentes, respeitando as tendências globais dos dados (Bonhan-Carter, 1994).

Segundo Sturaro & Landim (1995), para fazer a previsão em locais onde não foram coletadas amostras, é preciso ter o modelo do comportamento do fenômeno natural que deu origem às variáveis que se quer estudar. É muito difícil conhecer em detalhes os fenômenos naturais, bastando para isso imaginar o processo de formação de solos ou rochas que normalmente são o suporte das propriedades geológicas. Se houvesse um conhecimento perfeito dos processos físicos e/ou químicos que geraram os valores das variáveis, seria possível usar modelos determinísticos com um número pequeno de amostras para fazer estimativas. No entanto, em geociências, as variáveis comumente pesquisadas são o resultado de um vasto número de processos com interações complexas, que praticamente impossibilitam a sua descrição quantitativamente. Assim, para análise da maioria das variáveis, oriundas de fenômenos naturais, é necessário se admitir alguma incerteza no comportamento destes fenômenos entre duas posições espaciais da amostragem. Essa complexidade dos processos que originam os dados faz parecer que os mesmos possuem um comportamento aleatório, quando, de fato, eles refletem o desconhecimento que se tem de todos os processos e das suas interações no fenômeno natural. É neste contexto que a geoestatística, baseada em modelos probabilísticos, surge como uma consistente alternativa para modelar este comportamento com o uso de funções aleatórias.

Landim (1998) reforça o conceito de que a geoestatística trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, as quais têm um comportamento espacial, mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente casuais e as totalmente determinísticas. Apresentam uma aparente continuidade no espaço. A continuidade geográfica atribuída se manifesta pela tendência que a variável tem de apresentar valores próximos em dois pontos vizinhos e diferentes à medida que os pontos vão ficando mais distantes um do outro.
Para Landim (1998) a variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples.

O uso de procedimentos geoestatísticos baseados em técnicas de krigagem no ambiente de geoprocessamento engloba análise exploratória, geração e modelagem de semivariograma, validação e interpolação por krigagem (Câmara *et al.,* 1996).

2.9.1.1- PESQUISAS RECENTES NA REGIÃO CENTRO-OESTE COM USO DE GEOESTATÍSTICA

Segundo Souza (2009) a primeira experiência do Grupo de Cartografia e Geoprocessamento da UnB com mapeamento para escala urbana foi realizada por Oliveira (1996) em seu trabalho, intitulado "Mapeamento Geotécnico da Asa Sul – Brasília/DF", neste trabalho utilizou-se as sondagens SPT, com as quais se montou um banco de dados. As localizações das sondagens foram georreferenciadas e desenhadas em programa CAD (*Computer Aid Design*), com as quais foram elaboradas seções geológicas/geotécnicas visando a modelagem da distribuição espacial dos materiais de sub-superfície e do nível do lençol freático.

Com Romão (2006) aplicou-se a metodologia geoestatística para o mapeamento do solo (sub-superfície) com base em 560 furos de sondagens SPT, em Goiânia (GO). As informações compiladas permitiram o entendimento da distribuição de propriedades geotécnicas referentes aos compartimentos definidos na modelagem da superfície do terreno para cada atributo morfométrico. Os valores relativos aos índices N_{SPT} foram espacializados segundo o método de interpolação denominado de método da vizinhança natural. O método da vizinhança natural consiste numa interpolação por média ponderada pelo inverso da distância que cria uma triangulação de Delaunay dos pontos de entrada e seleciona os nós mais próximos na parte convexa formada pelas facetas em torno dos pontos de interpolação, e a partir dessa vizinhança denominada natural, pondera os seus valores de forma proporcional a essa área convexa.

Mccoy & Johnston em 2002, citados por Romão (2006), dizem que o método da vizinhança natural é mais apropriado nos casos em que os pontos amostrados são distribuídos com densidade descontínua, sendo uma técnica de interpolação que tem a vantagem de não ser necessário se especificar parâmetros tais como raio, número de pontos vizinhos, ou mesmo de ponderações. Logo, foi aplicado esse método de modelagem às amostras utilizadas a partir das sondagens geotécnicas realizadas na área de estudo, por estarem concentradas na região central de Goiânia e possuírem uma densidade espacial descontínua.

Em sua pesquisa Romão (2006) diz que a partir dos valores de N_{SPT} contidos no banco de dados foram realizadas consultas específicas, tais como a espessura dos materiais inconsolidados e a profundidade do nível d'água. Modelos numéricos de terreno foram então elaborados segundo o método da vizinhança natural, para a modelagem dos índices N_{SPT} a

determinadas profundidades, para a modelagem da espessura do material inconsolidado e para a modelagem da profundidade do nível d'água a partir da superfície, considerando as duas estações ao longo do ano, para os meses de abril a setembro (estação seca) e para os meses de outubro a março (estação chuvosa). Com a finalidade de comparação, para a modelagem da espessura dos materiais inconsolidados também foi realizada a modelagem por krigagem ordinária.

Silva (2007) realizou sua pesquisa na área tombada de Brasília, cujo objetivo era contribuir com informações geotécnicas que subsidiassem o processo de minimização das distorções e agressões ao plano original de Lúcio Costa. A principal ideia deste trabalho foi criar um banco de dados alfanuméricos com dados geotécnicos de sondagem SPT e como experiência inicial, testar programas computacionais que permitissem interpolações tridimensionais de dados de solo, de forma a caracterizar a distribuição desses dados em um espaço representado por volume.

Entretanto, a busca por um programa computacional que atendesse a todas as expectativas da pesquisa restringiu a modelagem tridimensional dos dados de solo da pesquisa de Silva (2007) em três estudos de caso dentro da área tombada de Brasília, sendo eles: Projeto Ilhas do Lago, Universidade de Brasília (UnB) e Setor Sudoeste de Brasília. Como resultados obtiveram-se: modelos volumétricos de camadas de solos (3D), modelos volumétricos de níveis interpolados de N_{SPT} (3D), cartas hipsométricas com identificação de seções de interesse (2D), seções de interesse para camadas de solos e N_{SPT} (2D), modelos de superfícies das interfaces de camadas de solo e nível d'água com espacialização dos furos de sondagem (2,5D) e prédios (3D), modelos de seções ortogonais de N_{SPT} (3D), e um banco de dados com 1.563 furos de sondagem cadastrados com o máximo de informações contidas nos relatórios de sondagens. Apesar disso, a ideia principal era gerar um produto que atendesse a toda a área de estudo proposta pelo autor, entretanto, segundo o autor, era necessário migrar todo o banco de dados bidimensional para uma plataforma totalmente tridimensional, um processo moroso e que deveria ser feito por etapas.

Assim, com a pesquisa de Alves (2009), o banco de dados foi migrado para uma plataforma tridimensional, além disso, o banco de dados foi expandido para aproximadamente 1.800 furos de sondagem. A pesquisa tinha como enfoque a caracterização geotécnica do solo do Plano Piloto de Brasília por meio do mapeamento dos solos com diferentes adequabilidades à

escavação indicando vantagens e dificuldades de construção de garagens subterrâneas bem como do prolongamento da linha do metrô na Asa Norte. Como resultados da pesquisa obtiveram-se: cartas 2D de N_{SPT} para as profundidades de 3, 6, 9, 12, 15, 20 e 30 m, carta da espessura dos materiais inconsolidados, da distância entre construções e da profundidade do impenetrável e do nível d' água. E ainda, modelos tridimensionais (3D) da estratigrafia e de níveis interpolados de N_{SPT}, cartas hipsométricas com identificação de seções de interesse, seções de interesse (2D) para camadas de solos e N_{SPT}. E por fim, Alves (2009) apresentou várias cartas geotécnicas, obtidas por análise de multicritérios, orientativas para a construção de obras subterrâneas na cidade de Brasília.

2.9.1.2- INTERPOLADOR INVERSO PONDERADO DA DISTÂNCIA (*IDW*)

O método de interpolação conhecido com Inverso Ponderado da Distância ou *Inverse Distance Weighting* (IDW) é um método de interpolação bastante conhecido e utilizado em espacialização de dados. O método que também é algumas vezes denominado de método de Shepard (Shepard, 1968) é atribuído a esse autor pelo notório trabalho intitulado "*A Two-Dimensional Interpolation Function for Irregularly-Spaced Data*" em que o mesmo comentava os problemas relativos ao IDW em sua forma mais simples e desenvolveu um novo método para espacializar dados em ambiente computacional. Na época, Shepard inseriu sua metodologia no programa computacional SYMAP, fazendo várias observações no código que passavam desde a escolha do expoente de ponderação até a redução do erro computacional, o código foi desenvolvido em Fortran IV e incorporado ao SYMAP IV e V.

Landim (2000) comenta que o IDW é um dos métodos de interpolação mais utilizados e explica que para calcular o valor de um ponto faz-se a média com os pontos mais próximos, a média é ponderada pelo inverso da distância aos pontos.

Landim (2000) comenta suas principais características:

- Mais utilizado dentre os métodos de distância ponderada;
- Método muito utilizado para geração de MNT;
- O peso dado durante a interpolação é tal que a influência de um ponto amostrado em relação a outro diminui, conforme aumenta a distância entre eles;

- Pontos amostrados de localização próxima ao ponto a ser estimado recebem peso maior que os pontos amostrados de localização mais distantes;

- Ao calcular o valor de um ponto, a soma de todos os pesos dados aos pontos amostrados vizinhos é igual a um (1), ou seja, é atribuído um peso proporcional à contribuição de cada ponto vizinho;

- Quando a posição de uma observação coincide com um ponto, seu valor recebe peso 1, enquanto todos os valores vizinhos recebem peso zero (0); o resultado será o nó recebendo o valor exato da observação ali situada;

- O expoente de ponderação pode ser selecionado;

- Os resultados são variáveis, desde altamente tendenciosos a favor dos pontos mais próximos a resultados onde o peso é praticamente o mesmo para todos os pontos próximos.

O expoente tem os seguintes efeitos sobre os resultados estimados:

- Expoentes baixos (0 a 2): destacam anomalias locais;

- Expoentes altos (3 a 5): suavizam anomalias locais;

- Expoentes ≥ 10: resultam em estimativas "poligonais" (planas);

- Expoente = zero: resulta em estimativas de "média móvel";

- Expoente = 2: inverso do quadrado da distância.

Define-se o processo de cálculo do valor a ser estimado, como:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Z_i}{h_{ij}^{\beta}}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{h_{ij}^{\beta}}} \tag{2.8}$$

Z = valor interpolado para o nó do reticulado (grid);
Z_i = valor do ponto amostrado vizinho ao nó;
h_{ij} = distância entre o nó da grade e Z_i;
β = expoente de ponderação (peso);
n = número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó.

Segundo Andriotti (2009) a técnica do IDW tende a formar contornos concêntricos ao redor dos pontos de amostragem. Uma das desvantagens reside nos critérios que levam à escolha dos ponderadores, o que de fato é comentado por Shepard (1968), que muitas vezes são escolhidos sem uma justificativa técnica bem explicada ou sem ser fundamentada em algum comportamento específico da variável estudada.

Andriotti (2009) ainda explica que o IDW é um método puramente matemático (determinístico) e que não leva em consideração vários parâmetros, como por exemplo, a geologia.

Landim (2000) explica que o IDW é muito utilizado em Sistema de Informação Geográfico (SIG) para transformar dados pontuais em matriciais (*raster)* e não se ajustam bem com dados espaçados irregularmente. A Tabela 2.6 mostra um resumo das principais vantagens e desvantagens desse interpolador.

Tabela 2.6 – Vantagens e desvantagens do interpolador inverso ponderado da distância (Modificado de Landim, 2000).

Vantagens	**Desvantagens**
• fácil de entender matematicamente. • algoritmo bem conhecido e discutido. • disponível em muitos *softwares.* • utiliza pouco tempo de computação. • é razoavelmente fiel aos valores amostrados originais. • não estima valores de pontos amostrados maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; bom para estimativas de espessura, concentração química e propriedades físicas. • muito bom para analisar variações de pequena amplitude (anomalias) entre os dados irregularmente distribuídos. • bom estimador para propósitos gerais. • pode interpolar por setor, onde o usuário pode escolher a quantidade de amostras, por setor, que serão levadas em consideração, em uma determinada estimativa de valor.	• não estima valores de Zi maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; ruim para estimativas de dados estruturais, isto é, para determinar o topo ou a base de horizontes estratigráficos ou litológicos. • Influência de valores locais anômalos é dificilmente removida; dados em *clusters* podem influenciar as estimativas de modo bastante tendencioso. • cria muitas observações ilusórias devido às limitações do método de interpolação, o que pode ser reduzido ou eliminado se o raio de busca for reduzido, se a tendência for removida previamente e se ocorrer mudanças no expoente utilizado, no tamanho da grade, no número de pontos utilizados e ponderação direcional.
Quando usar	**Quando não usar**
• estimativas de propósito gerais. • distribuição uniforme de dados. • boa densidade de dados. • para destacar anomalias locais. • para calcular volume em operações entre *grids.*	• dados agrupados • tendência pronunciada presente. • dados com falhas e distribuídos de forma esparsa. • não quiser imperfeições no modelo.

2.9.2- KRIGEAGEM, KRIGAGEM OU *KRIGING*

Atualmente existe uma vasta literatura sobre o método de interpolação geoestatístico krigeagem ou krigagem, com livros, artigos, revistas e até o próprio código fonte, de Deutsch & Journel (1998), desenvolvido em FORTRAN, conhecido como a biblioteca GSLIB que é distribuída gratuitamente pela *internet*. A descrição do método e suas deduções matemáticas podem ser encontradas, com bastante detalhe em literaturas como: Bonhan-Carter (1994), Burrough & Mcdonnell (1998), Deutsch & Journel (1998) e a biblioteca GSLIB, Chilès & Delfiner (1999), Krasilnikov *et al.* (2008), Hengl (2009) entre outros; e no Brasil alguns autores como: Camargo (1997), Câmara *et al.* (1998), Landim (2000) e Andriotti (2009) são referencias facilmente encontradas. Em função disso, não é objetivo da pesquisa, explicar com minúcia o método, mas sim, mostrar suas vantagens e desvantagens, além de algumas particularidades.

Landim (2000) resume a krigeagem como:

- Método geoestatístico que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas;
- Nas variáveis regionalizadas deve existir certa continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos onde o valor da variável seja desconhecido;
- Ao ser constatado que a variável não possui continuidade espacial na área estudada, não há sentido lógico em estimar/interpolar usando-se a krigeagem;
- Único meio disponível para se verificar a existência ou não de continuidade espacial, e se houver, quais os parâmetros que caracterizam este comportamento regionalizado, é com o uso de análise variográfica;
- Utiliza distâncias ponderadas e estimação por médias móveis, pelos quais os pesos adequados são obtidos a partir de um variograma, representativo da média das diferenças ao quadrado dos valores irregularmente distribuídos de Zi, a intervalos de distâncias especificados (*lags*);

- É necessário um sistema de equações em matrizes, no qual são usados os parâmetros variográficos para a obtenção dos pesos a serem usados, para o cálculo do valor do ponto a ser estimado/interpolado;

- Quando um variograma é adequadamente elaborado, a estimativa por krigeagem resultante é reconhecida como sendo a estimativa linear melhor e não tendenciosa (*BLUE = best, linear, unbiased estimate*).

A Tabela 2.7 mostra um resumo das principais vantagens e desvantagens desse interpolador.

Tabela 2.7 – Vantagens e desvantagens da krigeagem (Modificado de Landim, 2000).

Vantagens	**Desvantagens**
Valores estimados baseiam-se no semivariograma; se for apropriado, fornece as seguintes informações: • Parâmetros adequados de amostragem: número de amostras, distribuição e densidade; • Parâmetros adequados de busca: tamanho da área de busca, forma (circular ou elipsóide) e, se elipsóide, orientação do eixo principal; • Parâmetros adequados da grade: tamanho das células, forma e orientação; • Natureza da distribuição espacial da variável investigada: uniformidade da distribuição, importância relativa da influência espacial x casual; • Previsibilidade da variação espacial da variável avaliada. Se o semivariograma for apropriado, controla a krigeagem, com as seguintes vantagens: • Evita ponderação arbitrária dos pontos amostrados; • Permite a determinação das melhores estimativas sem tendenciosidade: o melhor estimador é aquele que produz a melhor precisão (menor variância); • Permite o estabelecimento de limites de confiança, indicando se os resultados são aceitáveis e se a estratégia de amostragem deve ser modificada; • Precisão, contornos suaves, artefatos indesejáveis raros a não ser nas bordas do mapa. • Interpolador exato: os valores estimados para os nós das células são exatamente iguais ao valor amostrado naquela posição. • Estima além dos limites máximo e mínimo dos valores dos pontos amostrados. • Modela tanto tendências regionais quanto anomalias locais. Calcula variâncias dos pontos estimados (erros), que podem ser utilizadas para: • Quantificar um intervalo de valores (±) para os pontos estimados, definindo estimativas realistas; • Calcular intervalos de confiança para verificar a probabilidade dos valores ocorrerem dentro de um intervalo de ± 2 unidades de desvio padrão da média;	• O usuário pode não compreender o uso dos controles matemáticos e apesar disto resultados são sempre obtidos. • É necessário tempo para preparo do variograma e entendimento de geoestatística. • Pode não ser possível a construção de um variograma adequado devido à natureza da variação espacial da variável analisada. Isto pode ocorrer devido à magnitude da amostragem e por erros analíticos. • Requer longo tempo de computação para grupos de dados grandes ou complexos. • Necessidade de software capacitado. • Presença de descontinuidades pode requerer o ajuste dos dados, a serem interpolados, em mais de um modelo.

variâncias mapeadas podem indicar locais para adensamento da amostragem.	
Quando usar	**Quando não usar**
• Estiverem presentes tanto tendências regionais quanto anomalias locais. • Anomalia local não presente em toda a área, por ex. em ambiente fluvial. • Quiser estimar com base em uma média global. • Tiver dados irregularmente amostrados ou agrupados (*clustered*).	• Menos de 30 pontos amostrados: número desaconselhável de pares para modelar o semivariograma. • Erro grande e inexplicado (efeito pepita pronunciado). • Amostras de populações diversas.

Krajewski & Gibbs em 1966, citados por Landim (2000), ainda fornecem uma comparação entre os principais algoritmos de interpolação, descritos na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Comparação de resultados entre os principais interpoladores (Modificado de Landim, 2000).

Algoritmo	Fidelidade aos dados originais	Suavidade das curvas	Velocidade de computação	Precisão geral
Triangulação	1	5	1	5
Inverso da Distância	1	3	2	3
Superfície/ Tendência	5	1	3	2
Mínima Curvatura	4	2	4	3
Krigeagem	2	3	5	2

1 = melhor→ 5 = pior

Landim (2000) ainda comenta que os tipos de krigreagem mais utilizados são:

- Krigeagem 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 estimação local, em conjunto com os pontos vizinhos estabelecidos como necessários para a estimação.

- Krigeagem ordinária: As médias locais não são necessariamente próximas da média da população usando-se apenas os pontos vizinhos para a estimação. É o método mais usado em problemas ambientais.

- Cokrigeagem: É uma extensão do anterior a situações em que duas ou mais variáveis são espacialmente dependentes e a variável que se quer estimar não está amostrada com a intensidade com que estão as outras variáveis dependentes, utilizando-se os valores destas e as suas dependências para estimar a variável requerida.

2.9.2.1- VARIÁVEIS REGIONALIZADAS

O termo variável regionalizada foi utilizado por Matheron e tinha o propósito de alertar para os aspectos aleatórios e estruturados dos fenômenos estudados. É aleatório no sentido de que os valores das medições feitas podem variar consideravelmente entre si e sua característica regionalizada é estruturada segundo certa lei no espaço. Assim surge o conceito geoestatístico que parte do princípio que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados (Andriotti, 2009).

Uma variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples. A teoria das variáveis regionalizadas pressupõe que a variação de uma variável pode ser expressa pela soma de três componentes (Burrough & McDonnell, 1998):

a) Um componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante;

b) Um componente aleatório, espacialmente correlacionado; e

c) Um ruído aleatório ou erro residual.

Câmara *et al*. (1998) citando o trabalho de Olea (1975, 1977), explica que as principais características de uma variável regionalizada são:

- *Localização*: uma variável regionalizada é numericamente definida por um valor, o qual está associado a uma amostra de tamanho, forma e orientação específicos. Essas características geométricas da amostra são denominadas s*uporte geométrico*. O suporte geométrico não necessariamente compreende volumes, podendo se referir também a áreas e linhas. Quando o suporte geométrico tende a zero, tem-se um ponto ou amostra pontual e o suporte geométrico é imaterial.

- *Anisotropia*: algumas variáveis regionalizadas são anisotrópicas, isto é, apresentam variações graduais numa direção e rápidas ou irregulares em outra.

- *Continuidade*: dependendo do fenômeno sendo observado, a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser grande ou pequena. Apesar da complexidade das flutuações, uma continuidade média geralmente está presente.

2.9.2.2- VARIOGRAMA OU SEMIVARIOGRAMA?

O variograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigeagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Câmara *et al*., 1998). Trata-se de uma função intrínseca que reflete a estrutura do fenômeno estudado, medindo as relações estatísticas, por meio da análise das covariâncias, que existem entre as amostras espaçadas de sucessivos valores de h. É uma função crescente com h até um determinado valor de h, valor conhecido com amplitude Andriotti (2009).

Segundo Andriotti (2009) a bibliografia especializada utiliza extensivamente as palavras variograma e semivariograma. O mais comum é a utilização da palavra variograma quando, na realidade, se está tratando de semivariograma. São duas quantidades diferentes: o variograma vale o dobro do semivariograma, ou seja:

1. $2\gamma(h)$ é variograma

2. $\gamma(h)$ é semivariograma

Vários pesquisadores do assunto concordam que não há necessidade entre dois termos e optam pela brevidade, contudo a pesquisa vai utilizar o termo semivariograma em função da convenção dos programas computacionais utilizados na pesquisa.

2.9.2.3- ANÁLISE ESTRUTURAL

Análise estrutural é a denominação que se dá, em geoestatística, às operações de estudos iniciais dos dados, elaboração de semivariogramas experimentais e seu ajuste aos modelos teóricos conhecidos (Camargo, 1997).

Os conceitos de semivariograma e semivariância são necessários para que se entenda todo o processo de interpolação. A semivariância é a medida do grau de dependência espacial entre duas amostras. A magnitude da semivariância entre dois pontos depende da distância entre eles, implicando em semivariâncias menores para distâncias menores e semivariâncias maiores para distâncias maiores. O gráfico das semivariâncias em função da distância a um ponto é chamado de semivariograma (Camargo, 1997).

No caso de dados geotécnicos, o semivariograma é uma medida da variabilidade geológico-geotécnica em relação à distância. No entanto, para diferentes direções consideradas, a variabilidade dos dados também se apresenta diferente (Patias, 2010). A função semivariograma (γ(h)) pode ser calculada experimentalmente usando a relação da (2.9, em que n é o número de pares de pontos separados por uma distância h; Z (x) e Z(x+h) são as variáveis amostradas na posição x e na posição x+h, respectivamente.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n}[Z(x) - Z(x+h)]^2 \tag{2.9}$$

Camargo (1997) diz que no semivariograma experimental (Figura 2.15), observam-se os seguintes componentes:

- Alcance (a) – distância que as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;

- Patamar (C) – valor do semivariograma correspondente ao alcance. Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras;

- Efeito pepita (Co) - valor de y quando h=0 revela a descontinuidade do semivariograma. Teoricamente esse valor deveria ser zero, pois duas amostras retiradas no mesmo ponto (h=0) deveriam ter os mesmos valores; quando isso não ocorre atribui-se essa diferença a erros de amostragem, erros de equipamento, ensaios de laboratório e até mesmo a própria variabilidade natural do fenômeno estudado.

- Contribuição (C_1): é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita (C_o).

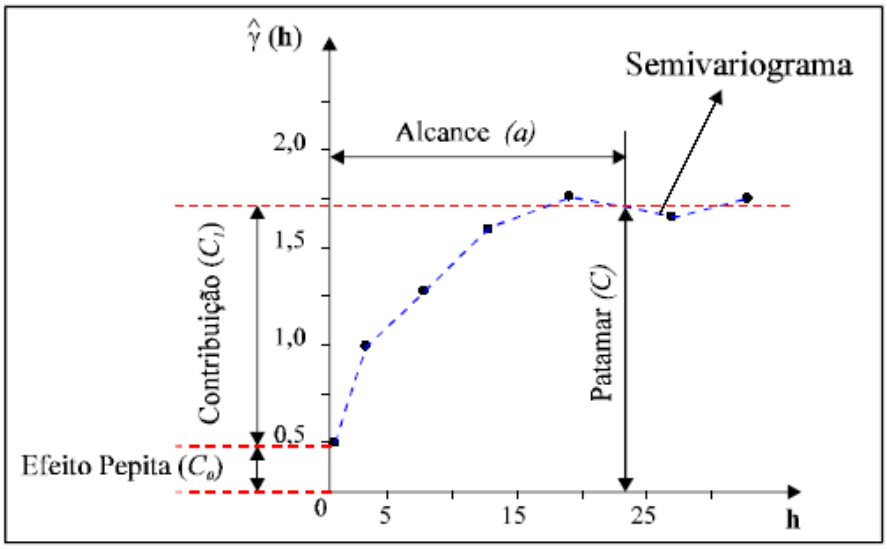


Figura 2.15 – Exemplo de semivariograma experimental (Camargo, 1997).

O efeito pepita tem esse nome por ter sido observado, pela primeira vez, em depósitos auríferos da África do Sul, onde foi associado com a presença de pepitas de minério. O termo efeito pepita deve ser aplicado sempre que essa descontinuidade à origem do semivariograma ocorrer independente do tipo de variável estudada e mesmo que causada por outros fatores que não a presença de pepitas (Andriotti, 2009).

Pode-se definir ainda a função covariância C(h) entre pontos separados por uma distância h, que pode ser calculada como o descrito na (2.10. Onde m é a média da variável Z(x).

$$C(h) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z(x)Z(x+h) - m^2 \tag{2.10}$$

As funções semivariograma e covariância estão relacionadas de acordo com:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \tag{2.11}$$

A covariância é, portanto, encontrada para valores com distâncias h ao longo de um vetor, sendo n o número de pares de valores comparados. Os valores de covariância dependem do tamanho do vetor h e quando a distância h for igual a zero a covariância representa a variância (C(0)).

Segundo Landim (2000), a razão entre Co/C determina o grau de aleatoriedade dos dados:

- Co/C < 0,15 – Componente aleatória pequeno;
- 0,15 < Co/C < 0,30 – Componente aleatório significativo; e
- Co/C > 0,30 – Componente aleatório muito significativo.

Na krigagem geralmente são utilizados três tipos de semivariogramas chamados de modelos transitivos, são eles: modelo esférico, modelo exponencial e modelo gaussiano (Camargo, 1997). A Figura 2.16 ilustra o gráfico de cada modelo e a Tabela 2.9 mostra as fórmulas e características de cada modelo.

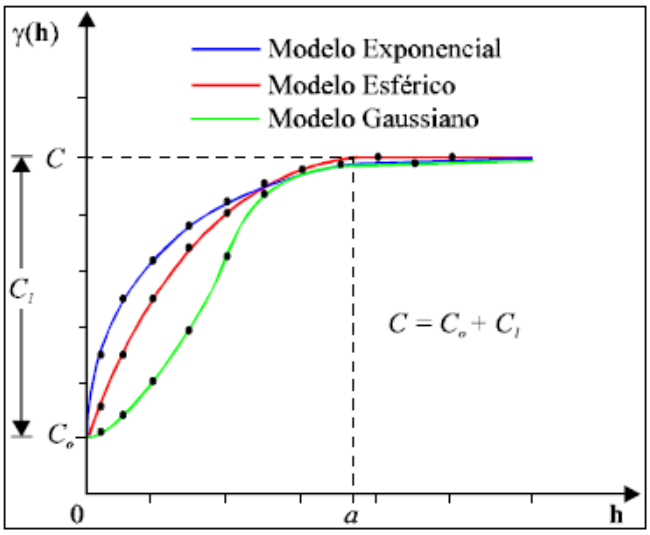


Figura 2.16 – Representação gráfica de semivariogramas experimentais (Camargo, 1997).

Tabela 2.9 – Modelos transitivos de semivariograma (Camargo, 1997).

Modelo	Fórmula	Característica
Esférico	$\gamma(h) = C\left[\frac{3}{2}\left(\frac{\lvert h\rvert}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{\lvert h\rvert}{a}\right)^2\right] \rightarrow h \leq a$ $\gamma(h) = C \rightarrow h > a$	Tem comportamento linear na origem do gráfico. É um modelo comum e de fácil aplicação.
Exponencial	$\gamma(h) = C\left[1 - \exp\left(-\frac{\lvert h\rvert}{a}\right)\right]$	Tem comportamento não linear na origem do gráfico e só alcança C quando $h \rightarrow \infty$.
Gaussiano	$\gamma(h) = C\left[1 - \exp\left(\frac{h}{a}\right)^2\right]$	Na curva do gráfico a curva tem comportamento parabólico.

Segundo Camargo (1997), os semivariogramas experimentais podem ser elaborados para várias direções, com o intuito de detectar anisotropias. As direções mais usadas, que são 0° (leste-oeste), 45^0 (nordeste-sudoeste), 90^0 (norte-sul) e 135^0 (noroeste-sudeste).

Sturaro (1994) cita que dentre os métodos de estimativas mais empregados, o método geoestatístico da krigagem ordinária pode ser considerado como o melhor estimador linear, dado as seguintes características:

- As estimativas são feitas por meio de uma combinação linear dos dados;
- O método procura calcular que o erro residual seja igual a zero e;
- Tem como objetivo minimizar a variância dos erros.

Sturaro (1994) comenta que as duas últimas proposições, do ponto de vista prático, são difíceis de serem concebidas visto que não se conhece os valores reais dos pontos estimados para avaliar o erro e a variância verdadeiros. Para superar esses aspectos, a krigagem ordinária baseia-se em um modelo probabilístico, cujo erro residual médio, bem como a variância dos erros pode ser estimado. Dessa forma, pode-se atribuir pesos às amostras utilizadas nas estimativas de tal modo que o erro médio seja zero e a variância dos erros seja mínima.

Bonham-Carter (1994) descreve o método para estimativa de pesos na krigagem, a mesma descrição pode ser encontrada em vários autores clássicos como Deutsch & Journel (1998) cujo algoritmo desenvolvido em Fortran é amplamente utilizado por vários programas computacionais. A estimativa do valor da variável $\hat{V}(x_0)$ em posição não amostrado x_0 é feita pela combinação linear $V(x_i)$ para $i = 1,2,...,n$ por meio de:

$$\hat{V}(x_0) = \sum_{i=1}^{n} w_i V(x_i) \tag{2.12}$$

Onde, w_i representa os fatores de ponderação (pesos de krigagem) associados a cada valor $V(x_i)$. Assim, o erro da estimativa pode ser expresso por:

$$R(x_0) = \hat{V}(x_0) - V(x_0) \tag{2.13}$$

Onde $V(x_0)$ representa a modelagem aleatória do valor verdadeiro em x_0. A variância dos erros pode ser definida por:

$$Var\{R(x_0)\} = Var\{\hat{V}(x_0) - V(x_0)\} \tag{2.14}$$

O sistema de equações da krigagem ordinária pode ser escrito em notação matricial como sistema de n+1 equações, como se mostra em:

$$\begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \cdots & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_{11} & \cdots & \tilde{C}_{nm} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{10} \\ \vdots \\ \tilde{C}_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

Cuja solução está explicita em:

$$[C]\{W\} = \{D\} \tag{2.16}$$

Onde, a matriz C corresponde aos valores de covariância dos pontos amostrais com eles mesmos. O vetor D consiste nos valores de covariância entre os pontos amostrais e os locais onde se deseja estimar. O vetor W corresponde aos pesos de krigagem e μ ao multiplicador de Lagrange.

Assim, as estimativas em posições não amostradas podem ser feitas via (2.12 e a respectiva variância do erro de estimativa minimizada (σ_R^2) pode ser calculada pela Equação 2.17.

$$\sigma_R^2 = \sigma^2 - [W]^T[D] \qquad \text{Equação 2.17}$$

2.10- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL (3D) DE DADOS GEOTÉCNICOS

Maguire *et al.* (1991) dizem que para muitas aplicações SIG, a questão de modelagem tridimensional (3D) em um ambiente SIG é um assunto chave. Toda informação espacial manipulada é geralmente referenciada para um sistema de coordenadas cartesianas bidimensional (2D). Essa limitação de convenção para aplicações geocientíficas restringe o âmbito de aplicação em mapeamentos que requerem espacialização no eixo vertical (eixo z), como é o caso de dados geotécnicos que têm uma estrutura de dados tridimensionais e que demandam um sistema de informações nessa dimensão.

Nos últimos anos a modelagem 3D tornou-se uma área de pesquisa importante devido a maior complexidade de tarefas em muitas aplicações geocientíficas, tais como planejamento sustentável e desenvolvimento urbano, engenharia civil, riscos e gestão de desastres e monitoramento ambiental. Os problemas e desafios enfrentados atualmente se concentram, quase que exclusivamente, na transportabilidade dos modelos 3D, ou seja, a capacidade de utilizar os dados originalmente desenvolvidos em uma modelagem em outros modelos e vice-versa. Ferramentas elaboradas para simulação 3D, análise e previsão ainda estão ausentes ou, quando disponível, dedicadas a tarefas específicas (Kolbe *et al*., 2011).

Aoki & Cintra (1996) citados no trabalho de Vilar & Esquivel (2009) ressaltam que a visão tridimensional do sistema geotécnico é um elo importante para compreender a relação que une a mecânica dos solos com a engenharia de estruturas e fundações. A variabilidade do sistema estrutural deve-se à criatividade da mente humana capaz de gerar uma infinidade de combinações entre os diversos elementos estruturais que o compõem. Entretanto a

profundidade de assentamento dos elementos estruturais de fundação, na parte inferior do sistema estrutural, é condicionada pela variabilidade do maciço de solos.

Silva & Souza (2007) ressaltam a diferença entre essa nova geração de SIG 3D e a anterior, no tratamento dados em terceira dimensão. Os SIG 2D, usualmente, representam duas dimensões espaciais, permitindo a possibilidade de um atributo do tipo altitude ou profundidade (z) para cada posição (x, y). Já os SIG 3D tratam as três dimensões (x, y, z) como atributos espaciais, o que significa que o sistema lida diretamente com a altitude. Dessa forma, rotinas para cálculo de distâncias, áreas e volumes podem envolver as três coordenadas automaticamente, não necessitando de nenhuma rotina especial desenvolvida pelo usuário.

2.10.1- DESENVOLVIMENTO DE MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE SUB-SUPERFÍCIES – EXPERIÊNCIA NO DISTRITO FEDERAL

Segundo Silva & Souza (2009) em meados da década de noventa, fez-se a primeira tentativa, para a área urbana de Brasília, de realizar um trabalho de mapeamento que permitisse ter uma visão tridimensional da sub-superfície. A dissertação de mestrado "Mapeamento Geotécnico da Asa Sul- Brasília- DF", Oliveira (1996), permitiu fazer várias seções geológico-geotécnicas, usando praticamente métodos tradicionais (analógicos) para a interpretação dos dados das investigações geotécnicas. Apenas as representações, isto é, os desenhos, eram realizados em ambiente computacional, não existindo, na época, capacidade disponível para interpolação tridimensional dos dados.

Contudo, apenas em 2006, surgiu na UnB a primeira pesquisa com modelagem tridimensional de dados geotécnicos, onde Silva (2007) cria um banco de dados digital de sondagens SPT georreferenciadas para modelar a área do Plano Piloto de Brasília. Atualmente, esse banco de dados conta com um cadastro de mais de 1.800 sondagens. Em 2009, com a dissertação de mestrado de Alves (2009), realiza-se uma modelagem 3D, de dados geotécnicos, de todo o Plano Piloto, com ênfase para escavação de garagens subterrâneas e expansão do metrô de Brasília (Silva & Souza, 2009).

Silva & Souza (2009) apresentam em seu trabalho toda metodologia para modelagem tridimensional de dados geotécnicos. O método consiste basicamente em 16 fases, contudo, os autores reforçam que uma ou outra fase pode ser ignorada ou até mesmo outra fase pode ser adicionada, a depender das particularidades do projeto a ser desenvolvido. Essas fases foram

criadas de forma a atender diversas demandas de desenvolvimento da pesquisa, ou seja, adaptadas de acordo com os recursos que a pesquisa dispõe no momento.

Dentre as fases podem-se destacar: identificação ou localização da área de estudo; estruturar os dados em banco de dados digital; estabelecer um perfil de solo a partir dos dados geológicos para modelagem estratigráfica; modelo numérico de terreno (MNT); obtenção e organização dos relatórios de sondagem; transcrição dos parâmetros para modelagem 3D (litologia, estratigrafia, Nspt, grau de recuperação (%), nível d'água, entre outros); entre outras fases que foram sucintamente descritas no trabalho de Silva & Souza (2009).

3- MATERIAIS E MÉTODOS

3.1- INTRODUÇÃO

Com o intuito de dar enfoque real à aplicação desta pesquisa foram realizados três estudos de caso além do estudo da área referente ao setor noroeste de Brasília. Os estudos de caso foram realizados com o objetivo de avaliar projetos de escalas grandes ou escalas maiores que 1:2.000, de forma a permitir uma análise dimensional dos dados, limitações do uso dos modelos, além de permitir avaliar a quantidade e qualidade dos ensaios de campo e suas implicações nos modelos elaborados. Após essa breve descrição é apresentada a metodologia empregada na pesquisa.

3.2- BREVE CARACTERIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO

A identificação da área de trabalho é importante por alguns motivos. O primeiro deles é que a partir da localização da área, pode-se, em muitos casos, inseri-la dentro de um contexto geológico, por meio de estudos existentes para a área. O conhecimento prévio da geologia regional é de suma importância para quem quer realizar qualquer tipo de modelagem, seja ela bidimensional ou tridimensional. Esse conhecimento aliado ao conhecimento geotécnico regional, e a experiência do profissional, diminuem consideravelmente as incertezas dos modelos.

Outro motivo para a localização da área de trabalho, associado ao primeiro, está relacionado ao cadastro georreferenciado dos dados e seu registro em um banco de dados digital, além é claro, da manipulação dos dados que por ventura estejam contidos no banco de dados. Esse processo é otimizado por meio do uso de geotecnologias, tais como o GPS, ferramentas de geoprocessamento e o próprio SIG. Pode-se dizer que em médio prazo, o cadastro permite um bom conhecimento geotécnico da área abrangida por esse, além disso, há outro fator primordial que é a própria expansão do cadastro a longo prazo, o que permite o refinamento dos modelos e do próprio conhecimento geotécnico.

Como a pesquisa trata de três estudos de caso além da área de estudo do setor noroeste, cada área será localizada e descrita separadamente para evitar eventuais erros de interpretação.

3.2.1- ESTUDO DE CASO 1 – OBRA "BRISAS DO LAGO"

O projeto "Brisas do Lago" consiste em um conjunto de edificações localizadas na orla do Lago Paranoá em Brasília-DF onde ocorrem problemas geotécnicos complexos, como, por exemplo, a presença do lençol freático próximo à superfície do terreno e camadas de 3 a 4m de quartzitos (rocha) em forma de cordões ou bisnagas. Os levantamentos geotécnicos e geofísicos na área em questão consistem de um conjunto de 40 furos de sondagem SPT (*Standard Penetration Test*) distribuídos em uma área retangular de 120 m por 220 m e 27 seções geofísicas de eletrorresistividade gerando aproximadamente 6.000 m de levantamento geofísico.

As coordenadas UTM que delimitam essa área são: Xmin = 196.639 m, Xmax=196.753 m, Ymin= 8.250.312 m, Ymax=8.250.533 m, Zona 23, *datum* Astro-Chuá com meridiano central de 45º WGr. A Figura 3.1 mostra a localização da área de estudo.

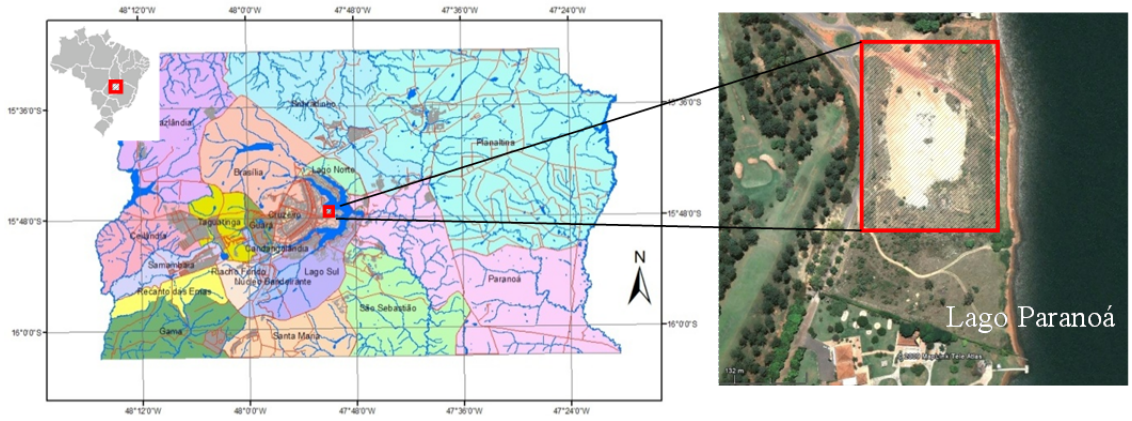


Figura 3.1 – Localização da área do estudo de caso 1 – Projeto "Brisas do Lago".

3.2.2- ESTUDO DE CASO 2 – OBRA "SAUN"

A obra em questão localiza-se no Setor de Autarquias Norte (SAUN), Quadra 5, Lote C (próximo à SCLN 201), Brasília, DF. O projeto consiste em duas torres com subsolo escavado, de maneira que a espacialização se justificou em função da grande variabilidade do solo e pela presença de camadas decimétricas a métricas de quartzitos. Os levantamentos geotécnicos e geofísicos na área em questão consistem de um conjunto de 37 furos de sondagem mista distribuídos em uma área retangular de 112 m por 150 m e 29 seções geofísicas de eletrorresistividade, com eletrodos espaçados de 5 m, gerando aproximadamente 5.500 m de levantamento geofísico.

As coordenadas UTM que delimitam essa área são: Xmin = 191.795 m, Xmax=191.915 m, Ymin= 8.252.570 m, Ymax=8.252.730 m, Zona 23, *datum* Astro-Chuá com meridiano central de 45º WGr. A Figura 3.2 mostra a localização da área de estudo.

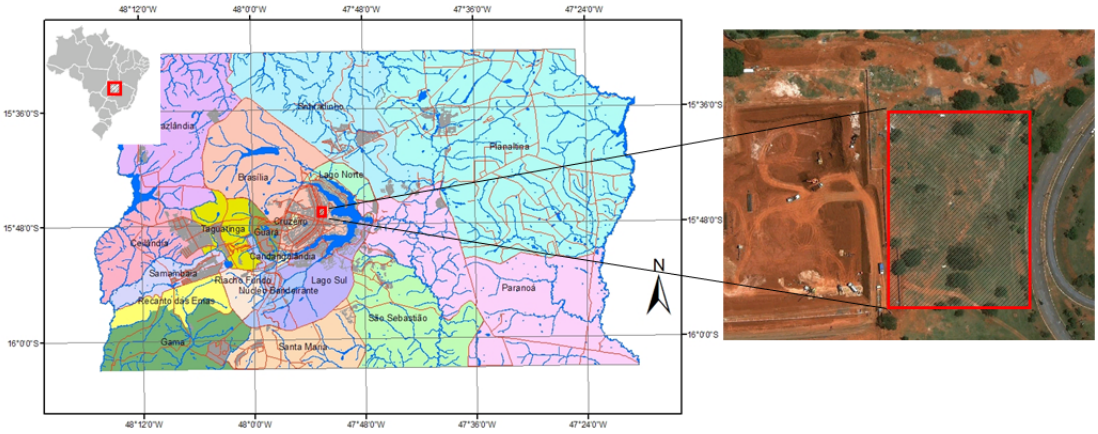


Figura 3.2 – Localização da área do estudo de caso 2 – Obra "SAUN".

3.2.3- ESTUDO DE CASO 3 – OBRA "VERANO - BLANC"

A obra em questão localiza-se na cidade satélite Guará II, Brasília, DF. O projeto consiste em torres residenciais com subsolo escavado, de maneira que a espacialização também se justificou em função da grande variabilidade do solo e por isso a dificuldade de execução da fundação. Nesta obra foram feitas 33 sondagens SPT em um terreno de 60 m por 150 m e posteriormente provas de carga cujos resultados foram agregados aos modelos tridimensionais. O diferencial desta obra é que nela foi proposto um modelo tridimensional de capacidade de carga calibrado pelas provas de carga em campo.

As coordenadas UTM que delimitam essa área são: Xmin = 180.941 m, Xmax=181.001 m, Ymin= 8.246.782 m, Ymax=8.246.932 m, Zona 23, *datum* Astro-Chuá com meridiano central de 45º WGr. A Figura 3.3 mostra a localização da área de estudo.

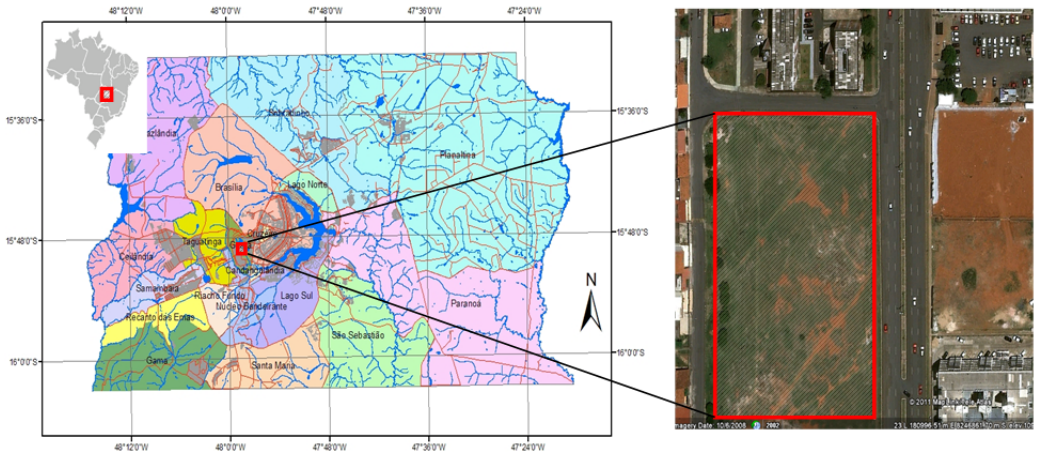


Figura 3.3 – Localização da área do estudo de caso 3 – Obra "VERANO-BLANC".

3.2.4- SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA-DF

O Setor Habitacional Noroeste está localizado na Região Administrativa do Plano Piloto – RA I. O bairro terá como limites, ao norte, o Setor Terminal Norte – STN; a noroeste a Estrada Parque Indústria e Abastecimento – Epia (Estrada Parque Indústria e Abastecimento) – rodovia que se coloca como limite físico entre a área do empreendimento, de um lado, e o Parque Nacional de Brasília e o Setor de Oficinas Norte – SOF-Norte, de outro –; ao sul o Setor Militar Urbano e o Setor de Recreação Pública – *Camping*; e a leste o Parque Ecológico Norte. As coordenadas geográficas que delimitam a área de trabalho são: 47°56'0,56"W e 47°53'34,02" W de longitude e 15°46'24,57"S e 15°43'46,62" S de latitude. O polígono de aproximadamente 2,30 km² é o limite para a área de trabalho (Figura 3.4).

3.2.4.1- SISTEMA VIÁRIO DO SETOR NOROESTE

É importante citar o sistema viário do Setor Noroeste de Brasília, para que se possa entender como será feito o acesso ao novo bairro. De acordo com o Estudo de Impacto Ambiental (Terracap, 1998), elaborado para o bairro, o Setor Noroeste articula-se com a malha viária do DF a partir de três vias:

- A Epia – DF-003 configura-se como principal acesso ao setor, conectando-se às superquadras por meio de vias onde se localizarão as entre quadras comerciais;

- O acesso na porção sul se dará pela EPAA (Estrada Parque de Armazenagem e Abastecimento) e da via existente no local que faz a conexão com as áreas hospitalares atualmente existentes, que serão destinadas às Áreas Institucionais do novo bairro. A partir desta via se dará o acesso às superquadras por meio de uma via interna paralela à Epia e que define o perímetro da área onde se situam as superquadras e as áreas comerciais adjacentes. O acesso direto às superquadras se dará por meio de vias secundárias;

- A via contígua às áreas institucionais se articula, por meio de uma rotatória, a uma via que se conectará àquela que constitui o limite norte do Setor Noroeste. Esta via de direção norte/sul, paralela a uma adutora da Caesb (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal), delimita o Setor Noroeste a leste, e define o limite oeste do Parque Ecológico Norte.

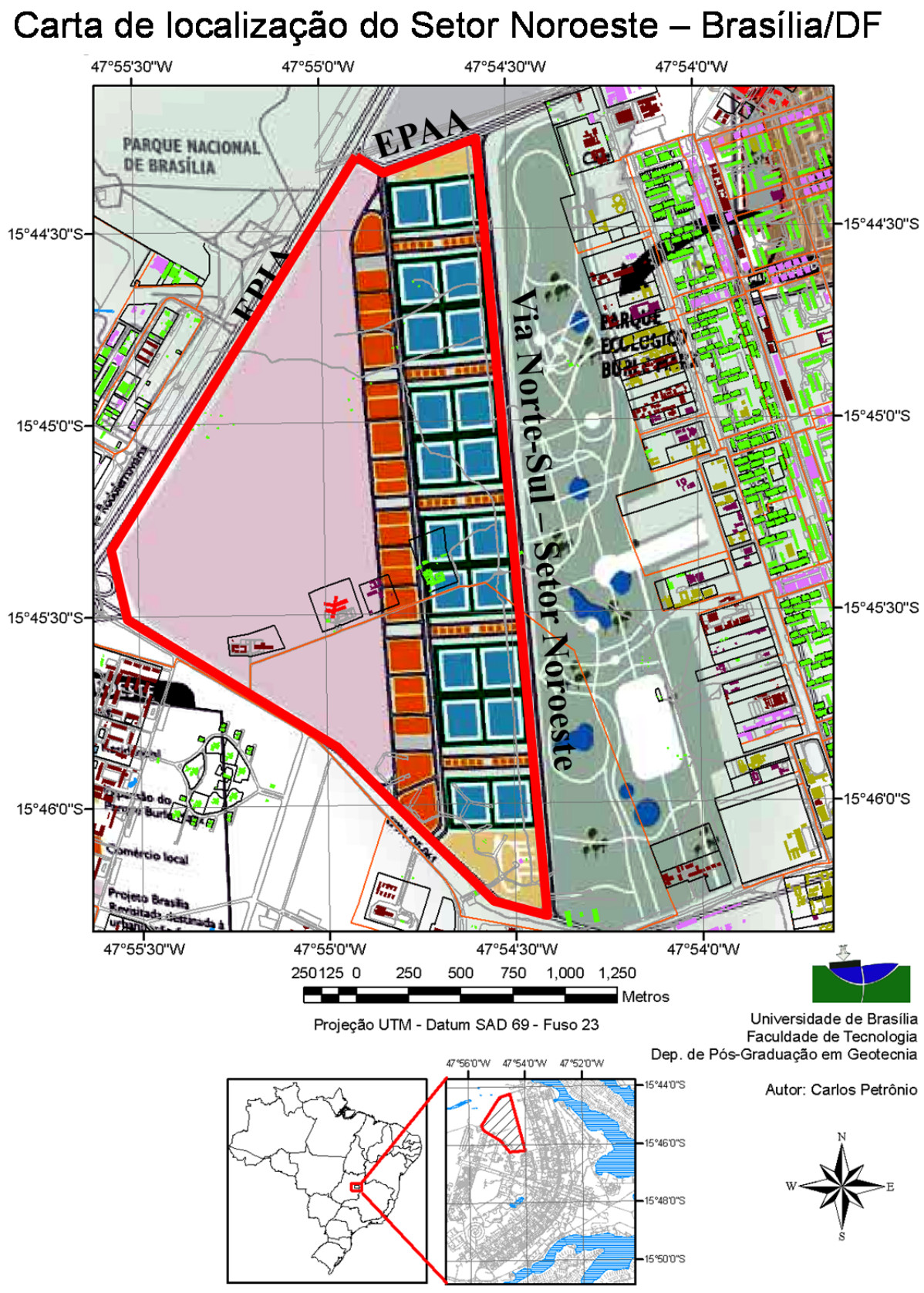


Figura 3.4 – Carta de Localização do Setor Noroeste – Brasília/DF.

3.3- PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

O foco principal da pesquisa é a modelagem de dados geotécnicos em três dimensões, entretanto para que se pudesse atingir um bom produto final foi necessário utilizar ferramentas geotecnológicas que auxiliassem nesse processo.

O primeiro programa computacional, usado pela pesquisa é o Sistema de Processamento de Informações Geográficas, versão 4.3.3 - Spring 4.3.3 - (Câmara *et al.,* 1996), um programa cedido gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe, 2002). O Spring 4.3.3 é um programa computacional, com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais. Com o Spring 4.3.3 foi possível montar, para todos os estudos, o mosaico da base cartográfica, elaborar o modelo numérico de terreno (MNT) da área de estudo com uso das curvas de nível com equidistância de 1m, além de permitir a visualização dos locais de ensaio geotécnicos/geofísicos da pesquisa (localização de furos de sondagem, localização das seções geofísicas, entre outros). O programa está atualmente na versão 5.1.8, contudo optou-se por utilizar a versão 4.3.3, por motivos diversos, dentre eles a opção de não fazer a migração do banco de dados montado no inicio da pesquisa na versão 4.3.3 para a versão 5.1.8; a versão 4.3.3 é mais rápida e mais leve em alguns aspectos; a versão 4.3.3 é mais estável.

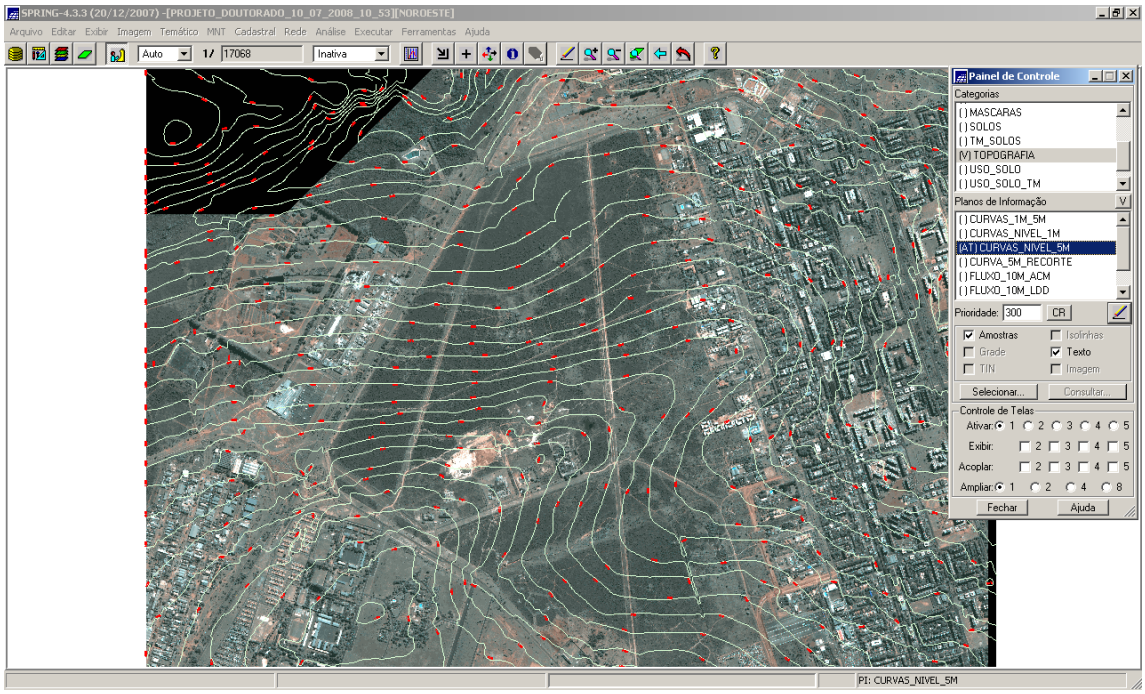


Figura 3.5 – Tela do Programa Computacional Spring 4.3.3.

O segundo programa computacional utilizado foi o *Access* 2003 da *Microsoft*® (Microsoft, 2003). Trata-se de um gerenciador de banco de dados que permite a construção de toda a estrutura do banco de dados digital e a inserção de dados e informações.

Para modelagem tridimensional, e eventualmente modelagem bidimensional, dos dados obtidos em campo, utilizou-se o programa computacional *RockWorks* 15, da empresa *RockWare.* Trata-se de um programa computacional moderno para modelagens bidimensionais e tridimensionais de dados de solo e rocha (*Rockware*, 2010). Com esta ferramenta geotecnologica foi possível realizar a modelagem dos dados litológicos, estratigráficos e do nível do lençol freático. Dados numéricos, como o número de golpes Nspt e os dados advindos do processamento dos levantamentos sísmicos e eletrorresistividade foram espacializados com essa ferramenta (Figura 3.6).

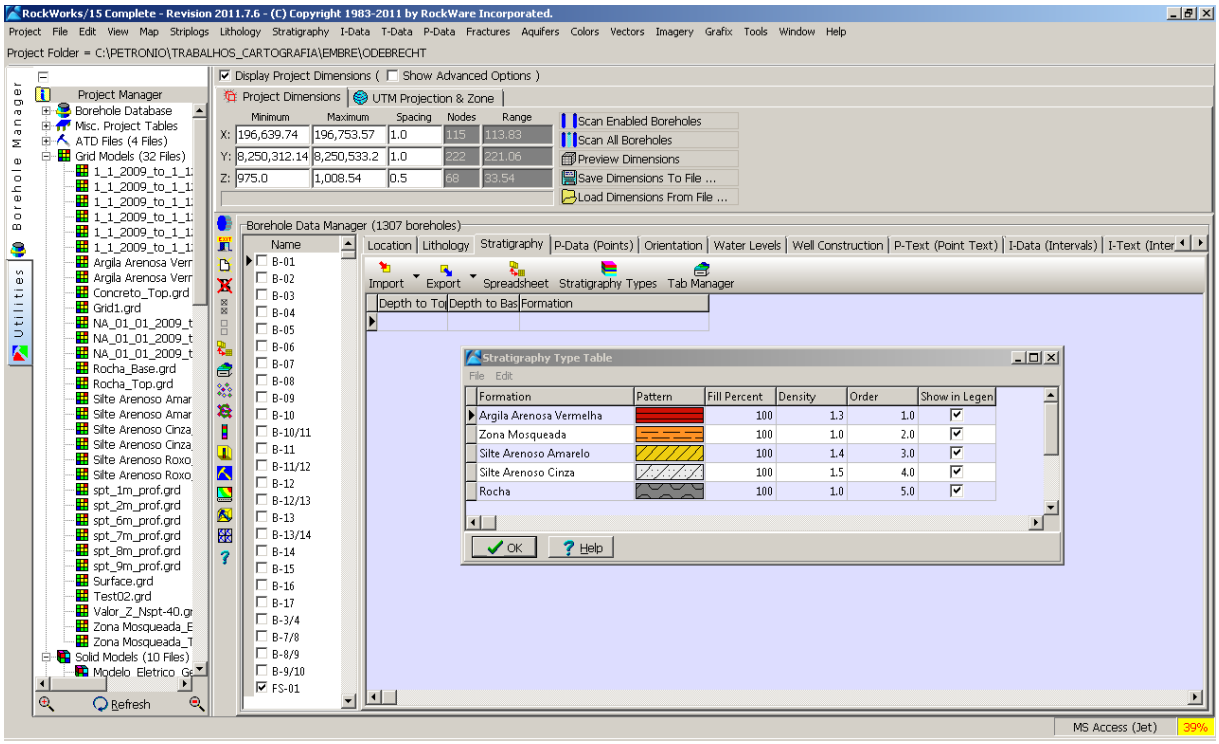


Figura 3.6 – Tela do Programa Computacional *RockWorks 15* adquirido pelo Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB.

Além desse, a pesquisa contou com o pacote de aquisição, tratamento e processamento de dados sísmicos *SeisImager* (Figura 3.7), com o conjunto *Geoplot* (*Visualize Data*), *Pickwin* (*Pick First Breaks or Dispersion Curves*), *Plotrefa* (*Refraction Analysis*), *Registry, Surface Wave Analysis Wizard, WaveEq (Surface Wave Analysis), SeisModule Control*.

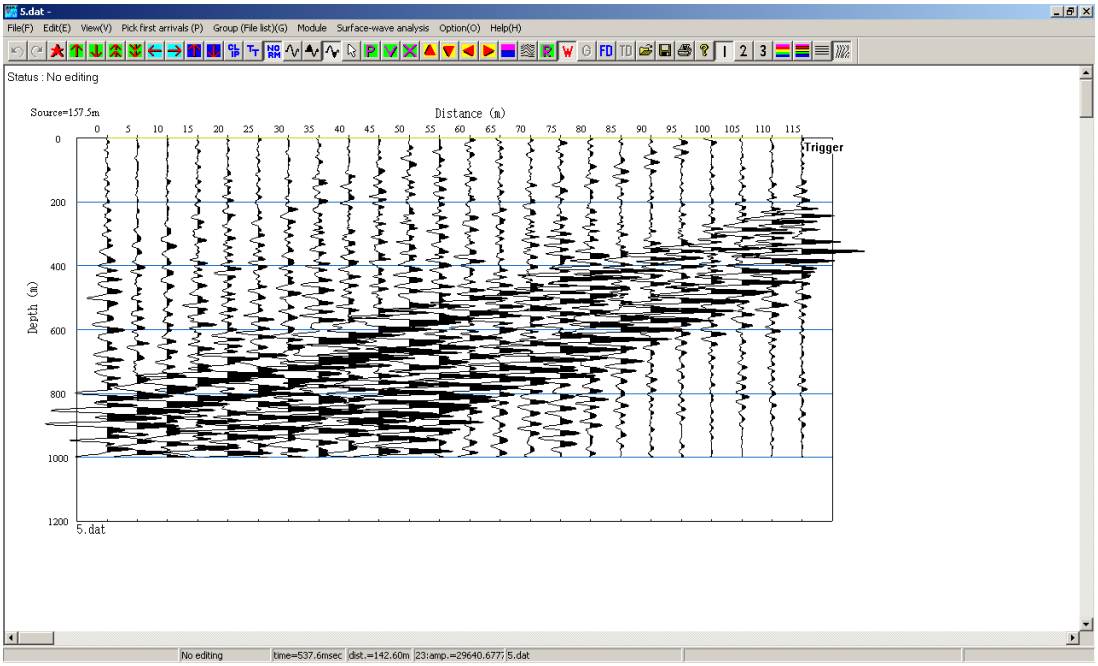


Figura 3.7 – Tela do programa *Pickwin* do pacote *SeisImager*, utilizado para o tratamento de dados sísmicos.

A pesquisa também contou com o programa computacional *LogPlot* 7 (Figura 3.8), um programa para apresentação de vários tipos de trabalhos de campo, como, por exemplo, sondagens à percurssão SPT, dados de litologia, estratigrafia e até mesmo dados de trabalhos geofísicos. Além disso, o banco de dados produzido pelo *LogPlot 7* comunica-se diretamente com o *RockWorks 15*, gerando uma enorme facilidade e flexibilidade no processamento e pós-processamento dos dados.

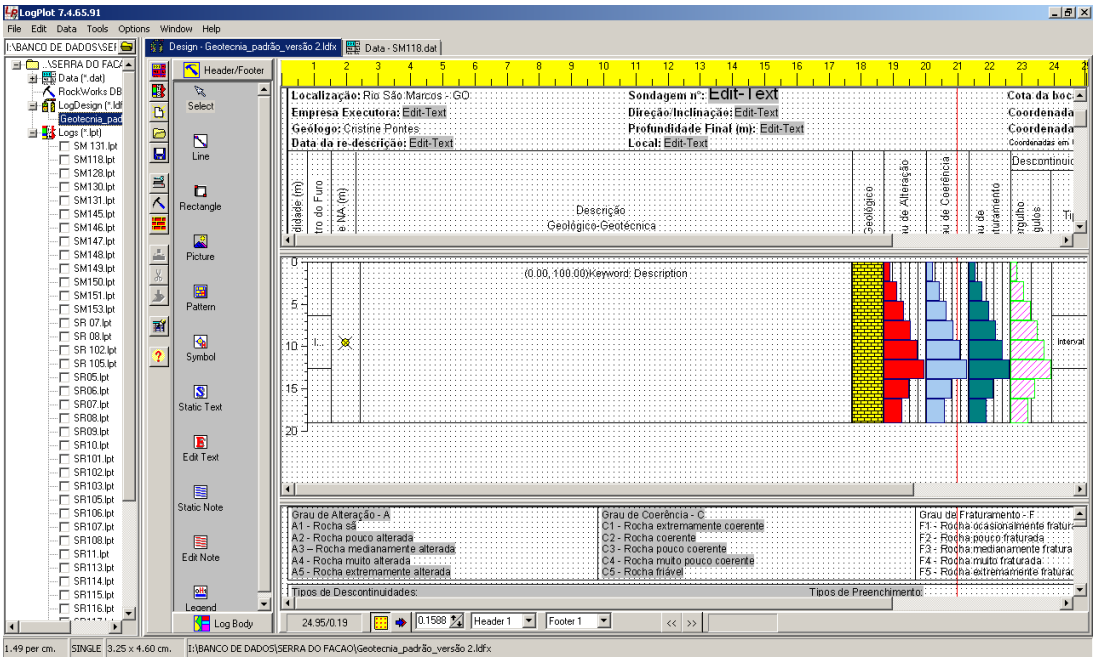


Figura 3.8 – Tela do Programa Computacional *LogPlot 7* adquirido pelo Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB.

A pequisa também contou com o programa computacional *ArcGIS 9.3* com sua principais extensões, *Spatial Analyst, 3D Analyst e Geoestatiscal Analyst*. Este programa é uma poderosa ferramenta geotecnologica, extremamente utilizada por diversos profissionais interessados em mapeamento e análises de dados georreferenciados.

Para o tratamento dos dados do GPS Topográfico Ashtech, a pesquisa contou com o pacote completo *Ashtech Solutions*, utilizado para a aquisição dos dados gravados pelo GPS, processamento e pós-processamento dos dados colhidos em campo.

Para o tratamento dos dados da Estação Leica TC307, a pesquisa contou com o pacote de programas do próprio equipamento os quais permitem fazer o processo de aquisição e processamento dos dados da estação.

A pesquisa contou também com o programa computacional *Google Earth* (Figura 3.9), da mundialmente conhecida empresa *Google*. O *Google Earth* permite, entre outras coisas, sobrevoar qualquer parte da Terra para visualizar imagens de satélite, mapas, relevo, edifícios 3D, galáxias no espaço e vales submarinos. Além disso, pode-se explorar conteúdo geográfico complexo, guardar os locais visitados e partilhá-los com outros utilizadores.

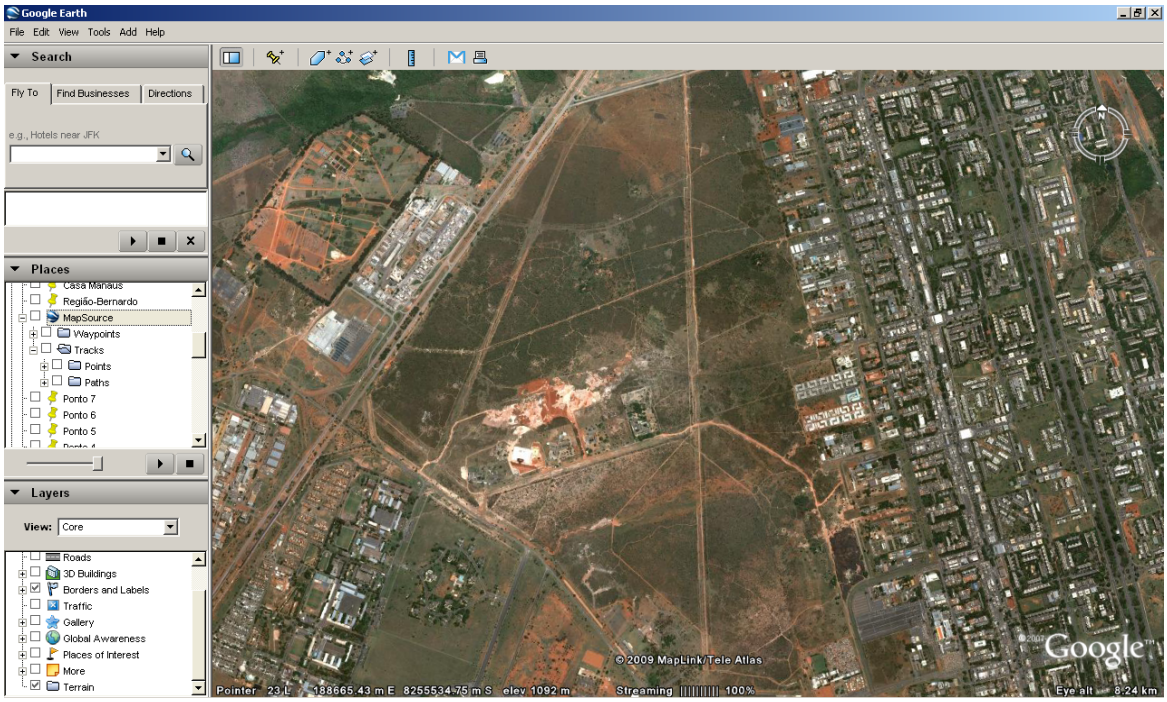


Figura 3.9 – Tela do Programa Computacional *Google Earth*.

A pesquisa contou com o pacote de programas da empresa IRIS *Instruments* para aquisição, tratamento e pós-processamento dos dados obtidos com o equipamento Syscal responsável

pelo levantamento geofísico de resistividade elétrica. Os programas utilizados foram o Electre II (Figura 3.10) e Prosys II (Figura 3.11). O programa Electre II é responsável pelo planejamento das linhas de eletrorresistividade (tipo de arranjo, quantidade de eletrodos, método de aquisição, entre outras opções) e o programa Prosys II é o responsável pelo tratamento dos dados obtidos em campo (filtragem, eliminação de valores errados, inserção da topografia do terreno, exportação dos dados para outros programas, entre outros).

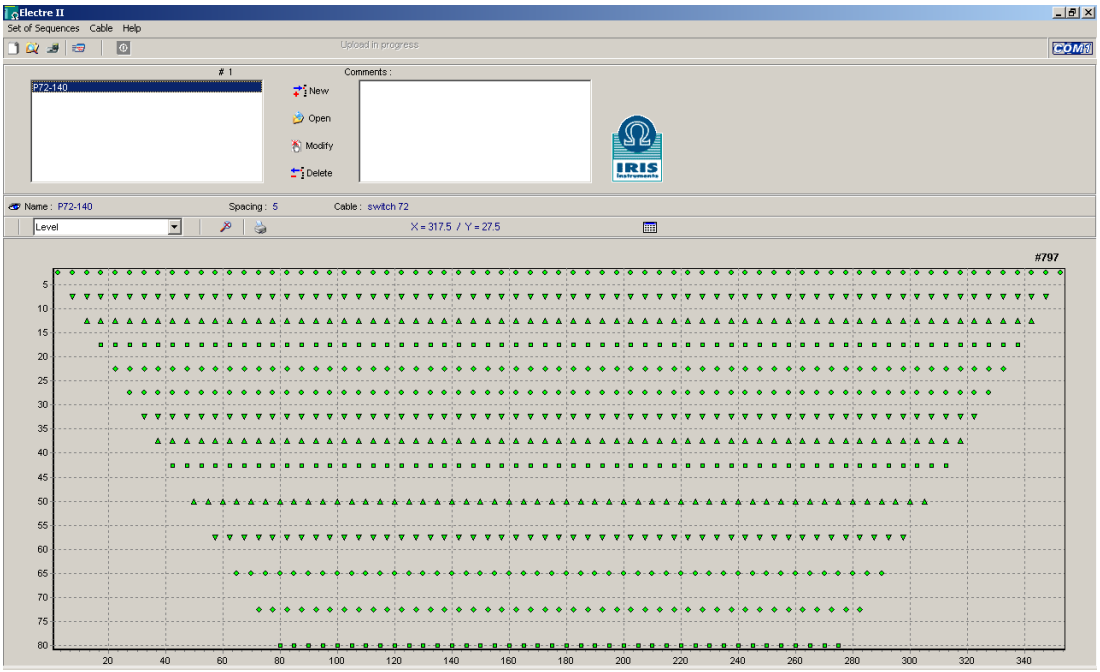


Figura 3.10 – Tela do Programa Computacional *Electre II.*

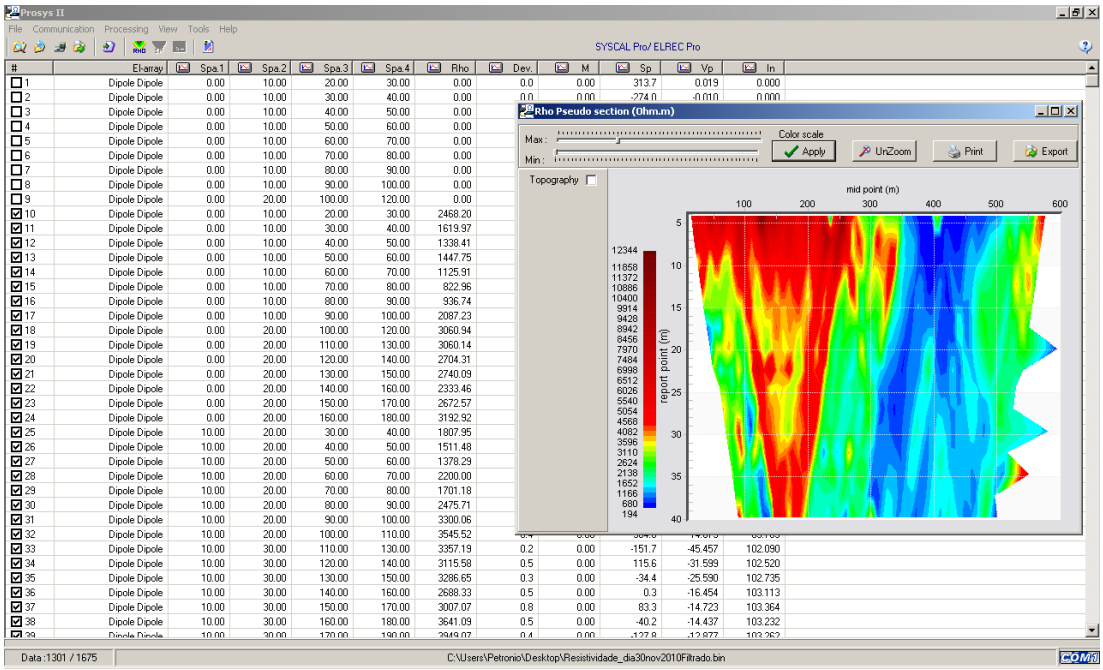


Figura 3.11 – Tela do Programa Computacional *Prosys II.*

Outro programa computacional utilizado é o RES2DINV, responsável por realizar o processo de inversão dos dados de resistividade obtidos nos levantamentos geofísicos. O programa é capaz de processar todas as pseudo-seções e realizar a seção de resistividade elétrica utilizada para a interpretação dos dados geofísicos. A Figura 3.12 mostra a tela do programa.

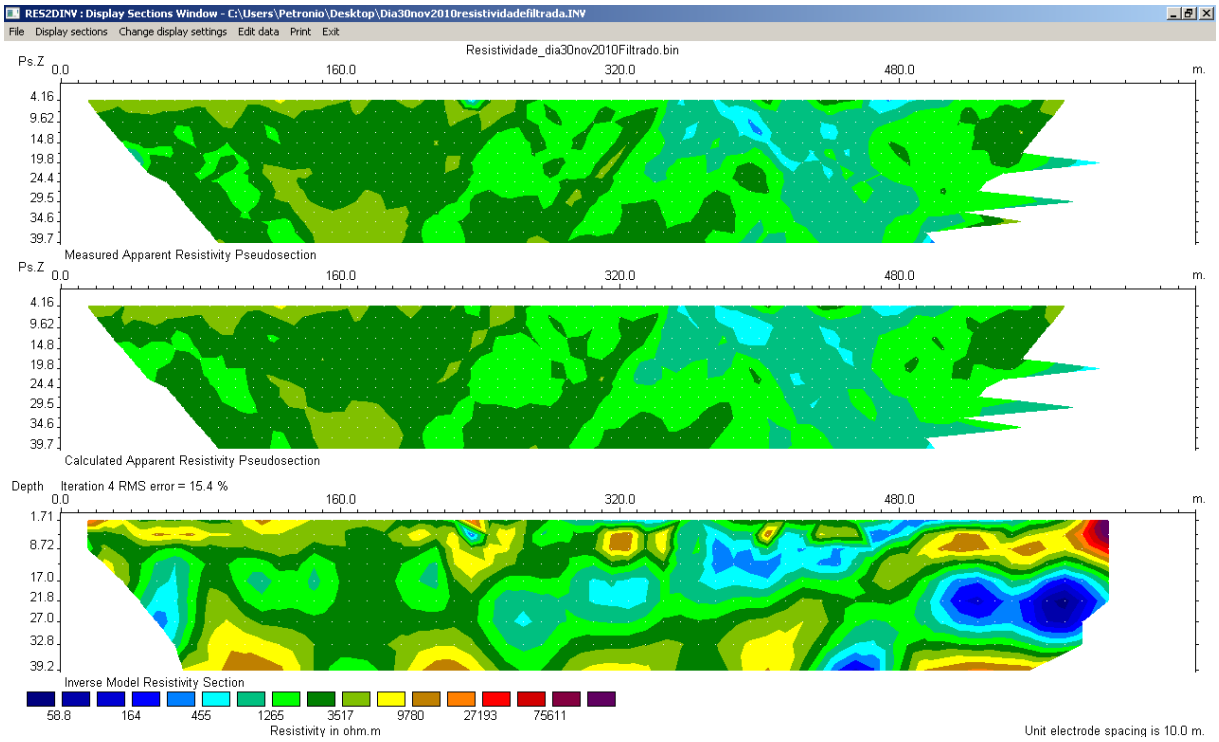


Figura 3.12 – Tela do Programa Computacional *RES2DINV*.

3.4- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.4.1- GPS TOPOGRÁFICO

Um conjunto de GPS topográfico da Ashtech® ProMark2TM da *Thales Navigation* foi utilizado para o georreferenciamento das estacas das linhas sísmicas e dos geofones do equipamento sísmico em cada linha sísmica montada em campo. Trata-se de um conjunto GPS de precisão que conta com 10 canais independentes de portadora L1 e C/A, com 8 Mb de memória, fazem coleta de dados em modo estático (*stop and go*) e modo cinemático. Tem uma excelente precisão, após pós-processamento, com 5 mm+1 ppm na horizontal e 10 mm+2 ppm na vertical (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Conjunto de GPS topográfico Ashtech, utilizado em campo.

Nos levantamentos de campo foi utilizado o sistema *stop and go* disponível no GPS, sendo necessários para isso o conjunto apresentado na Figura 3.13 mais o conjunto de tripés que acompanham o equipamento. Por se tratar de um GPS diferencial, o equipamento deve permanecer por um tempo adequado a uma boa aquisição de dados, de forma a corrigir os pontos coletados no final de cada trabalho de campo. Após esta aquisição inicial o conjunto Antena+GPS - s*top and go* está apto para coletar dados. A Figura 3.14 mostra o equipamento em estado de aquisição inicial de dados. O tempo de parada em cada ponto (geofone ou eletrodo) com o sistema *stop and go* foi de 30 s, tempo suficiente para um bom levantamento.



Figura 3.14 – GPS Topográfico, do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, em funcionamento no Setor Noroeste de Brasília.

3.4.2- ESTAÇÃO TOTAL LEICA TC307

A Estação Total ou Taqueômetro é um instrumento eletrônico de precisão utilizado na medida de ângulos e distâncias, comum aos topógrafos. Um instrumento indispensável nos trabalhos de campo, pois além da capacidade de armazenar os dados colhidos em cada ponto de geofone ou eletrodo, a estação total é capaz de alinhá-los com excelente precisão. A estação total utilizada nos trabalhos de campo foi a Estação Total Leica TC307, do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, montada em tripé de alumínio da própria fabricante (Figura 3.15).



Figura 3.15 – Estação Total Leica TC307, do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, utilizada nos trabalhos de campo.

3.4.3- EQUIPAMENTO DE SÍSMICA DE REFRAÇÃO

O equipamento utilizado na aquisição de dados sísmicos foi o Geode ES-3000 da fabricante Geometrics. Trata-se de um equipamento moderno de uma nova geração de sistemas de gravação de dados sísmicos, capaz de realizar ensaios de refração ou reflexão, perfilagem de poços ou VSP - e até para pesquisas tomográficas. O equipamento é composto de 2 módulos contendo cada um 24 canais, somando 48 canais ao todo. Nessa pesquisa foi utilizado apenas um módulo de 24 canais.

O conjunto inteiro é composto por uma maleta gravadora de dados, *notebook* com uma bateria de alta durabilidade mais uma bateria reserva de mesma capacidade, quatro cabos de ligação dos geofones perfazendo um total de 240 m de cabos interconectados, bateria estacionária de 24 volts, 48 geofones (ver Figura 3.16 para detalhe do geofone), *trigger* disparador, placa metálica de 40x40 cm de 32 kg de peso, marreta de 10 kg de peso utilizada como fonte geradora de sinal, cabo de ligação entre a maleta gravadora de dados e o *notebook*, caixa de comunicação entre o *notebook* e a maleta gravadora de dados, 2 conjuntos de caixa + rádio amador para os tiros *offset* e tiro central em cada linha, cabo de ligação entre a bateria e a maleta gravadora de dados (ver Figura 3.17, Figura 3.18 e Figura 3.19).

Além do equipamento, um programa computacional fornecido pela fabricante foi necessário para o processo de aquisição de dados sísmicos (Figura 3.20). Com esse programa pode-se, entre outras opções, definir a sensibilidade do *trigger* disparador, definir o valor do ruído natural, definir o máximo e o mínimo de sinal que deve ser capturado pelo equipamento, visualizar o equipamento em funcionamento, definir onde será feito o tiro para geração do sinal sísmico, definir qual é o tipo de fonte geradora de sinal sísmico (marreta, rifle, explosivo, entre outras), definir a quantidade de golpes que será dada pela marreta, observar a qualidade de cada sinal sísmico obtido, estocar os sinais (estaqueamento), salvar os sinais sísmicos obtidos para pós-processamento, entre várias outras funções.



Figura 3.16 – Detalhe da ligação do geofone ao cabo de dados.



Figura 3.17 – Detalhe do equipamento de sísmica de refração.



Figura 3.18 – Detalhe de uma linha sísmica montada em campo.



Figura 3.19 – Conjunto marreta+*trigger*, caixa decodificadora de disparo+rádio amador e placa metálica.

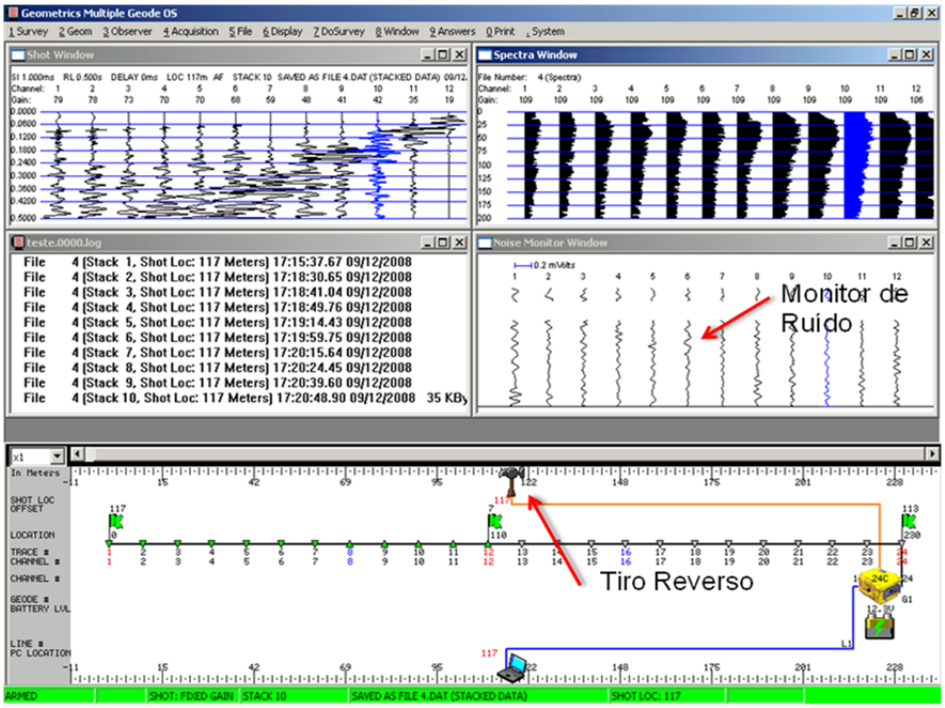


Figura 3.20 – Detalhe do programa computacional utilizado pelo equipamento no processo de aquisição de dados.

3.4.4- EQUIPAMENTO PARA LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

Foi utilizado nos levantamentos de perfilagem elétrica o eletrorresistivímetro SYSCAL Pro da empresa IRIS *Instruments*. O equipamento é um comutador automático capaz de controlar até 72 eletrodos (estacas de aço inox) simultaneamente, realizando as medidas de resistividade elétrica de forma automática de acordo como planejado pelo programa computacional ELECTRE II.

Além da caixa aquisitora de dados, o equipamento conta com cabos para ligação dos eletrodos e caixas de ligação entre os cabos, além de uma bateria externa de 12 V para alimentação da caixa aquisitora de dados (Figura 3.21).

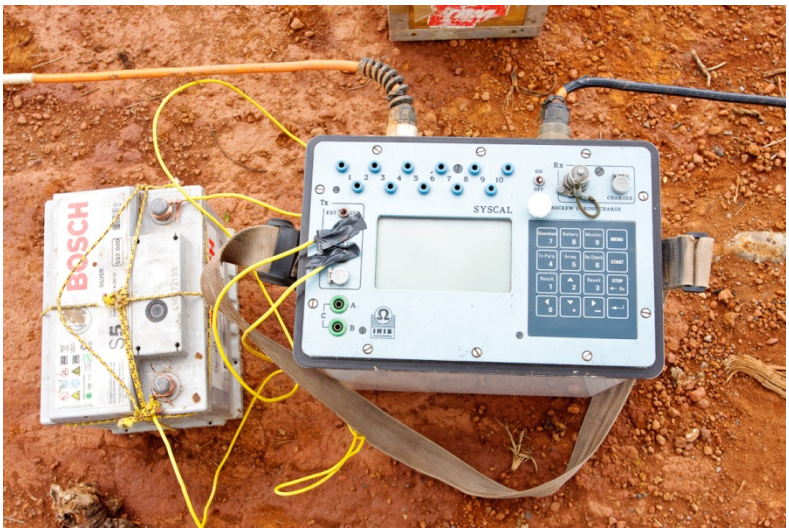


Figura 3.21 – Detalhe do equipamento Syscal Pro de 72 canais.

3.5- INVENTÁRIO CARTOGRÁFICO DO SETOR NOROESTE

O processo de obtenção dos dados cartográficos necessários do setor noroeste de Brasília começou com a aquisição da base cartográfica do Plano Diretor de Organização Territorial (PDOT) de Brasília de 1998 junto à Codeplan (Codeplan, 1998). A base cartográfica na escala 1:2000 apresenta os seguintes dados vetoriais: vias, lagos e rios, edifícios comerciais, edifícios residenciais, edifícios públicos, igrejas e templos, escolas, hospitais, quadras, lotes, conjuntos, pontos cotados e curvas de nível com equidistância de 1m, e que cobrem toda área de estudo. A Figura 3.22 mostra a base cartográfica montada no programa computacional Spring 4.3.3.

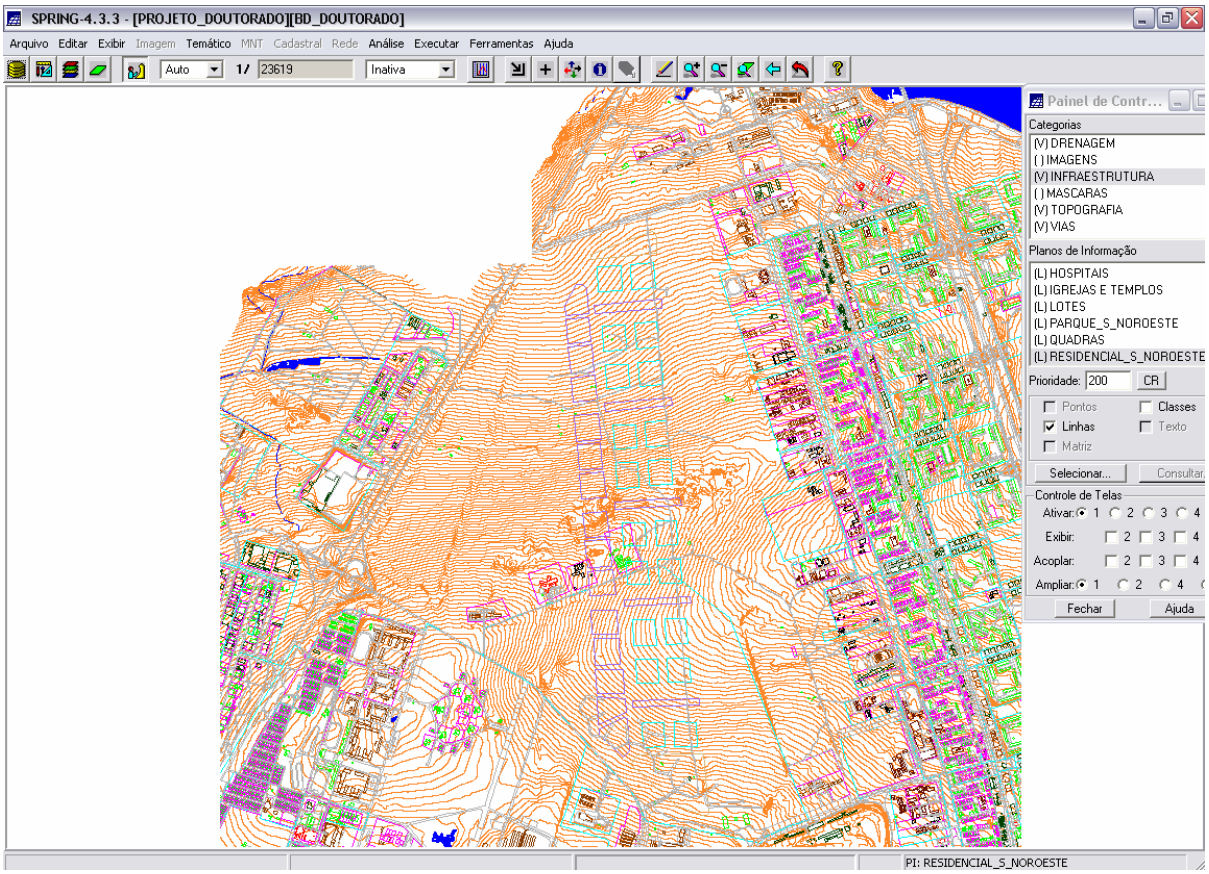


Figura 3.22 – Base cartográfica do setor noroeste de Brasília na escala 1:2000, exibida no Spring 4.3.3 (Codeplan, 1998)

Após a obtenção da base, fez-se o procedimento de mosaico das mesmas com uso do Spring 4.3.3, o processo de mosaico é necessário em virtude da base ser separada em diversas folhas cartográficas devidamente numeradas. Após o mosaico da base, fez-se o MNT (Modelo Numérico de Terreno) da área de estudo a partir das curvas de nível espaçadas de 1 m, e além desse, produtos derivados do MNT tais como a grade de declividade, grade de exposição e a

grade de rede de drenagem. Além dessa base, também foram obtidos as cartas do Eia/Rima da região de estudo.

A pesquisa também adquiriu fotos aéreas de 1958 (Figura 3.23) e imagem do satélite *QuickBird* de 2004, com intuito de gerar uma carta de uso do solo, seguidos de um estudo minucioso das cartas de solos e geotécnico do Eia/Rima. A integração desses resultados, a partir das imagens e das cartas, conduziu a pesquisa no posicionamento dos levantamentos geofísicos na área de estudo.

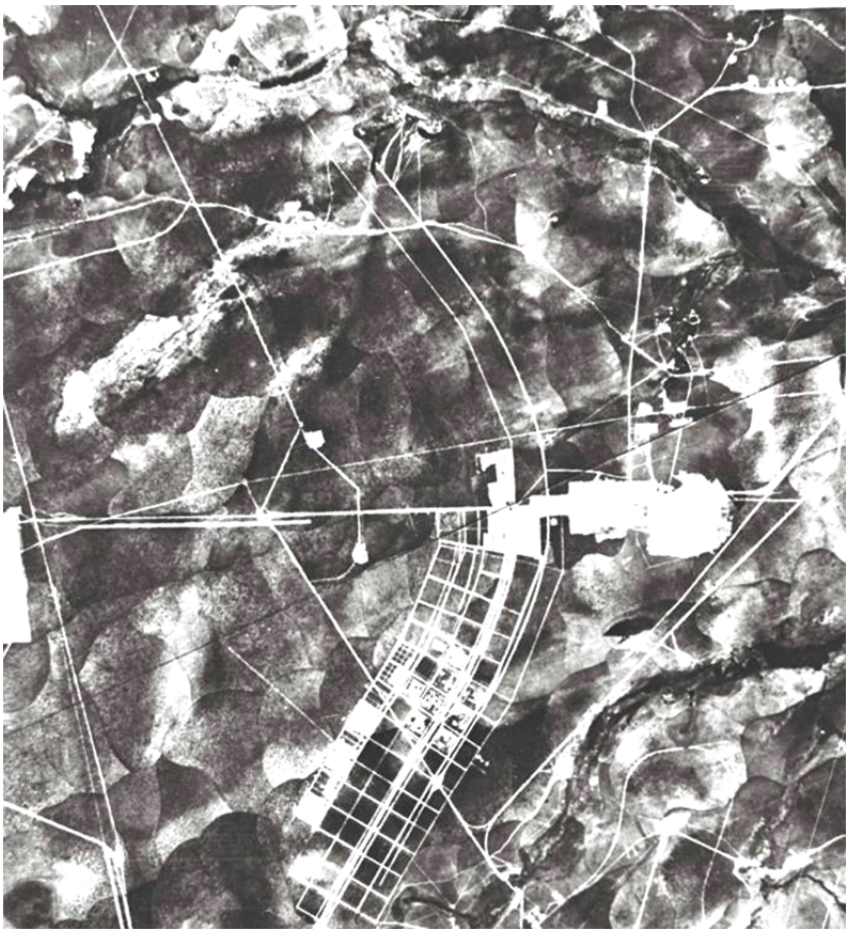


Figura 3.23 – Foto aérea de Brasília do ano de 1958.

A imagem de 2004 do satélite *Quickbird* foi de fundamental importância durante o levantamento dos dados sísmicos no setor noroeste, pois com ela foi realizado todo o planejamento das linhas sísmicas. A Figura 3.24 mostra a imagem adquirida pela pesquisa.

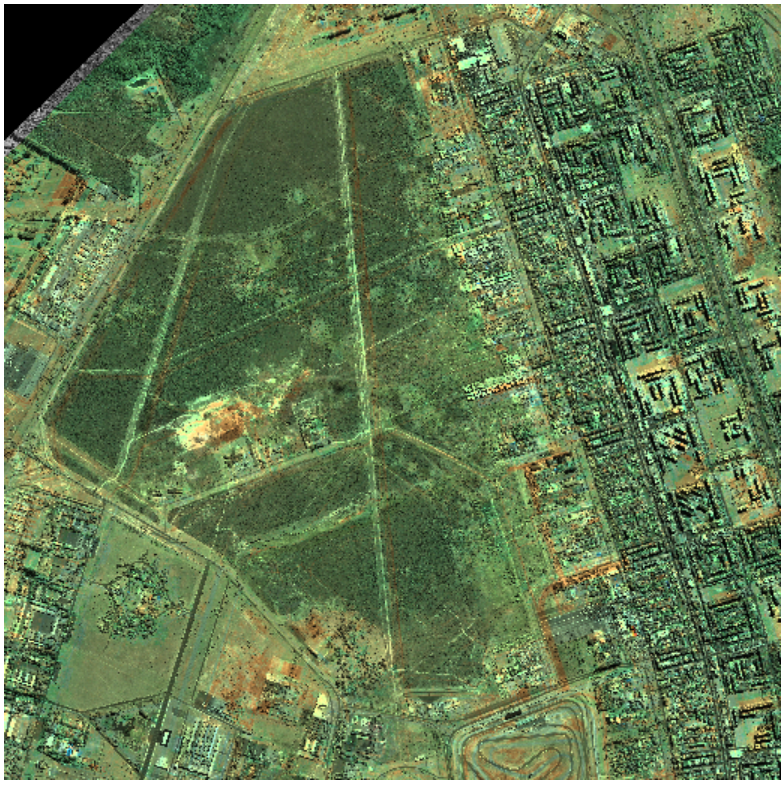


Figura 3.24 – Imagem do ano de 2004 do setor noroeste de Brasília – satélite *Quickbird*.

A Figura 3.25 mostra a carta de solos do Eia/Rima para o local, além desse há a carta de uso do solo, geomorfológico, hidrológico, carta de vegetação, declividade e carta de áreas de proteção permanente e/ou restrição de uso. Todas essas cartas foram produzidas pelo estudo.

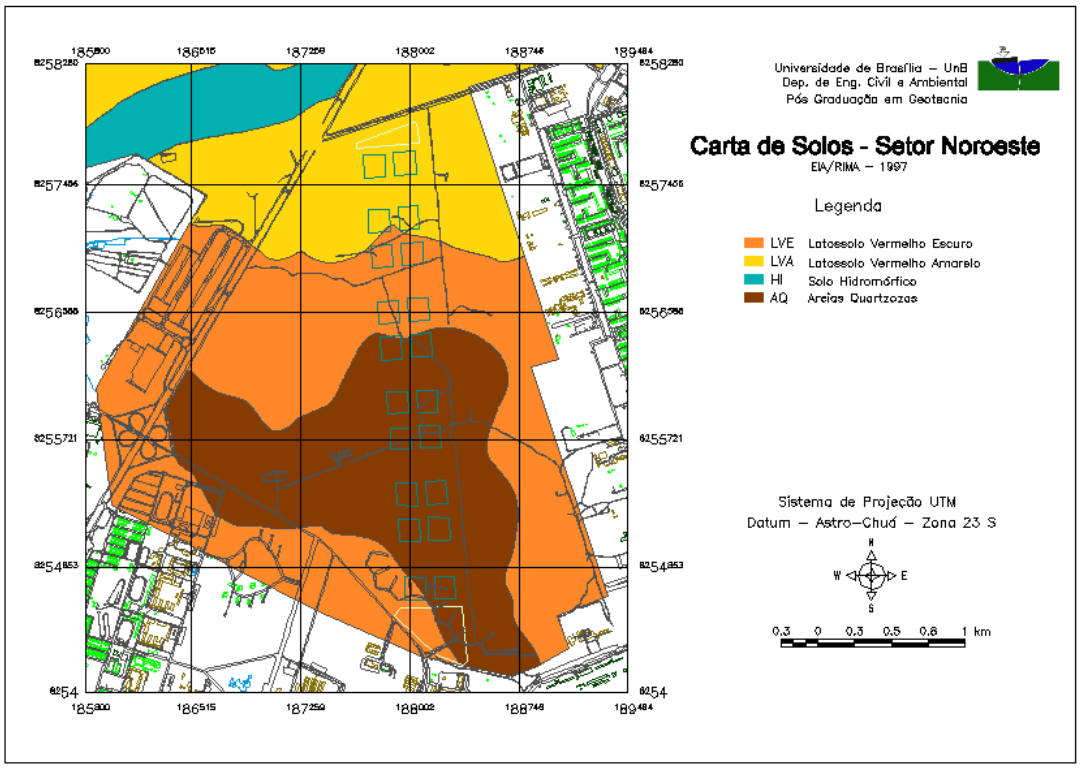


Figura 3.25 – Carta de Solos (Eia/Rima, 1997).

Além das imagens já citadas, a pesquisa contou com as imagens oferecidas pelo programa computacional *Google Earth*. Durante a pesquisa a empresa *Google* disponibilizou imagens mais recentes do setor noroeste mostrando o avanço das obras de engenharia no local, conforme mostra a Figura 3.26. Com esta imagem a pesquisa fez o planejamento dos levantamentos geofísicos com eletrorresistividade e o georreferenciamento dos furos de sondagem SPT realizados no local.

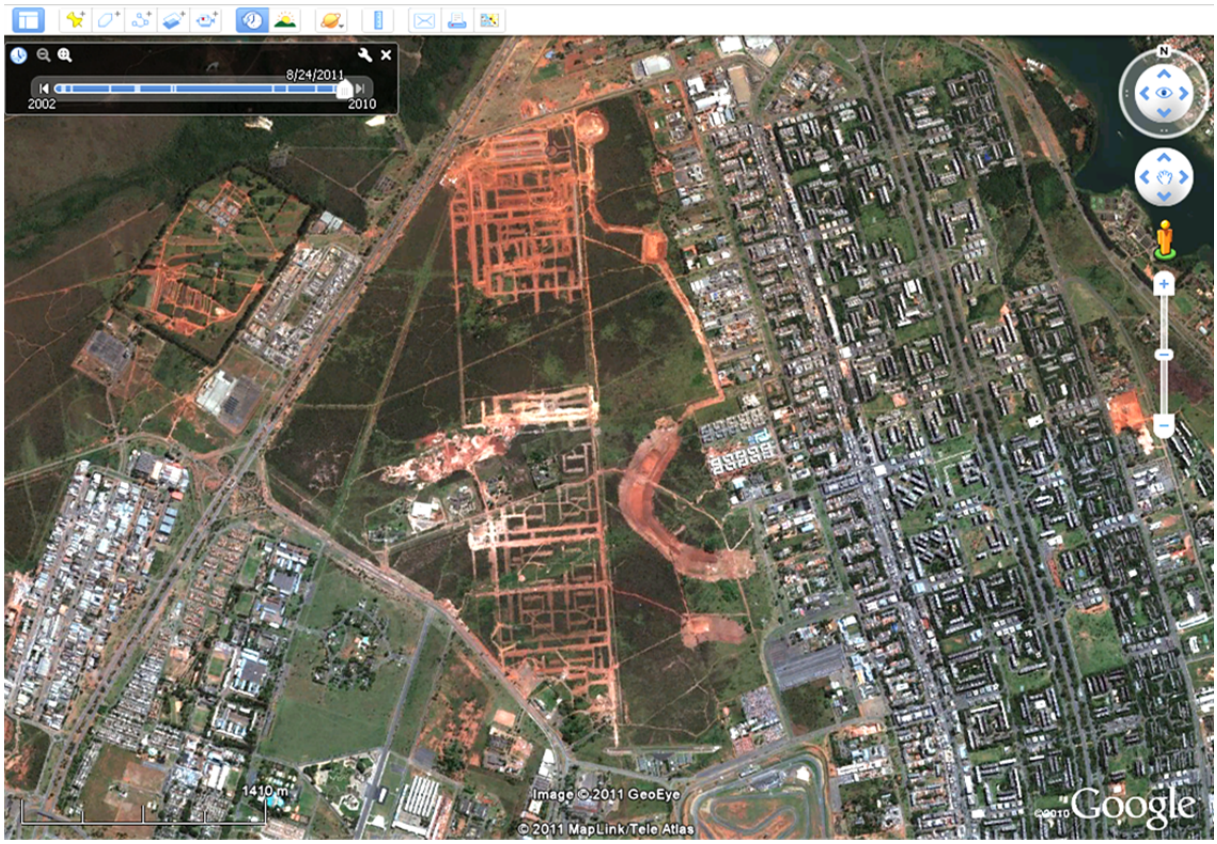


Figura 3.26 – Imagem do setor noroeste de Brasília, ano de 2010, disponibilizada pelo *Google Earth*.

3.5.1- ORGANIZAÇÃO DOS DADOS EM BANCO DE DADOS DIGITAL E USO DO SISTEMA GEOGRÁFICO DE INFORMAÇÕES

Reunir os dados na etapa de inventário não é suficiente para uma pesquisa, eles devem ser organizados de tal forma que se possa extrair a informação desejada com maior velocidade e qualidade.

A construção da base com informações de dados geográficos foi um processo bastante demorado e trabalhoso, e onde se gastou uma boa parte dos recursos e tempo. Uma boa base de dados geográficos, melhor definida como banco de dados digital, deve cumprir, segundo Câmara & Queiroz (2006), com alguns pré-requisitos básicos:

- Metodologia consistente - definição única dos atributos, padrões de interpretação dos dados e dos procedimentos a serem executados;

- Identidade de objetos - definição da articulação das cartas (recortes arbitrários do espaço) que deverão compor a área de trabalho e identidade única dos objetos;

- Suporte a múltiplas escalas e projeções - os objetos além de serem únicos no banco de dados, podem ter várias representações, por exemplo, um rio pode ser representado por uma linha em uma escala e por um polígono em outra.

Contudo, por melhor que seja a metodologia para montagem do banco de dados, existe outro ponto fundamental que é a estrutura organizacional dos dados no banco de dados digital. Este quesito é o ponto chave para modelagem de dados, a estrutura organizacional de um banco de dados digital em ambiente bidimensional, ou seja, voltado para modelagem de dados em 2D, é completamente diferente da estrutura organizacional dos dados para um ambiente de modelagem tridimensional, levando-se em consideração que deve haver a identidade única dos objetos dentro do banco de dados independente de sua estrutura.

Esta pesquisa investiu fortemente na estruturação de um banco de dados digital para modelagem tridimensional de dados geotécnicos/geofísicos, porém que atendesse a modelagem de dados bidimensionais, conforme a necessidade dos modelos. Obviamente que a estrutura do banco de dados depende também do programa computacional que será o responsável pela modelagem dos dados.

Como a carga de dados manipulada pelo banco de dados da pesquisa é considerada grande, foi necessário utilizar um sistema para gerenciar os dados, organizá-los, espacializá-los e extrair a informação necessária. Por esse motivo utilizou-se o sistema de informação geográfica (SIG). O SIG, que muitos autores confundem com geotecnologia, é um sistema que pode ser divido basicamente em duas partes: uma tecnológica, e aqui entra efetivamente a geotecnologia (GPS, ferramentas de geoprocessamento, sensoriamento remoto, entre outros) e outra organizacional, onde o sistema compartilha sua capacidade de organização com o homem e interage com o mesmo.

3.6- PLANEJAMENTO DOS TRABALHOS DE CAMPO

3.6.1- PLANEJAMENTO PARA LEVANTAMENTO DE DADOS SÍSMICOS

O levantamento de dados sísmicos requer um bom planejamento de campo. Uma das etapas fundamentais consiste na análise do terreno a fim de se disporem os equipamentos da melhor forma possível para que não comprometam os resultados de cada investigação. Diante dessa premissa, foi planejada e executada uma grande linha sísmica (Figura 3.27) no Setor Noroeste, aproveitando caminhos que dispensaram a abertura de picadas e limpeza do local, condição ideal para um trabalho de campo como esse.

Foram realizadas linhas sísmicas apenas no Setor Noroeste, ficando de fora os outros estudos de caso, em virtude dos estudos de caso serem obras particulares que fizeram (optaram) apenas levantamento de dados geofísicos com eletrorresistividade.

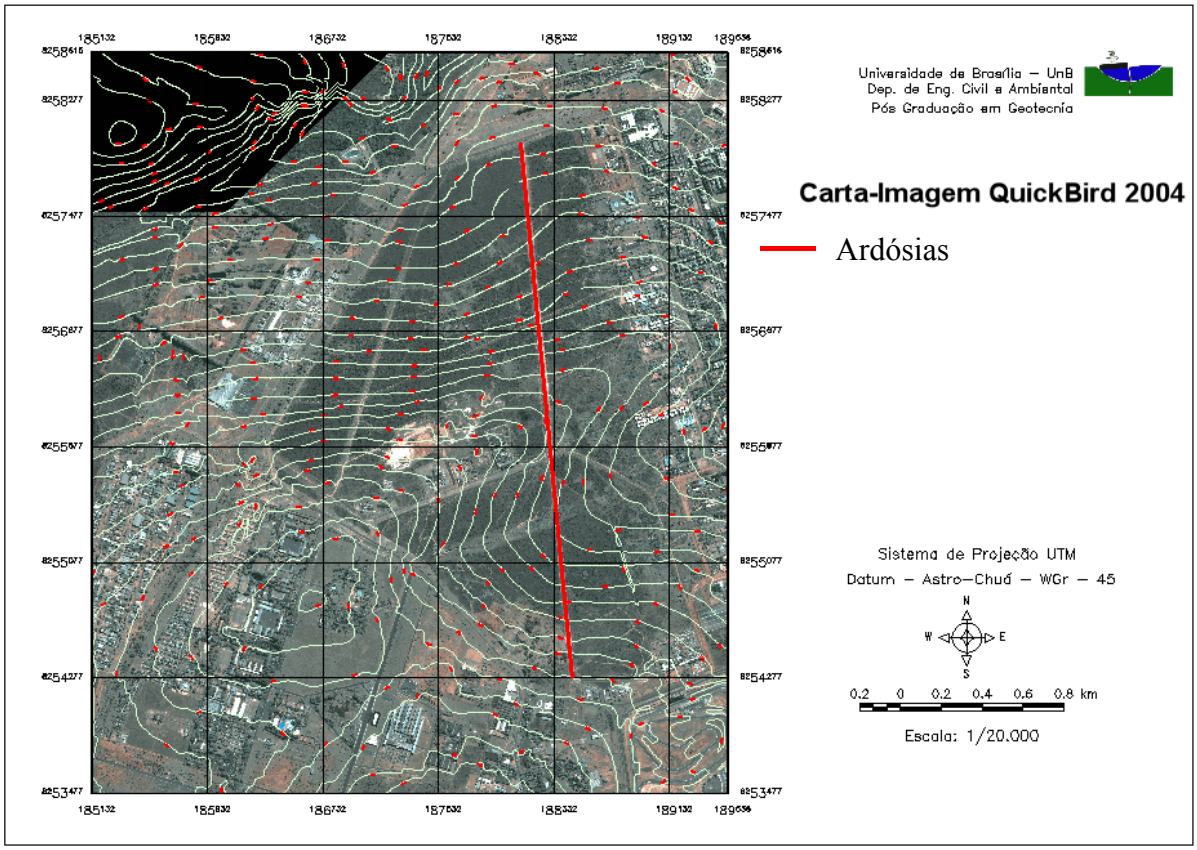


Figura 3.27 – Marcação de linha georreferenciada para levantamento de campo com sísmica de refração.

Essa grande linha sísmica (Figura 3.27) totaliza, aproximadamente, 3,5 km de extensão, é o resultado do somatório de 23 linhas sísmicas de 200 m de extensão cada uma. O esquema

montado para sua execução é apresentado na Figura 3.28. O processo para confecção de uma linha sísmica seguiu a seguinte metodologia:

- Escolha do local para o levantamento dos dados de sísmica;
- Locação e alinhamento das linhas sísmicas com o auxílio da estação total;
- Marcação e colocação das estacas que compõem a linha sísmica;
- Locação dos geofones de cada linha sísmica;
- Georreferenciamento de cada um dos 24 geofones e dos locais de tiros com o GPS topográfico (Figura 3.29);
- Ligação do sismógrafo como um todo e execução dos tiros com a fonte sísmica.

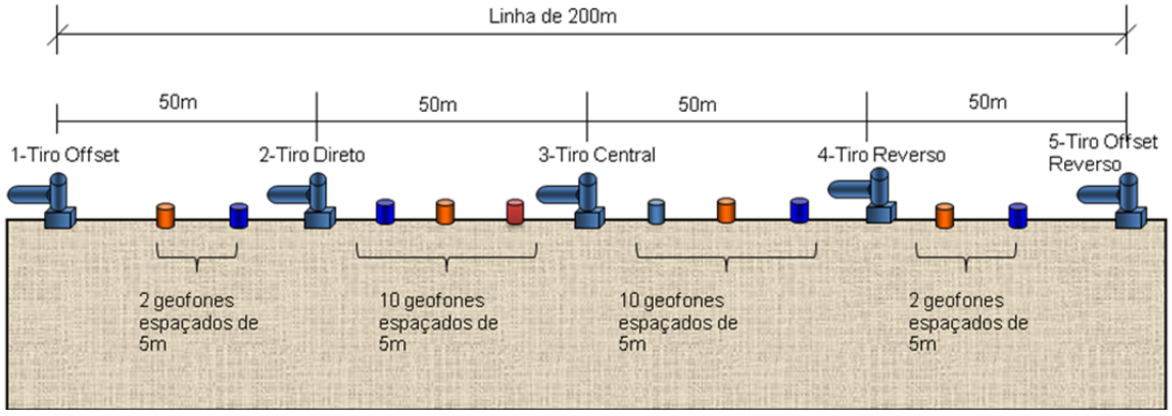


Figura 3.28 – Esquema de montagem da linha de sísmica de refração.



Figura 3.29 – Georreferenciamento dos geofones com auxílio do GPS topográfico.

Uma linha sísmica completa é composta por, pelo menos, 2 tiros *offset*, 1 tiro direto, 1 tiro no centro da linha e 1 tiro reverso. O processo de aquisição de dados em cada um desses pontos, utilizando a marreta de 10 kg como fonte geradora de sinal sísmico (tiro), é conhecido como estaqueamento. Foram feitos 30 estaqueamentos (marretadas na placa metálica) em cada um dos tiros citados em cada uma das 23 linhas, totalizando 150 estaqueamentos por linha sísmica (Figura 3.30).



Figura 3.30 – Estaqueamento com tiro de marreta de 10 kg.

Assim que uma linha terminava o equipamento era transferido para a próxima linha cujo 5 (quinto) - Tiro *Offset* Reverso da linha anterior (ver Figura 3.28) tornava-se o 2 (segundo) - Tiro Direto (ver Figura 3.28) da próxima linha, deixando um espaço de 50m entre os geofones de uma linha para os geofones da linha consecutiva. Apesar de haver este espaçamento entre o fim de uma linha de geofones e o inicio de outra linha de geofones, foi feito um planejamento de sobreposição de dados entre eles, por meio da execução dos tiros *offset* de cada linha (Figura 3.31). Foi necessária uma equipe de quatro pessoas para uma boa execução desses ensaios geofísicos.

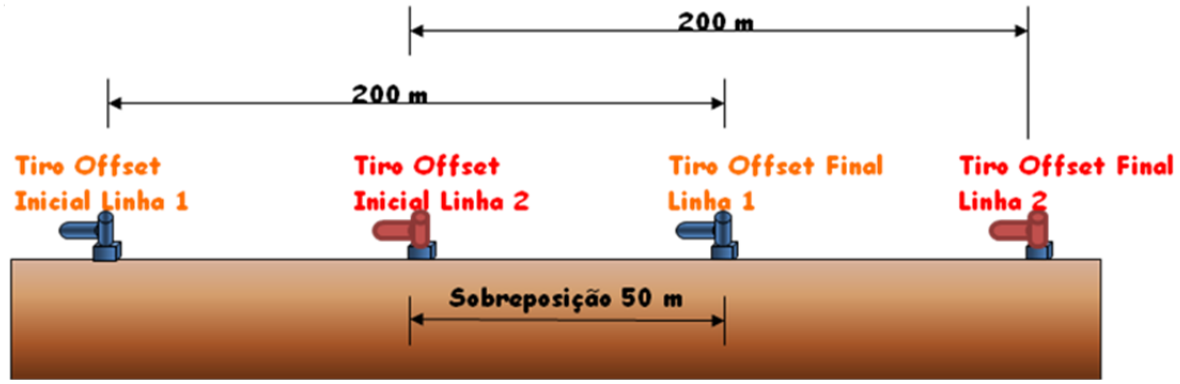


Figura 3.31 – Configuração da sobreposição de dados entre as linhas de sísmica de refração.

Foram realizados, aproximadamente, 8.000 m de linhas sísmicas no Setor Noroeste. Vale lembrar que na época dos levantamentos de campo foi aproveitado o máximo de caminhos que já haviam no local, conforme mostra a imagem (Figura 3.32). Alguns caminhos não puderam ser aproveitados em virtude de problemas sociais na área que impediram a passagem das linhas sísmicas.



Figura 3.32 – Linhas sísmicas realizadas no Setor Noroeste de Brasília.

3.6.2- PLANEJAMENTO PARA LEVANTAMENTO DE DADOS DE ELETRORRESISTIVIDADE

Para o levantamento de dados de eletrorresistividade o planejamento de campo aplicado foi diferente nos estudos de caso e no Setor Noroeste em razão do fator de escala em cada estudo. Vale esclarecer que apenas os estudos de caso 1 e 2 fizeram levantamento de dados de eletrorresistividade, além, é claro, do Setor Noroeste. A diferença básica entre os estudos reside na disposição da malha de amostragem, que nos estudos de caso podem ser perfeitamente controladas, pois com o terreno limpo, apoio topográfico da obra, controle das seções com piquetes, entre outros, pode-se definir uma malha com excelente qualidade para o levantamento de campo. No Setor Noroeste a malha foi disposta de acordo com as possibilidades de acesso ao local, com o cuidado de não instalar o equipamento em local de movimentação de veículos para não prejudicar o levantamento.

O trabalho de locação das seções seguiu o mesmo procedimento descrito no levantamento com sísmica de refração, em que cada eletrodo foi georreferenciado com auxílio de um GPS. O levantamento topográfico também é importante para eletrorresistividade não só no que consta da locação das seções, mas também dos valores altimétricos que são utilizados durante o processo de inversão das pseudo-seções de eletrorresistividade.

O que há de comum em todos os levantamentos com eletrorresistividade é o arranjo aplicado que para todos os estudos mencionados foi o arranjo dipolo-dipolo, sendo que alguns detalhes sobre o trabalho de campo serão mais bem explicados para cada estudo. Em ambos os estudos de caso a geofísica entrou na obra após a realização das sondagens mecânicas, entrando como elemento elucidativo nas tomadas de decisão da obra.

3.6.2.1- PLANEJAMENTO DE CAMPO PARA OS ESTUDOS DE CASO 1 E 2

Os estudos de caso 1 e 2 utilizaram em seus levantamentos de campo a técnica de PEH (perfilagem elétrica horizontal). A escolha recaiu por ter boa sensibilidade às variações laterais e verticais na eletrorresistividade, aspecto importante quando se sabe que um dos objetivos principais é de detectar e mapear possíveis zonas de descontinuidades físicas internas no maciço rochoso local, representadas por mudanças laterais e verticais nos litotipos locais, seus diferentes solos e estruturas a eles impostas (fraturas abertas e/ou falhas geológicas). As evidencias do maciço rochoso foram detectadas nas sondagens mecânicas.

O arranjo dipolo-dipolo foi escolhido por possuir excelente resolução espacial para as diferenças de potencial desenvolvidas, já que é sensível à curvatura do campo elétrico. É, portanto, o mais apropriado na detecção de detalhes do modelo geoelétrico que se necessita de tal detalhe. A medição foi feita usando-se o eletrorresistivímetro (Syscal Pro) interligado, em cada medida, a quatro eletrodos (estacas de aço inox) dispostos colinearmente e em contato galvânico com a superfície do terreno. Dois deles serviram para a energização do solo, criando um campo elétrico primário (circuito transmissor, tendo como efeito medido a corrente elétrica estabelecida: I). Os outros dois serviram para medir a diferença de potencial desenvolvida (ΔV) em função da distribuição da corrente produzida pelos contrastes em resistividades do solo.

As malhas de medições usadas nas amostragens dos estudos de caso foram adaptadas de acordo com as medidas do terreno de cada obra. De forma geral, seguiram um padrão retangular com espaçamento entre seções de 5 m. É importante ressaltar que o planejamento das linhas geofísicas, em ambos os estudos de caso, ficou também em função da locação (arranjo físico) das sondagens mecânicas já existentes antes do levantamento geofísico, e por esse motivo, várias seções geofísicas ficaram sobrepostas às linhas de locação das sondagens, o que facilitou o trabalho de interpretação dos valores de resistividade elétrica dos materiais descritos nas sondagens.

Para o estudo de caso 1 (Brisas do Lago) a configuração do retângulo ficou com lados de 215 m na direção N-S e largura de 120 m na direção E-W (Figura 4.1). Neste retângulo foram distribuídas 25 (vinte e cinco) linhas de amostragem com direção geral N-S, referenciadas de L1 (a mais a leste; na beira do lago) a L25 (a mais a oeste, próxima à via de acesso ao Clube de Golfe), separadas entre si de 5 m. O conjunto de perfis de amostragem foi delimitadas por duas linhas bases (LB1 e LB2), orientadas na direção E-W e situadas proximamente às extremidades dos perfis (Figura 3.33). Ao todo foram amostrados 5.365 m de seções de eletrorresistividade, gerando cerca de 25.500 medidas.

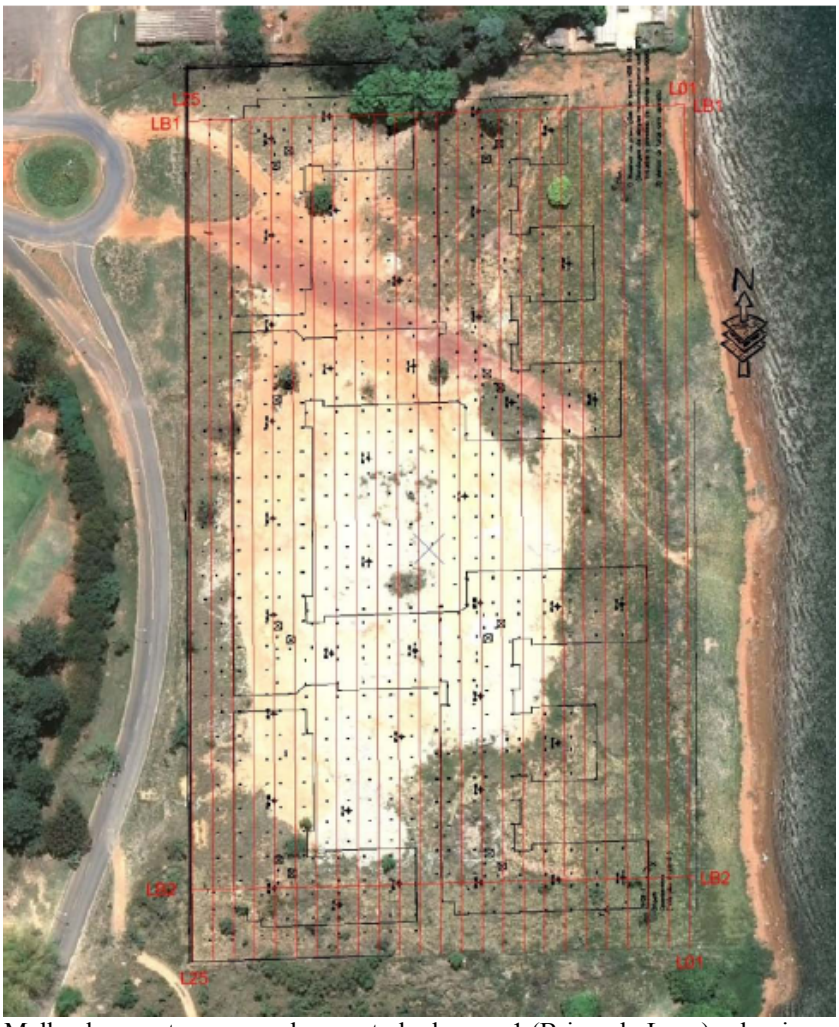


Figura 3.33 – Malha de amostragem usada no estudo de caso 1 (Brisas do Lago) sobre imagem de satélite (Google) e da carta com a locação das sondagens.

Para o estudo de caso 2 (SAUN) foi utilizado o mesmo arranjo dipolo-dipolo, o que mudou neste levantamento foi a disposição das seções em campo. A malha implantada (Figura 3.34) constou de 22 perfis de amostragem, dispostos na direção N-S, separados de 5 m e 7 perfis de controle, orientados E-W separados de 24 m. A amostragem totalizou 5.550 m, distribuídos numa área de 26.000 m^2.



Figura 3.34 – Malha de amostragem usada no estudo de caso 2 (SAUN) sobre imagem de satélite (Google) e da carta com a locação das sondagens.

Como o equipamento Syscal Pro permite leituras múltiplas nos dipolos, de forma automatizada, fez-se leituras em diversos níveis com a separação entre os dipolos de 5 m, 10 m e 15 m (no lugar de apenas um de 5 m) com medições simultâneas em aproximadamente 30 níveis. A Figura 3.35 mostra o esquema de medição empregado nos estudos de caso.

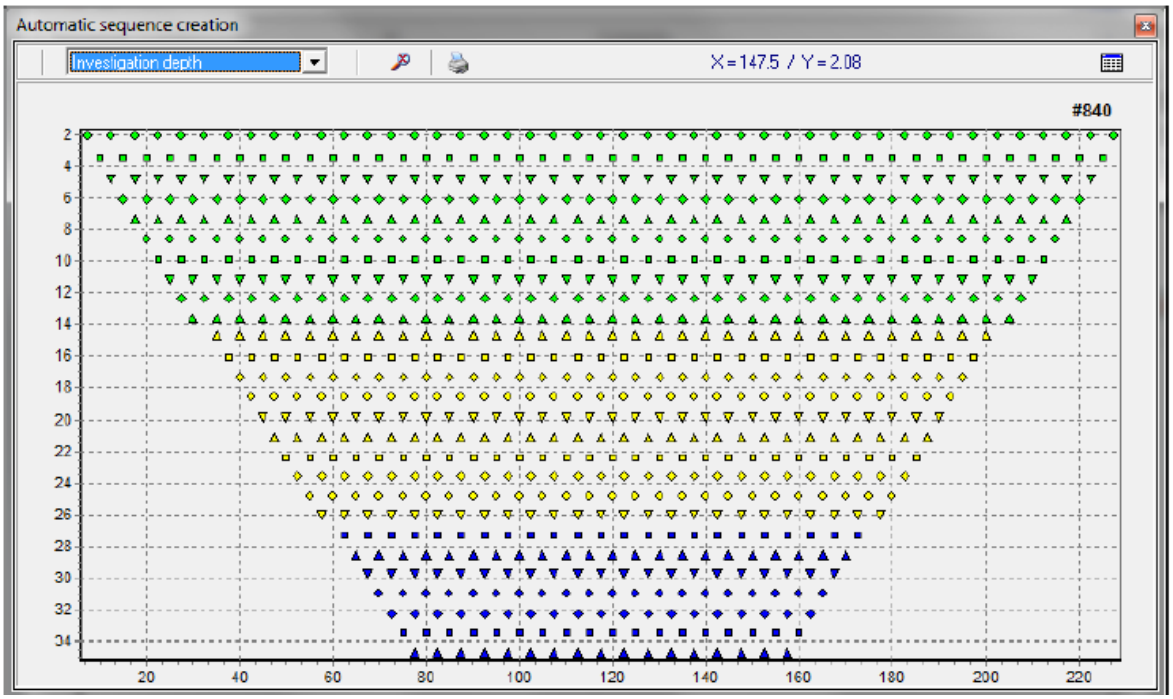


Figura 3.35 – Esquema de medição empregado. Pseudo-seção com a posição dos pontos medidos em superfície.

Além disso, para garantir a qualidade das leituras (relação sinal/ruído), o equipamento, realizou várias medições simultâneas em cada nível, com ciclos de 1 s, armazenando apenas as melhores medidas, utilizando como parâmetros, para o armazenamento dos dados, valores estatísticos (média e desvio padrão). Após um determinado nível de repetibilidade de leituras realizadas o equipamento, devidamente configurado em laboratório antes de ir para campo, é capaz de desprezar valores abaixo da média menos um desvio padrão e valores acima da média mais um desvio padrão, o que diminui consideravelmente a quantidade de erros (*bad points*) nos levantamentos de campo.

Um fator importante a ser citado é a data do levantamento de campo. No estudo de caso 1 a data não interfere no levantamento em virtude da obra está à beira do lago Paranoá que mantém um nível d'água praticamente constante durante todo o ano. Já o estudo de caso 2 foi realizado no mês de janeiro de 2011.

O trabalho de campo com eletrorresistividade é algo relativamente rápido, contudo para garantir a qualidade do trabalho foi gasto em cada linha de eletrorresistividade um tempo médio de 1 h, o que gera, de fato, uma enorme quantidade de dados de eletrorresistividade em cada linha geofísica.

3.6.2.2- PLANEJAMENTO DE CAMPO PARA LEVANTAMENTO COM ELETRORRESISTIVIDADE NO SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA

No Setor Noroeste o planejamento de campo seguiu uma parte da metodologia dos levantamentos, com sísmica de refração, feitos pela pesquisa. Em virtude das limitações de acesso no local, o planejamento partiu do aproveitamento dos locais mais acessíveis para instalação dos equipamentos em campo. Como na época em que o levantamento com eletrorresistividade foi realizado já havia movimentação de algumas obras no local, a pesquisa aproveitou os caminhos abertos pelos equipamentos de terraplenagem para realizar as seções de eletrorresistividade.

A ideia inicial é que houvesse sobreposição de dados, compatibilizando os locais amostrados com sísmica de refração com os locais amostrados com eletrorresistividade, entretanto, em função da movimentação do canteiro de obras que se instalou no local, apenas algumas seções puderam ser compatibilizadas (sobreposição de dados) como é o caso da grande linha de 3,55 km de extensão que atravessa todo o Setor Noroeste, nela foram realizados tanto o levantamento de campo com sísmica de refração quanto eletrorresistividade.

A Figura 3.36 mostra a malha de amostragem utilizada nos levantamentos de eletrorresistidade no Setor Noroeste. Comparando a malha de amostragem da Figura 3.32 (malha utilizada nos levantamentos de sísmica de refração) com a Figura 3.36 pode-se observar os locais em que houve compatibilidade de locação das seções.

Os levantamentos de campo no Setor Noroeste foram realizados aproveitando-se do período chuvoso entre os meses de Novembro e Dezembro. O único inconveniente neste tipo de levantamento são as chuvas de maior volume que obrigam o desligamento da linha, mas no caso de chuvas de pouco volume (chuvisco) o levantamento pode ser realizado sem nenhum problema desde que não haja a ocorrência de relâmpagos que podem atingir a linha e queimar o equipamento.



Figura 3.36 – Malha de amostragem usada Setor Noroeste de Brasília/DF sobre imagem de satélite (Google).

3.6.3- CARTA DE USO E COBERTURA DO SOLO PARA O SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA

A carta de uso e cobertura de solo foi elaborada com base nas informações extraídas da imagem do satélite *Quickbird*, de 2008. Utilizou-se 3 bandas espectrais com resolução espacial de 1 metro e composição colorida RGB 3, 2, 1.

A principal finalidade desta carta é permitir a análise das relações de uso e cobertura do solo com outros processos, como por exemplo, o próprio processo de ocupação do setor noroeste e outros como processos erosivos na área de estudo. A carta foi gerada no programa Spring 4.3.3, empregando o método de classificação supervisionada, isto é, classificação com treinamento que consiste em obter amostras de uma imagem para posterior classificação da mesma, a Figura 3.37 mostra o processo de segmentação da imagem em polígonos que

posteriormente foram classificados de acordo com o uso e/ou a cobertura do solo e visitas a campo para confirmação dos dados observados.



Figura 3.37 – Processo de segmentação de imagem para posterior classificação do uso e cobertura do solo pelo processo de treinamento de amostras.

A área estudada encontra-se praticamente toda cercada por área urbana já consolidada e tem sofrido diversas alterações nos últimos anos, em função de várias ações antrópicas, tais como: retirada de areia, retirada irregular de espécies arbóreas, invasões clandestinas, abertura de estradas de terra, deposição irregular de resíduos da construção civil e resíduos sólidos urbanos (depósitos tecnogênicos), incêndios criminosos e atualmente a construção do novo bairro.

Com as visitas a campo foi realizada a descrição das classes identificadas nas imagens e com essa descrição foi possível realizar o procedimento final resultando na carta de uso e cobertura do solo. As classes identificadas no setor noroeste de Brasília até pouco antes do inicio das obras no ano de 2010 foram: Cerrado Ralo; Cerrado Típico; Cerrado Antrópico; Campo Sujo, Áreas Alteradas; Áreas Degradadas; Área Construída e Solo Exposto

3.6.4- CERRADO RALO

Também denominada Campo Cerrado, é um tipo fitofiosionômico que possui os estratos herbáceo e arbustivo dominantes e um estrato arbóreo constituído por árvores isoladas e baixas, não chegando a formar dossel. As áreas de cerrado ralo estão identificadas na carta da Figura 3.38. Observaram-se, por sob da vegetação baixa, alguns depósitos tecnogênicos isolados na área de cerrado ralo. Ainda assim a área foi classificada na carta como área de cerrado ralo, devido às características de sua vegetação ainda predominantes no local. De qualquer forma o intenso grau de antropismo introduziu profunda modificação na paisagem, conforme se pode observar na Figura 3.38.



Figura 3.38 - Cerrado Ralo próximo ao Setor Terminal Norte.

Em um pequeno trecho da área de Cerrado Ralo situado em frente ao Setor Terminal Norte, mais ao lado da Epia (estrada parque indústria e abastecimento), observou-se uma transição para uma área de Campo, pois há um predomínio do estrato herbáceo com arbustos e árvores bem dispersas.

3.6.5- CERRADO TÍPICO

A área de Cerrado Típico situa-se mais ao centro, possuindo alguns trechos em bom estado de conservação, sendo que, este tipo fitofisionômico tem sido degradado por invasões que utilizam as espécies arbóreas, como madeira de melhor qualidade, para construção de barracos, cercas e como lenha. Além das espécies encontradas no Cerrado Ralo, também foram observadas no Cerrado Típico espécies arbóreas de maior porte (altura média de 5 m), como pode ser observado na Figura 3.39.



Figura 3.39 - Cerrado Típico próximo a Epia.

Parte da área de cerrado típico, identificada na carta de uso e cobertura do solo, é ocupada por indígenas que auto intitulam o local como Santuário Sagrado dos Pajés. Apesar da maior parte da classe (área identificada na imagem) estar preservada, não há como afirmar que esteja 100% preservada, justamente por ser ocupada pelo homem e seu histórico de influências no local.

3.6.6- CERRADO ANTRÓPICO

Apesar de possuir várias características do cerrado típico, considera-se na carta de uso e cobertura do solo, a classe Cerrado Antrópico, como áreas de cerrado modificadas principalmente por vários depósitos irregulares de resíduos sólidos urbanos ou resíduos da

construção civil (depósitos tecnogênicos), e algumas invasões, ou seja, são áreas afetadas pela ação do homem. (Figura 3.40).

Muitos moradores, a maioria sem terra, vivem da coleta de lixo. Esses moradores transportam materiais que podem ser reciclados (alumínio, papelão, garrafas pet, entre outros) para a área com o intuito de vendê-los posteriormente. O problema é que uma parte desse material acaba por ser espalhado pelo local, devido à falta de condições de estocagem e até mesmo pelo tipo de transporte que é utilizado pelos moradores. Além disso, a própria presença humana e de animais que não fazem parte da flora/fauna típica do cerrado afetam o ecossistema local. A maior parte do cerrado ainda existente no Setor Noroeste é caracterizada por essa classe. Algumas áreas chegam a apresentar espécies que não são nativas da região, como mangueiras e pinheiros, facilmente identificados na área.

Atualmente existe um processo de descaracterização da área de cerrado do Setor Noroeste, pelo fato da área hoje ser um grande depósito de resíduos urbanos e pela retirada de árvores nativas.



Figura 3.40 - Cerrado Antrópico próximo a Epia.

3.6.7- CAMPO SUJO

O campo sujo caracteriza-se por apresentar dois estratos: um estrato herbáceo dominante e um arbustivo, sendo que a presença de indivíduos arbóreos é praticamente inexistente. Foram identificadas áreas de campo próximo a Epia.

Observou-se nas áreas de campo sujo a presença de invasoras como o capim brachiaria (Figura 3.41). Esse tipo de capim se espalha com enorme facilidade, descaracterizando outras classes de vegetação do local.



Figura 3.41 - Campo Sujo próximo a Epia.

3.6.8- ÁREAS ALTERADAS

Consideram-se como áreas alteradas aquelas onde a vegetação foi quase que totalmente removida ou alterada, existindo a presença de pequenos trechos de cerrado ou simplesmente alguns indivíduos isolados. Encontram-se nessa classe as áreas de Uso Institucional como o Camping de Brasília, ver Figura 3.42.



Figura 3.42 - Áreas Alteradas.

3.6.9- ÁREAS DEGRADADAS

São aquelas áreas onde a vegetação foi completamente retirada, principalmente pelas seguintes ações: retirada de terra e areia, invasão de áreas, deposição irregular de resíduos sólidos urbanos e resíduos da construção civil e por processos erosivos, ver Figura 3.43 e Figura 3.44.

Dentro da área destinada ao Parque Ecológico Norte já houve uma grande invasão conhecida como "Invasão do Ceub", que foi praticamente toda removida, mas ainda permanecem alguns barracos. Foi encontrada uma grande erosão dentro do Setor Noroeste, identificada na carta de cobertura e uso do solo, que atravessa todo o setor, atingindo ainda uma parte da área destinada ao Parque Ecológico Norte.



Figura 3.43 - Área alterada por erosão antrópica, com grande acúmulo de resíduo sólido urbano e resíduo de construção civil .



Figura 3.44 - Área alterada por erosão antrópica – Início da erosão próximo ao Setor Militar Urbano.

3.6.10- ÁREA CONSTRUÍDA

São áreas caracterizadas por ocupações como a Diretoria de Vigilância Ambiental (Dival), o Hospital da Criança (ABRACE), Hospital de Apoio de Brasília (HAB), Chácara Casa do Vovô, antigo Sanatório Espírita de Brasília e o autointitulado Santuário Sagrado dos Pajés. A Figura 3.45, mostra uma visita feita pelos pesquisadores da UnB, juntamente com um responsável técnico da Funai, no Santuário dos Pajés.



Figura 3.45 - Visita feita pelos pesquisadores da UnB no Santuário Sagrado dos Pajés, localizado no centro do Setor Noroeste de Brasília.

3.6.11- SOLO EXPOSTO

As áreas consideradas como solo exposto, na carta de cobertura e uso do solo, são áreas de estradas de terra abertas no interior do Setor Noroeste. Algumas dessas estradas são clandestinas e outras são estradas de acesso às linhas de abastecimento de água e linhas de esgoto da Caesb. Outra estrada foi aberta para a passagem das linhas de abastecimento de energia da Ceb, ver Figura 3.46.

A partir da identificação das classes em campo, foi elaborada uma carta de uso e cobertura do solo, utilizando-se das ferramentas de sensoriamento remoto do Spring 4.3.3. Pela carta,

percebe-se que uma boa parte do cerrado é antrópico, ou seja, existem várias áreas de cerrado com depósitos de material tecnogênico, enquanto outras áreas contêm espécies exóticas, como pinheiros, mangueiras, entre outras, que descaracterizam a área de cerrado. Uma boa parte já é afetada por área degradada, seja ela por depósitos clandestinos de material tecnogênico, solo exposto provocado por estradas clandestinas e pelas vias de acesso das empresas Caesb e Ceb, ou pela erosão que se inicia próximo ao Setor Militar Urbano e vai até próximo das quadras 900 da Asa Norte.



Figura 3.46 - Solo exposto nas vias de acesso do Setor Noroeste.

3.7- RELATÓRIOS TÉCNICOS DE SONDAGEM

Os relatórios técnicos de sondagem foram obtidos junto às empresas de sondagem, tanto para os estudos de caso quanto para a pesquisa realizada no setor noroeste. Todas as sondagens foram passadas em formato digital, mas apesar disso, em virtude da falta de interatividade entre os programas computacionais, todas as sondagens tiveram que ser redigitalizadas para o banco de dados digital da pesquisa.

Dois estudos de caso optaram por realizar sondagens do tipo mista (SPT mais rotativa) em toda obra, porém a maior parte das sondagens disponíveis no banco de dados digital da pesquisa é do tipo SPT.

Uma dificuldade encontrada, principalmente em projeto de escala menor, é o georreferenciamento das sondagens, neste caso, todas as sondagens do setor noroeste tiveram que ser georreferenciadas, pois estavam com locação arbitrária e nível do terreno também com cota arbitrária. Nos estudos de caso houve planejamento para realizar campanha topográfica e devido cuidado com a locação das sondagens em campo.

A Figura 3.47 mostra um exemplo de sondagem contida no banco de dados digital da pesquisa.

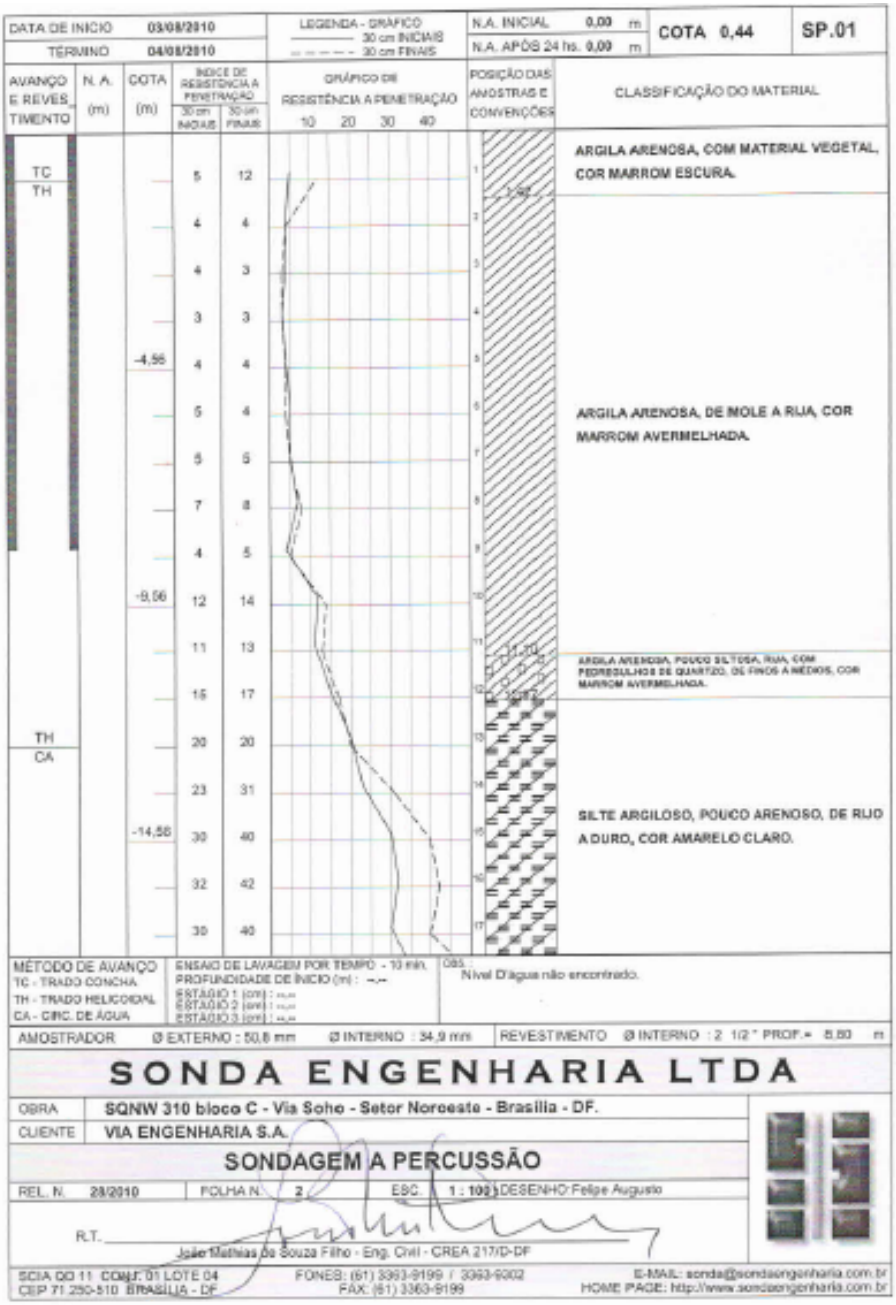


Figura 3.47 – Relatório de sondagem SPT contido no banco de dados digital da pesquisa.

Os dados dos relatórios de SPT, principalmente o número de golpes (Nspt), passaram por

adequação de valores para que os modelos de Nspt apresentassem contraste de resultado. Na realidade, o que se fez foi limitar todos os valores de Nspt que estavam acima de 60 golpes para 60 golpes, tal processo permite melhor contraste no modelo 3D de Nspt sem desrespeitar a NBR 6484 (ABNT, 2001).

A Figura 3.48 mostra no relatório de sondagem como foi realizado o processo de adequação dos valores de Nspt.

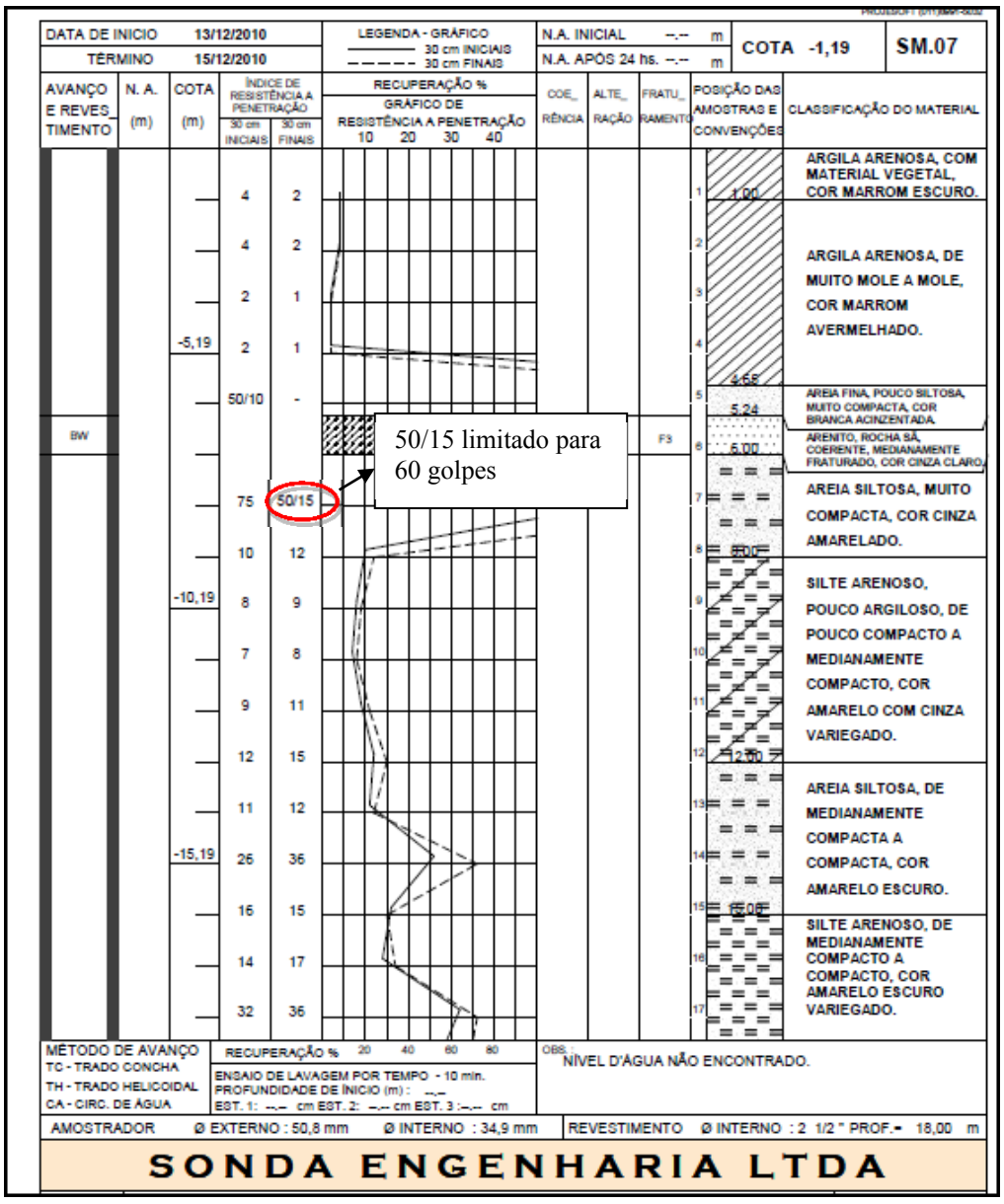


Figura 3.48 – Adequação de valores de Nspt acima de 60 golpes nos relatórios de sondagem.

3.8- PROCESSAMENTO DOS DADOS SÍSMICOS

Após a aquisição dos dados em campo, o primeiro passo no processamento dos dados de refração é a determinação dos tempos de chegada da onda longitudinal. Contudo nem sempre se consegue realizar este procedimento sem a realização de algumas outras etapas, como por exemplo, a eliminação ou atenuação de ruídos no sinal.

A Figura 3.49 mostra um sismograma obtido no Setor Noroeste de Brasília onde pode-se identificar algumas características do sinal sísmico, como a marcação da onda direta, o eixo vertical representando o tempo decorrido, o posicionamento dos geofones no eixo horizontal, a marcação das primeiras quebras (primeiro sinal que chega no geofone) e por fim as ondas superficiais.

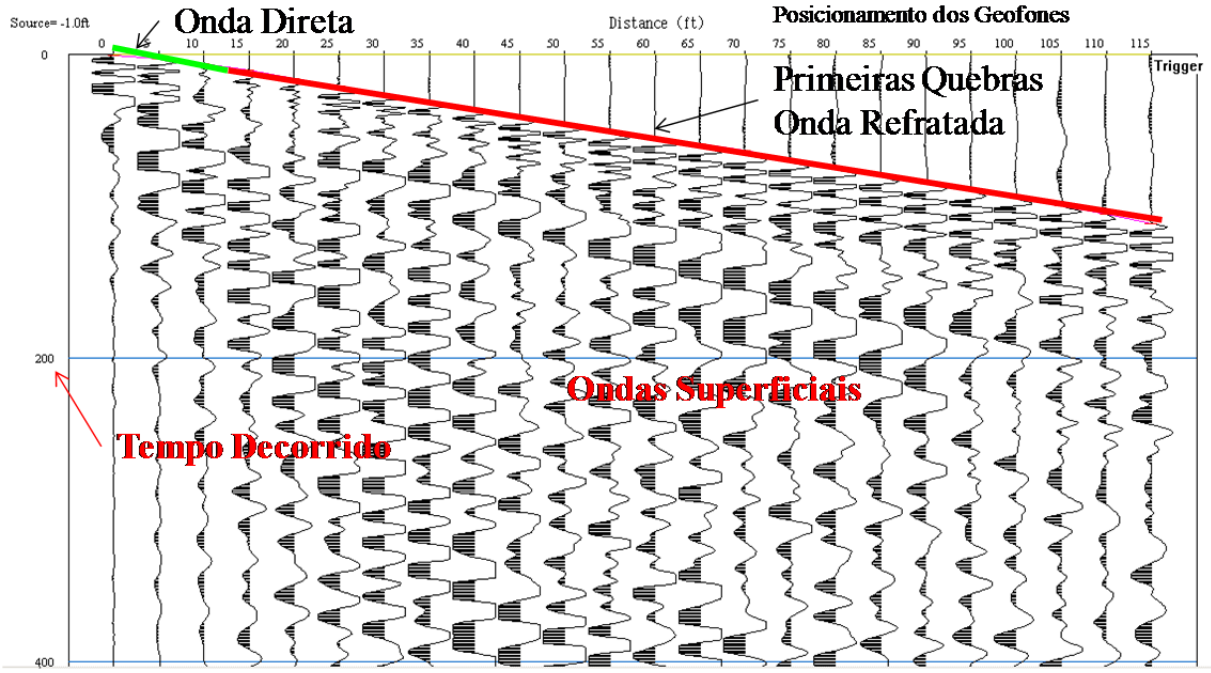


Figura 3.49 – Descrição de um sismograma obtido no setor noroeste de Brasília com 24 geofones espaçados de 5 m de distância.

Eventualmente foi necessária a aplicação de filtros para eliminação de ruídos no sinal. Os filtros mais utilizados foram o passa-baixa que elimina ruídos de alta frequência, o filtro passa alta para eliminar ruídos de baixa frequência e o filtro passa-banda que rejeita frequências de certa faixa de valores, não sendo necessário aplicar nenhum outro tipo além desses citados.

Para que seja possível marcar as primeiras quebras do sinal sísmico é necessário, em muitos casos, aplicar valores de ganho no sinal sísmico, mesmo com o processo de estocagem ou

empilhamento de sinal, a marcação das primeiras quebras pode não estar visível ou evidente. A Figura 3.50 mostra um exemplo do sinal sem aplicação de ganho (a) e com aplicação de ganho (b).

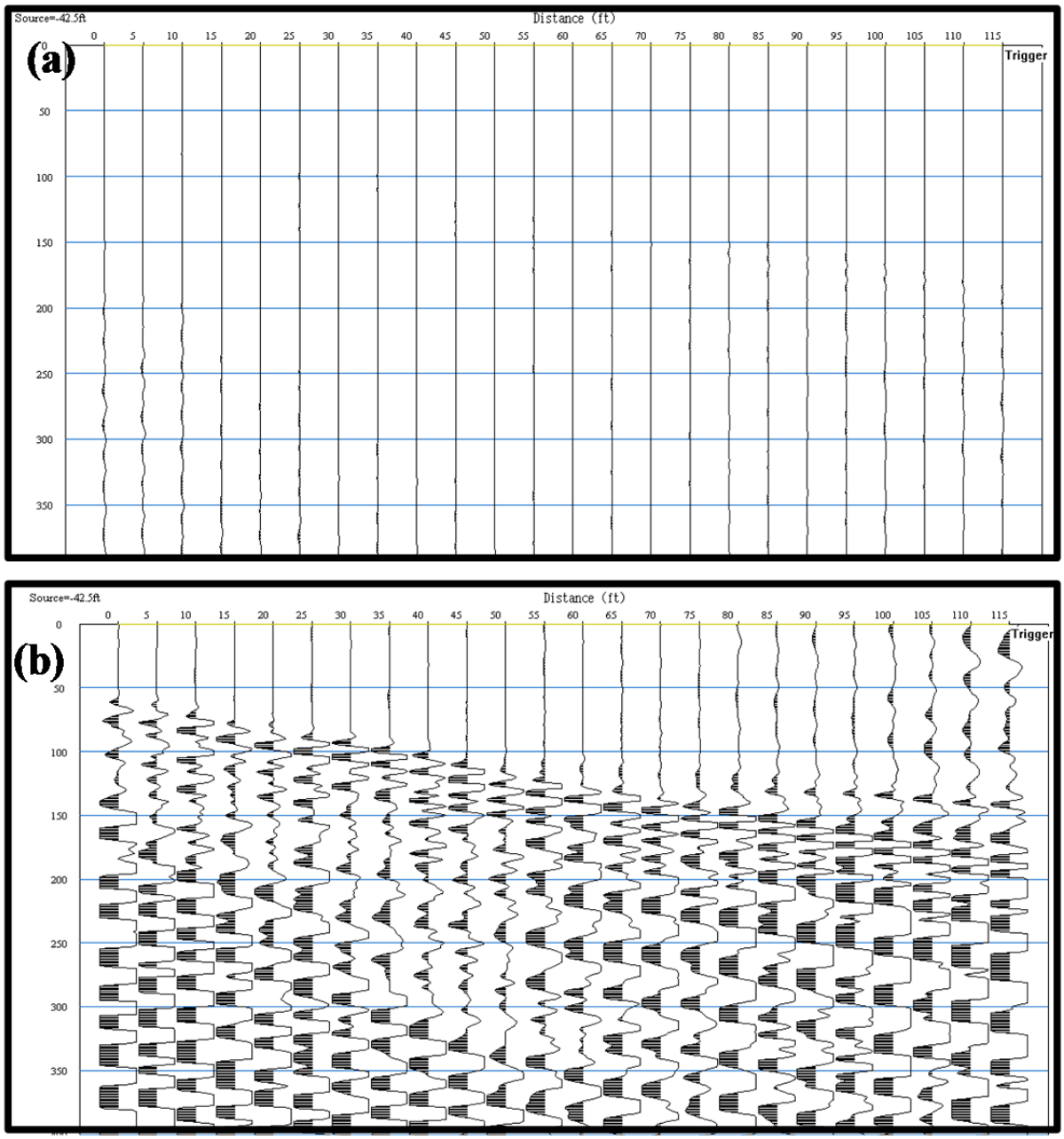


Figura 3.50 – Aplicação de ganho em sinal sísmico. (a) sem ganho; (b) com aplicação de ganho.

Após aplicação de ganho no sinal realizou-se a marcação das primeiras quebras em todos os sinais sísmicos. Este processo foi bastante moroso, e requer bastante atenção, pois cada levantamento sísmico gerou 5 tiros na mesma linha, cada tiro tem leitura de 24 geofones, ou seja, para cada linha foram marcadas 120 primeiras quebras de sinal. A Figura 3.51 mostra um exemplo de marcação das primeiras quebras no sismograma.

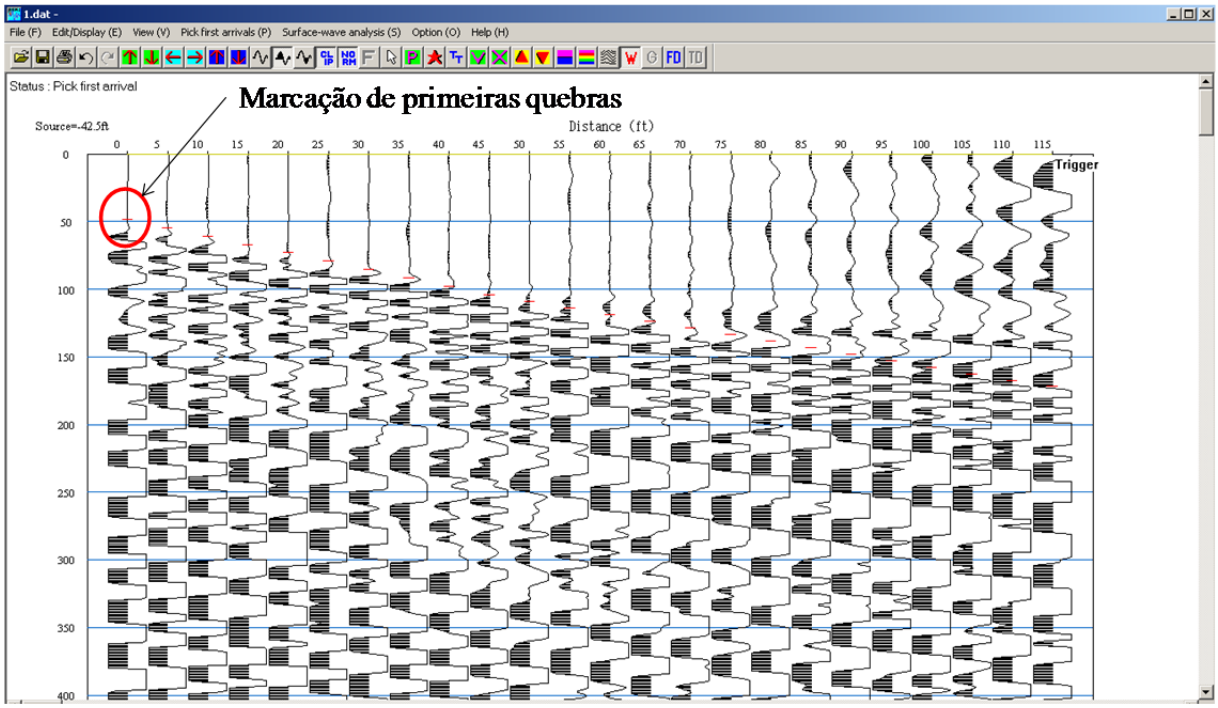


Figura 3.51 – Marcação de primeiras quebras de sinal.

A Figura 3.52 mostra o resultado da marcação das primeiras quebras de uma linha sísmica. Pode-se observar o paralelismo entre o tiro direto e seu respectivo tiro *offset*, o que indica que a interface sísmica entre os dois sinais é a mesma. O mesmo ocorre para o tiro reverso.

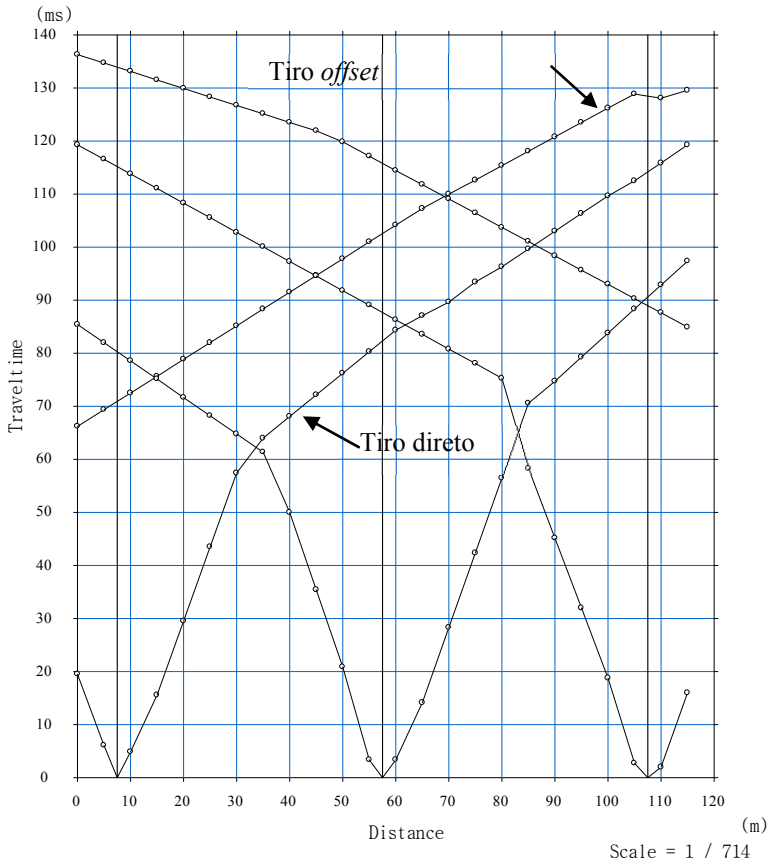


Figura 3.52 – Resultado final da marcação de primeiras quebras de sinal de uma linha sísmica.

O próximo passo necessário é a marcação das linhas de velocidade no gráfico. Após esse procedimento o programa de computador *Plotrefa*, do pacote de programas que acompanha o equipamento, calcula por regressão a linha que melhor se ajustou à marcação das velocidades.

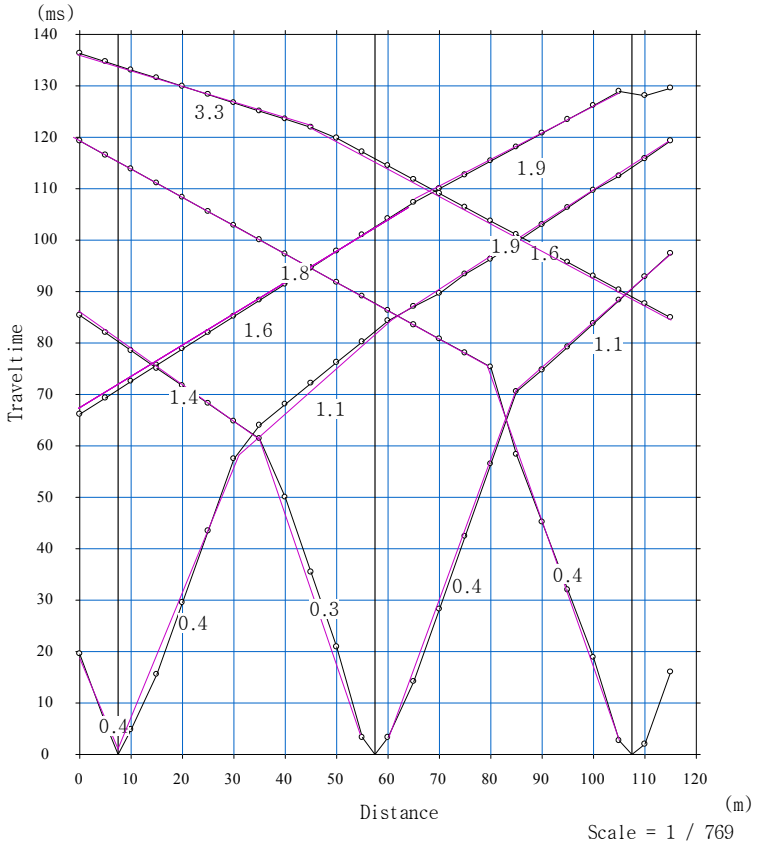


Figura 3.53 – Resultado final da marcação das linhas de velocidade.

Para o último passo que é o processo de inversão é necessário que se faça a correção de *datum* que nada mais é que corrigir o valor Z de cada geofone baseado na topografia do terreno. Para isso basta inserir no *Plotrefa* a topografia do terreno por meio de um arquivo texto contendo o valor do eixo X (0, 5, 10, 15....115) que representa os espaçamentos de cada geofone em campo e o valor Z de cada geofone em formato de coluna separada por tabulação. Com a leitura do arquivo com a topografia, solicita-se do programa que se considere a mesma durante o processamento dos dados sísmicos.

Após a correção de *datum* realiza-se o processo de inversão que consiste primeiramente em estabelecer alguns critérios para a geração do modelo de velocidades (Vp) como: estimativa da camada mais profunda (no caso da pesquisa 50 m que é o limite para a fonte sísmica usada); estimativa da velocidade mínima no modelo (geralmente 0,30 km/s que é aproximadamente a velocidade da onda aérea); estimativa da velocidade máxima no modelo

(aproximadamente 3 km/s que é uma velocidade próxima da velocidade da rocha quartzito, bastante presente no local); estimativa da quantidade de camadas no modelo (*default* do programa = 10). Quanto melhor a qualidade do sinal sísmico e quanto mais informação o usuário tiver sobre a geologia local melhor o modelo de inversão (Figura 3.54).

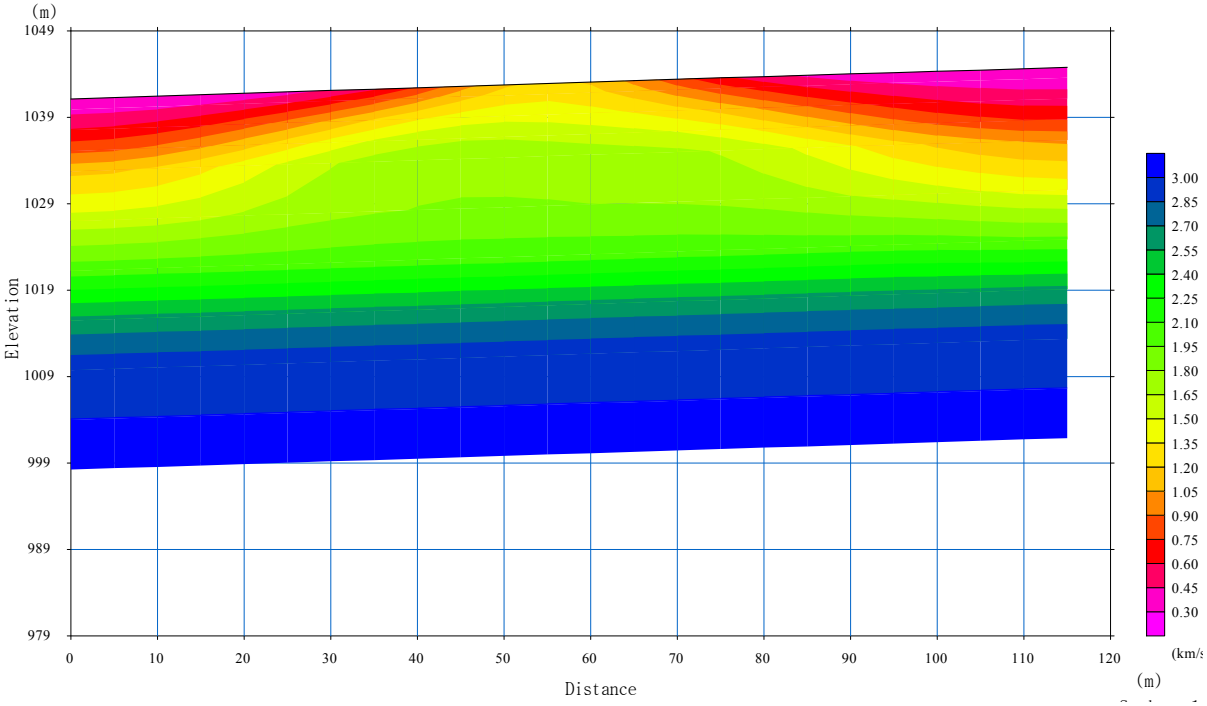


Figura 3.54 – Exemplo de um modelo de inversão de sinal sísmico.

A integração das linhas sísmicas foi realizada no programa *RockWorks* 15 após o processamento dos dados no programa *Plotrefa*.

3.9- PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ELETRORRESISTIVIDADE

O processamento dos dados de eletrorresistividade é relativamente mais simples que o processamento de dados sísmicos. A maior dificuldade em praticamente qualquer trabalho de prospecção geofísica é a parte de interpretação dos resultados, que nem sempre é simples de resolver.

O processamento de linhas de eletrorresistividade começa com a correção de *datum* das linhas, ou seja, com a inserção dos dados de topografia em cada linha de eletrorresistividade. Para tanto, utilizou-se a mesma metodologia utilizada nas linhas de sísmica de refração, utilizou-se um GPS topográfico para locação das linhas de eletrorresistividade, os valores coletados no GPS foram incorporados nas linhas de eletrorresistividade por meio do programa

de computador Prosys II que acompanha o equipamento Syscal Pro. A Figura 3.55 mostra a tela do programa responsável por inserir os dados de topografia de cada linha.

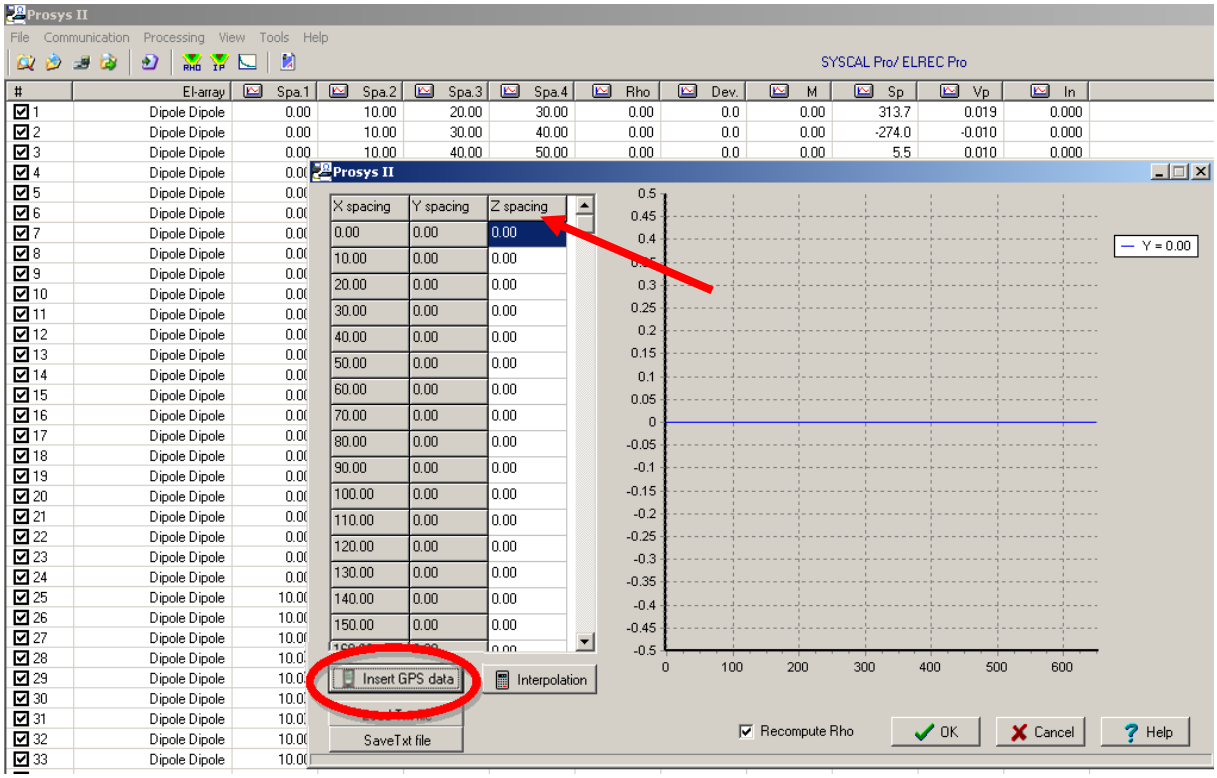


Figura 3.55 – Correção da topografia (*datum*) das linhas de eletrorresistividade.

Na sequência, foi realizado o controle de qualidade dos dados básicos, fazendo-se as seguintes verificações:

1. Identificação física dos dados (linha/perfil e estação de amostragem);

2. Verificação do posicionamento das pseudo-seções (x, y e z) após a inserção dos dados de topografia;

3. Controle de qualidade das grandezas físicas medidas (I e ΔV), com estudo dos erros médios e edição de dados espúrios, quando necessário. A Figura 3.56 mostra a edição de dados espúrios, excluindo-se os valores conhecidos como *bad data points*, o que melhora substancialmente o resultado final de cada linha.

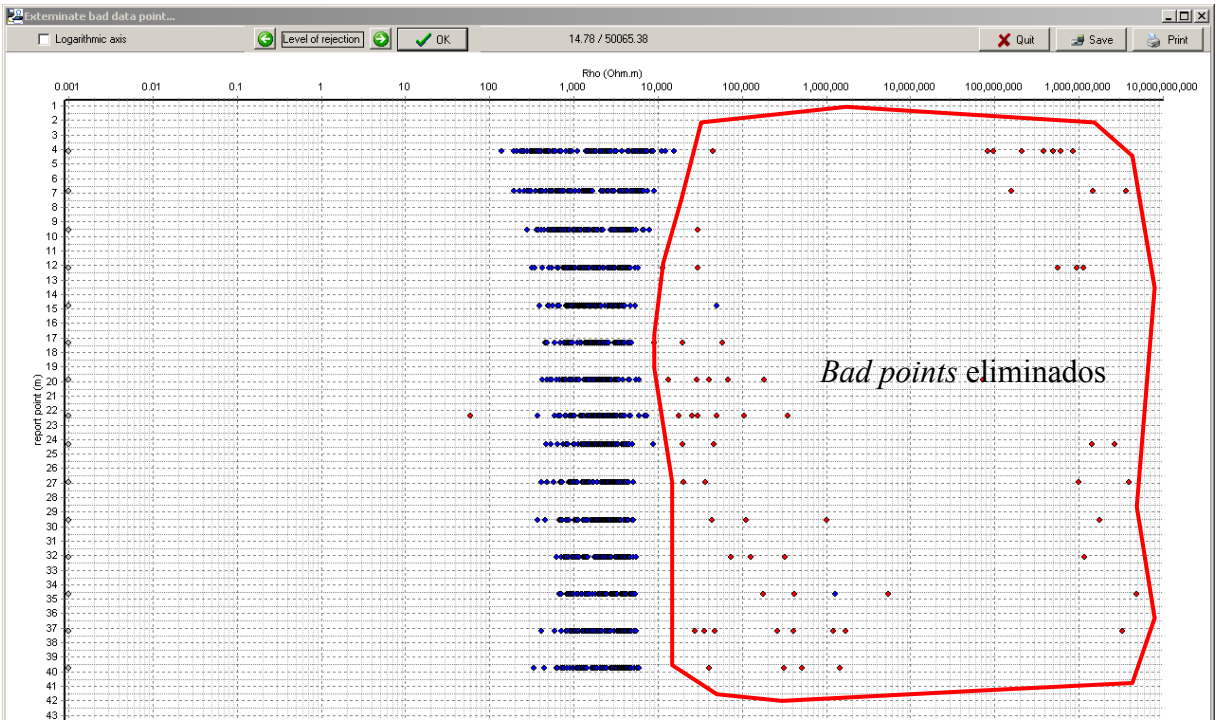


Figura 3.56 – Exemplo de exclusão de *bad data points* (dados espúrios) de uma linha de eletrorresistividade.

Por fim, foram geradas as pseudo-seções. Trata-se da primeira observação da pseudo-seção geoelétrica medida, com a distribuição espacial das resistividades aparentes ainda em termos de uma representação geométrica (Figura 3.57).

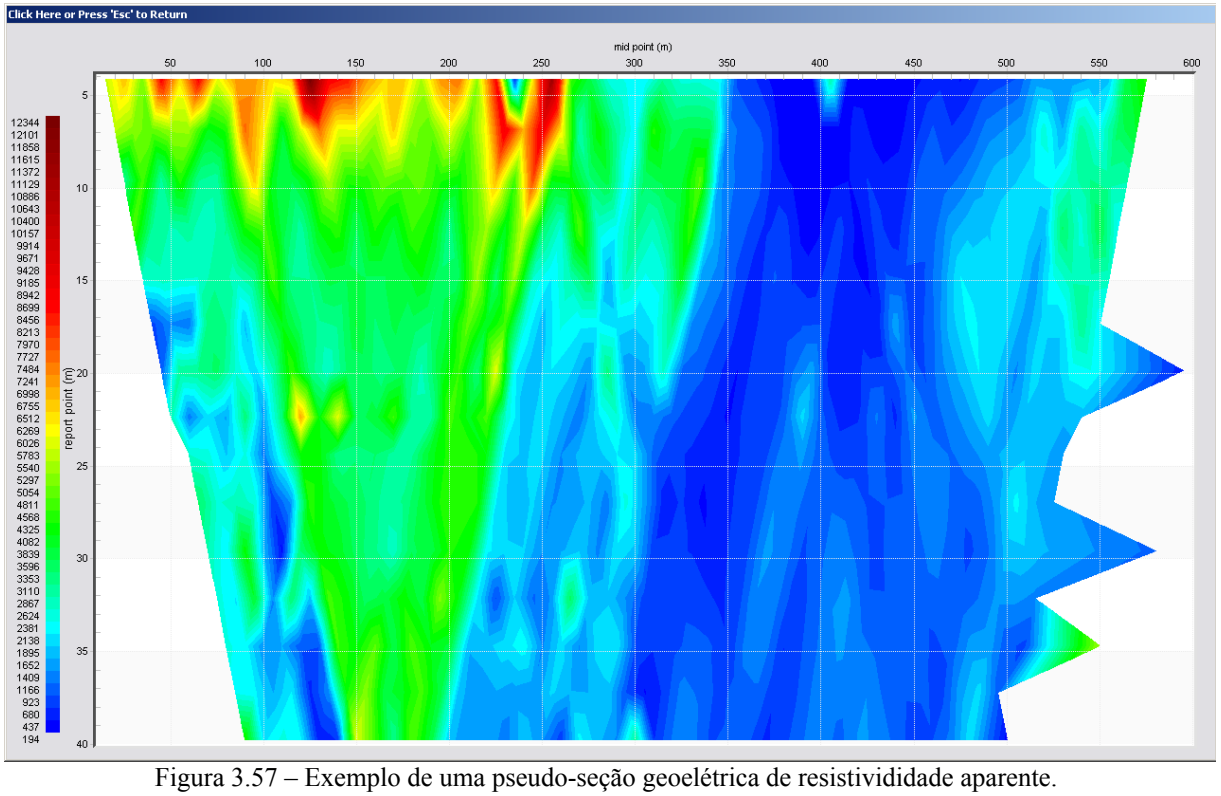


Figura 3.57 – Exemplo de uma pseudo-seção geoelétrica de resistivididade aparente.

A finalidade de se gerar as pseudo-seções é a de se ter uma primeira visão espacial da distribuição dos valores de resistividade e verificar a coerência espacial da distribuição dos valores. Serve, também, como uma primeira visão do modelo geoelétrico do solo e das variações espaciais mais importantes neste.

Nestas pseudo-seções, as resistividades aparentes estão expressas em Ohm.m. Nelas são observados os padrões característicos da representação geométrica para este tipo de arranjo.

O qualificativo "aparente" vem do fato de que estes valores foram determinados sobre um substrato heterogêneo (e não num homogêneo usado na caracterização física do processo) onde os efeitos medidos resultam de variações na distribuição das resistividades (caso real) dos materiais geológicos em sub-superfície.

3.9.1- INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA (MODELO FÍSICO)

No processamento de dados de eletrorresistividade a grandeza física a ser interpretada é obviamente a própria eletrorresistividade; ou seja: a habilidade da rocha/solo em dificultar a condução elétrica. De acordo com a literatura, a eletrorresistividade nas rochas sãs e secas, como encontradas em profundidade é, em geral, muito elevada. Os minerais que as constituem são, na maioria delas, silicatos das mais diversas combinações químicas que são isolantes elétricos por natureza.

As variações que os diversos litotipos apresentam nesta condição é pequena e a resistividade é muito elevada (milhares de Ohm.m) e difícil de ser medida pela dificuldade em se estabelecer contatos galvânicos nestes materiais. O que torna os materiais geológicos prospectáveis pelos métodos elétricos decorre do fato de que quando estes são expostos na superfície da terra (epirogenismo, erosão), aparecem toda uma sorte de fissuras e fraturamentos e desagregações internas causados pelas acomodações físicas destes materiais às condições de temperatura e pressão ambientes, menores em que estavam ou foram formados (rochas sedimentares, ígneas e metamórficas), constituídos e que permitiram tomar sua forma física final (metamorfismos os mais diversos).

Este fato causa o aparecimento de porosidade secundária nestes. Esta aliada àquelas próprias do material, dependendo de sua natureza e do nível de intemperismo (químico e/ou físico) presente, causa o surgimento de micro espaços vazios. A intercomunicação destes vazios entre si determina a permoporosidade dos mesmos. A quantidade por volume e a natureza do

eletrólito que preenche esta permoporosidade, total ou parcialmente, determina a eletrorresistividade do material geológico em observação, grandeza que é medida em levantamentos e ensaios como o realizado.

O eletrólito que preenche esta permoporosidade é normalmente a água que nela se movimenta e tem suas propriedades eletrolíticas determinadas pela natureza e quantidade de sais dissolvidos, absorvidos, adsorvidos e livres para atuarem como tal no processo de condução eletrolítica (cátions e aníons) desencadeado quando um campo elétrico é estabelecido na superfície.

Com isso, o fato de diferentes materiais geológicos possuírem diferentes permoporosidades, um mesmo eletrólito (água potável) pode emprestar ao conjunto, diferentes eletrorresistividades que é o que conta na prospecção geoelétrica.

A interpretação geofísica dos dados gerados numa PEH (Perfilagem Elétrica Horizontal) como no caso presente objetiva encontrar modelos físicos – ditos geoelétricos – capazes de gerar uma pseudo-seção, agora modelada, que melhor se assemelhe àquela medida. Está calcada em modelagens numéricas em 2D (seções verticais do subsolo) usando interpoladores adequados. Neste processo as resistividades aparentes obtidas da modelagem numérica do modelo geoelétrico então conseguido são comparadas às medidas. A diferença entre os dois conjuntos (medido e modelado) é minimizada por meio de processo de otimização no sentido dos mínimos quadrados (alteração nos parâmetros que controlam o modelo geoelétrico), denominado de inversão.

Quando se encontra a melhor convergência possível entre os dois conjuntos de resistividades aparentes referidos (medido e modelado) se aceita o modelo geoelétrico encontrado como aquele que melhor representa a distribuição espacial das eletrorresistividades reais numa seção 2D ou num meio (3D). Nesta etapa foi utilizado o programa computacional RES2DINV que realiza o processo de inversão dos dados.

Esta distribuição das eletrorresistividades na subsuperfície passa então ser um análogo da distribuição dos materiais geológicos que foram suas fontes, agora em suas posições espaciais reais (e não geométrica como acontece na representação pictórica das medições).

Depois de conseguida esta modelagem a malha resultante é deformada pela topografia para a minimização dos efeitos desta nas determinações e modelagens feitas. Para melhor associar os

dados resultantes das interpretações geofísicas com a realidade foi necessário utilizar os dados provenientes das sondagens SPT e por associação de resultados conseguiu-se estabelecer que tipo de material corresponde a um determinado nível de eletrorresistividade. A Figura 3.58 mostra um exemplo de seção de eletrorresistividade (modelo invertido) feita pelo programa computacional RES2DINV, onde a primeira seção é chamada de pseudo-seção dos dados medidos a segunda é a pseudo-seção de dados calculados pelo programa e a última é a seção modelada invertida de eletrorresistividade.

Após o processamento de cada seção de eletrorresistividade, os dados foram exportados em formato de coluna tabulada em texto puro (ASCII) para posterior modelagem tridimensional. As colunas contém os dados de coordenadas Leste, coordenada Norte, coordenada Z (altitude) e o valor de resistividade em Ohm.m para cada ponto processado da linha.

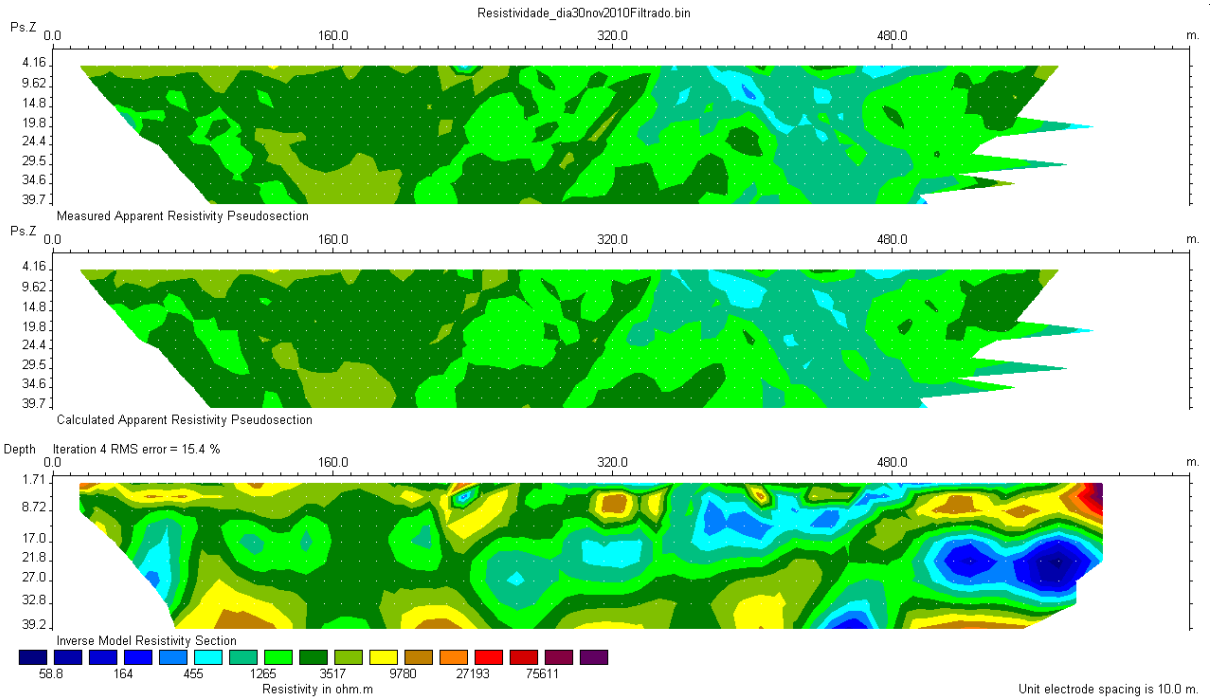


Figura 3.58 – Exemplo de uma seção invertida de eletrorresistividade.

3.10- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE DADOS GEOTÉCNICOS E GEOFÍSICOS

A modelagem de dados em ambiente tridimensional requer alguns procedimentos metodológicos, que serão descritos a seguir. Os parâmetros mais utilizados para modelagem tridimensional são os litológicos no caso de descrição de rochas; estratigráficos para descrever as camadas de solo ou material escavável; valores de Nspt ou qualquer medida numérica (dados geofísicos, geoquímicos, parâmetros de resistência, entre outros) que podem ser

descritos pontualmente ou entre intervalos preestabelecidos; nível d'água; entre outros parâmetros que podem ser adaptados para o *RockWorks* 15.

3.10.1- CADASTRAMENTO DOS DADOS

O primeiro passo para o processo de modelagem tridimensional é o cadastro dos dados no banco de dados do programa computacional que será responsável pela modelagem. É muito importante que o programa computacional, independente de qual seja, trabalhe com algum sistema gerenciador de banco de dados, pois no geral, a tendência é que a quantidade de dados a ser trabalhada seja grande e com um sistema para gerenciar toda essa carga de dados não há o perigo de sobrecarga de memória do computador, nem do programa computacional responsável pela modelagem dos dados.

O programa computacional utilizado pela pesquisa para a modelagem dos dados em três dimensões é o *RockWorks* 15. Nele o cadastramento dos dados foi dividido no cadastramento dos furos de sondagem e no cadastramento dos dados provenientes dos levantamentos geofísicos. A escolha por esse programa foi em função dos fatores já citados, dentre eles as funções ou ferramentas disponíveis no programa permitiram realizar todos os modelos necessários à pesquisa.

Para o cadastramento dos dados de sondagem o *RockWorks* 15 permite a seguinte sequência:

1. Locação dos furos de sondagem (Figura 3.59). Um procedimento simples que requer o nome da sondagem, as coordenadas Leste e Norte (x,y) e a cota da boca do furo de sondagem (coordenada z), além da profundidade total atingida pela sondagem (*total depth*). Caso seja necessário pode-se adicionar um símbolo que irá representar as sondagens nas cartas bidimensionais geradas.

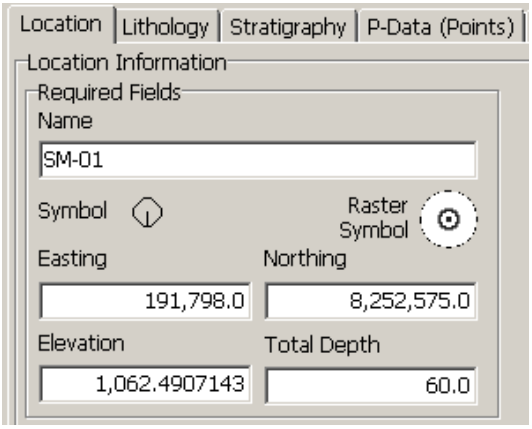


Figura 3.59 – Locação dos furos de sondagem no *RockWorks* 15.

2. Após a locação dos furos de sondagem pode-se realizar o cadastro do perfil de solo na aba *Stratigraphy* (estratigrafia). Contudo, é de primordial importância avaliar todas as sondagens e estabelecer qual será o perfil de solo a ser usado pelo modelo, procedimento esse que pode ser bastante complexo em virtude da variabilidade do solo (pode ser bastante variável ou não), em alguns casos torna-se inviável realizar o modelo estratigráfico em função dessa variabilidade. O procedimento após definido o perfil de solo no programa é estabelecer as cotas de topo e base de cada camada de solo/rocha em cada furo de sondagem realizada no terreno, este procedimento requer em alguns casos pequenos ajustes na descrição das camadas de solo provenientes dos relatórios de sondagem (Figura 3.60).

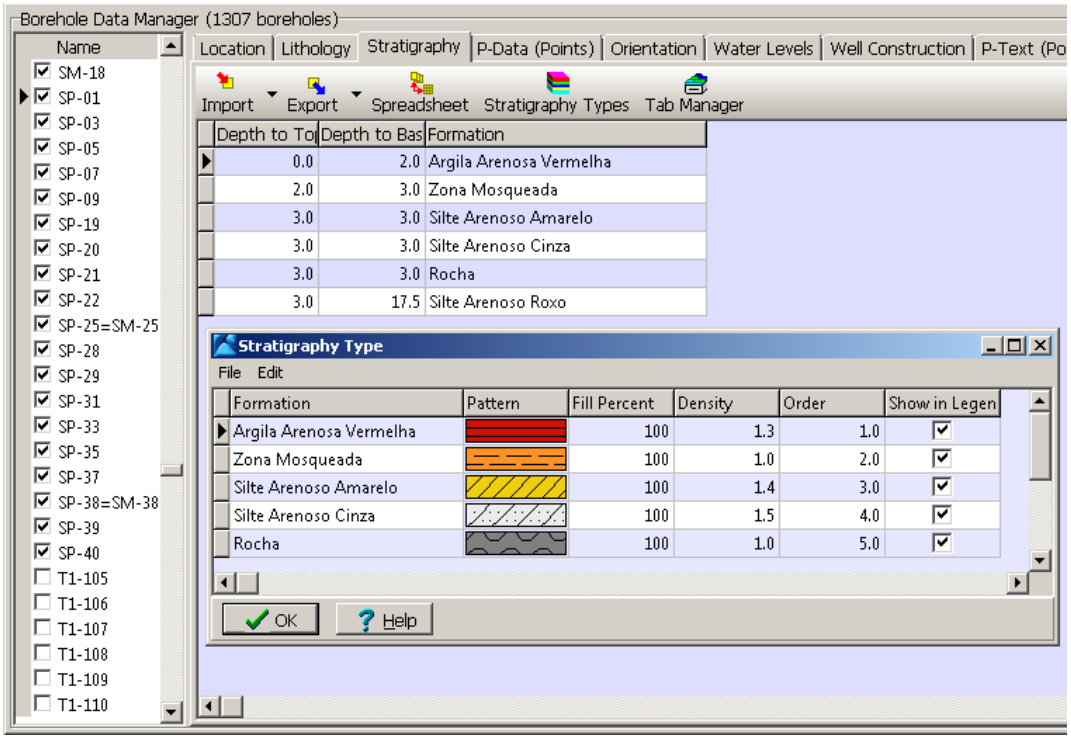


Figura 3.60 – Descrição das camadas de solo/rocha em cada furo de sondagem no *RockWorks* 15.

Pode-se observar ainda que o *RockWorks* 15 permite que se estabeleça a ordem (genérica) das camadas, bastante importante para realização dos modelos 3D de estratigrafia, pois o programa procura obedecer a ordem das camadas. Durante a modelagem estratigráfica o programa pode não seguir completamente a ordem das camadas previamente estabelecidas, em função do trabalho de interpolação que o *RockWorks* 15 faz e em função do tipo de interpolador escolhido, contudo, a ordem pode ser fielmente seguida pelo programa, de acordo com a necessidade, onde pode-se forçar o programa a seguir tal ordem das camadas, este procedimento é descrito no programa como *Onlap*, ver Figura 3.61.

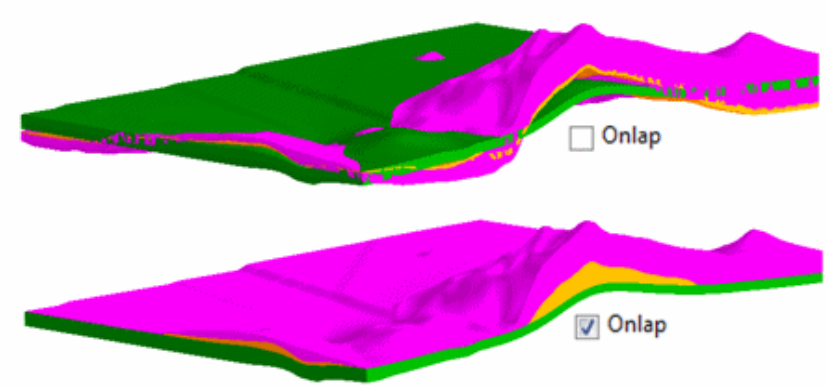


Figura 3.61 – Função *Onlap* no *RockWorks* 15 força o programa a seguir a ordem das camadas estratigráficas.

3. Descrição de valores pontuais numérico. Trata-se de inserir os valores numéricos descritos nas sondagens, que podem ser os valores de Nspt ou até mesmo os valores de grau de recuperação da rocha (%), ver Figura 3.62. Nesta etapa, foi utilizado para os modelos de Nspt valores até 60 golpes, mesmo os que ultrapassaram 60 golpes foram limitados para 60, a explicação é simples, pois caso sejam utilizados os valores tal qual estão descritos nas sondagens, os modelos podem não apresentar contraste de valores. O caso de sondagens mistas é um bom exemplo em que se deve adotar este tipo de solução, pois nas sondagens mistas o normal é que se recuperem, em alguns trechos das sondagens, fragmentos de rocha (o que gera Nspt acima de 60 golpes facilmente), forçando a adoção de alguma solução para descrever os valores de Nspt para que não haja descontinuidade na descrição desse parâmetro até o fim da sondagem.

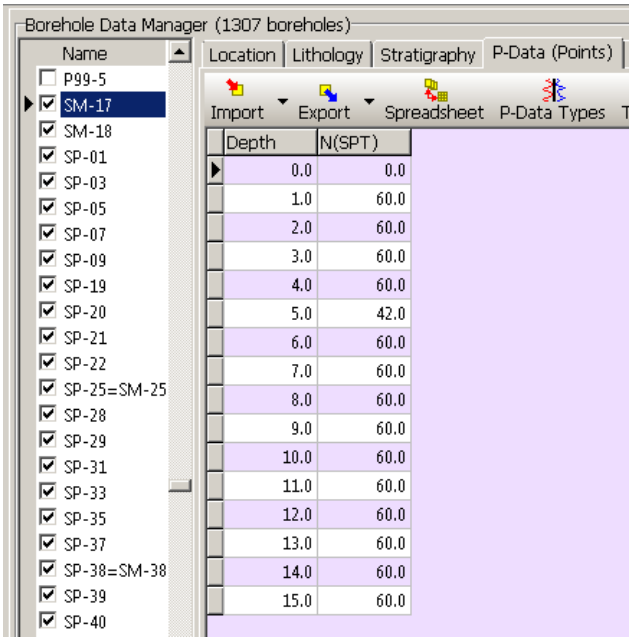


Figura 3.62 – Descrição de valores pontuais numéricos das sondagens no *RockWorks* 15.

Não é novidade para muitas modelagens o processo de exclusão ou estabelecimento de limites de valores pontuais observados em campo. Como o caso dos modelos de eletrorresistividade que podem usar a opção de excluir os chamados *bad points* dos valores obtidos em campo antes da modelagem definitiva das seções de resistividade elétrica, este procedimento é uma forma de ampliar o contraste entre os valores obtidos e modelados posteriormente.

3.10.2- DEFINIÇÃO DE UMA GRADE 3D

Após a importação ou cadastrado das sondagens diretamente no *RockWorks* 15, deve-se estabelecer os limites do projeto, um cubo envolvente para o projeto (Figura 3.63),. Na maior parte dos casos o usuário pode deixar ao encargo do próprio programa estabelecer os limites, clicando no ícone *Scan All Boreholes* ou *Scan Enabled Boreholes* e o programa estabelecerá automaticamente os limites. Os valores máximos e mínimos assim como o espaçamento dos *voxels* (conceito de *pixel* em três dimensões) do cubo envolvente podem ser ajustados pelo usuário a qualquer instante que desejar.

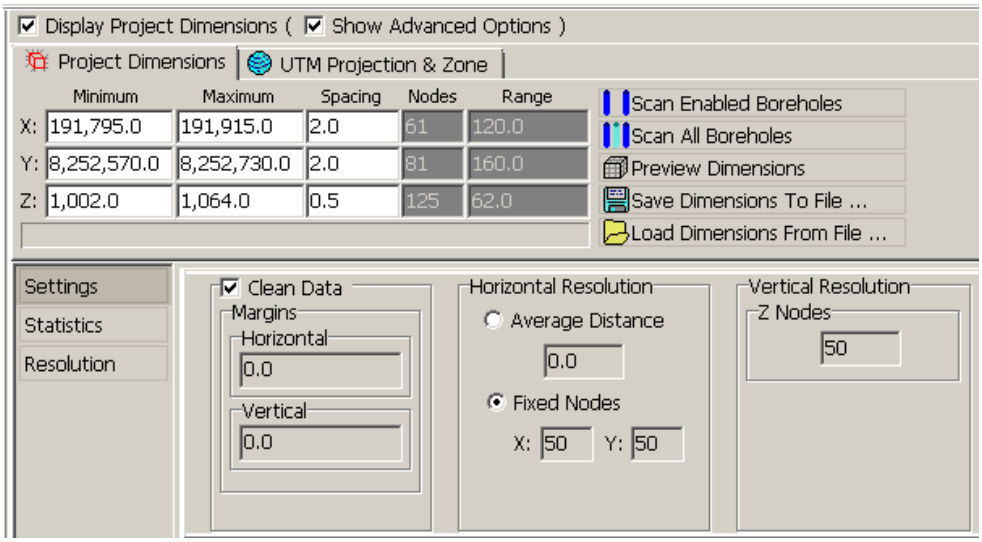


Figura 3.63 – Geração da grade 3D no programa computacional *RockWorks* 15.

3.10.3- NÍVEL D'ÁGUA, EDIFICAÇÕES 3D E ESCOLHA DOS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO NO ROCKWORKS 15

A descrição de nível d'água merece descrição à parte. Ao observar a Figura 3.64 o cadastro do nível d'água leva em consideração o fator tempo, ou seja, o *RockWorks* 15 leva em consideração a data de medição do nível d'água, além das profundidades de topo e base (topo para época em que o nível d'água está mais elevado e base para época em que o nível d'água está mais profundo), que podem estar associadas ao período de chuvas e período de estiagem. A descrição do fator tempo pode posteriormente servir para modelagem volumétrica do lençol

freático em diversas épocas do ano, de maneira que se pode avaliar o comportamento, em termos de variação de profundidade do lençol freático, ao longo do ano.

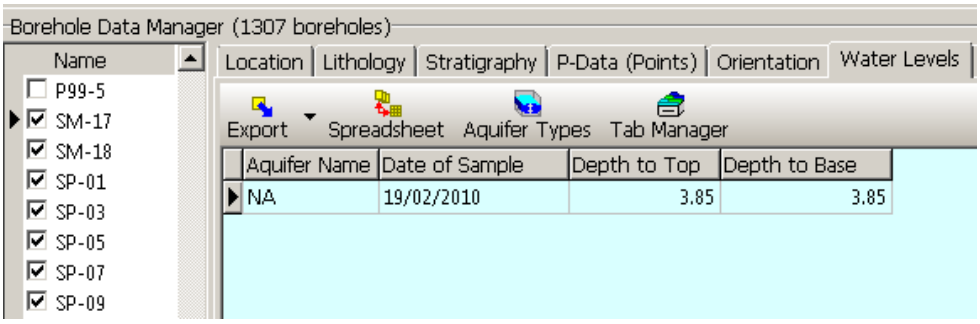


Figura 3.64 – Descrição dos valores de nível d'água no programa computacional *RockWorks* 15.

Caso seja necessário tem-se a opção de espacializar tridimensionalmente as edificações por meio do preenchimento de um arquivo texto (ASCII) de acordo com o manual do programa sugere. O arquivo tem um cabeçalho relativamente simples, o trabalho maior consiste em determinar as coordenadas do(s) edifícios que se pretende espacializar (Figura 3.65). É muito útil para compreensão do modelo a espacialização 3D dos edifícios, muitos profissionais e até mesmo leigos que não tem familiaridade com os modelos 3D conseguem compreender melhor ou se situar melhor quando veem as edificações sobrepostas aos modelos gerados.

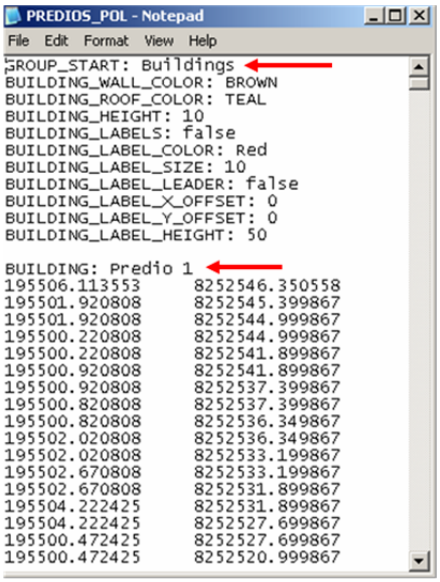


Figura 3.65 – Descrição de arquivo ASCII para modelagem de edificações em 3D no *RockWorks* 15.

Outra fase do processo é a escolha do interpolador. A Figura 3.66 mostra a janela de escolha dos interpoladores no *RockWorks* 15. Dentre eles os mais conhecidos que são o IDW (*Inverse Distance Weight*) e a krigeagem (interpolador geoestatístico). É comum que se faça mais de um modelo, com mais de um interpolador para comparar resultados e determinar qual o

melhor caminho a ser seguido. Pode-se ainda realizar a modelagem com uso de interpolador hídrido, ou seja, escolhem-se dois ou mais interpoladores para a mesma modelagem. Vale lembrar que modelos que envolvem dados apenas numéricos, como é o caso do valor Nspt, o *RockWorks* 15 não deixa disponível o interpolador krigagem.

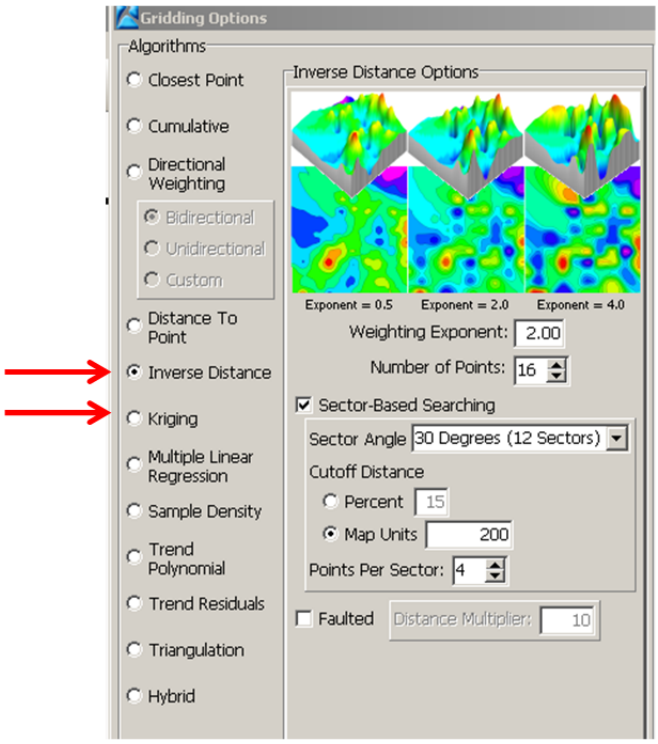


Figura 3.66 – Escolha do tipo de interpolador para modelagem no *RockWorks* 15.

Além disso, o programa permite uma série de ajustes nos interpoladores. Existe uma opção disponível para todos os interpoladores, considerado um ajuste muito importante que pode e em muitos casos deve ser utilizado, é a opção conhecida como alta fidelidade dos dados, denominado no programa de *Hight Fidelity*. Esta ferramenta força a todos os interpoladores a serem fieis aos dados inseridos no banco de dados, por exemplo, o interpolador geoestatístico, quando acionada essa ferramenta, deve por obrigação passar seus resultados pelos pontos descritos nas sondagens, o que torna o resultado obtido na sondagem um verdadeiro ponto de controle para os modelos (Figura 3.67).

Uma premissa adotada por esta pesquisa é que os resultados obtidos nas sondagens são considerados "a realidade de campo", de forma que um interpolador qualquer utilizado não pode ignorar essa premissa e passar seus resultados fora desses dados. Esse fato é comum em muitos processos de interpolação em função do processo de suavização de dados aplicado por muitos deles e que em muitos casos é ignorado ou negligenciado pelo usuário e pode ser considerado um erro grave de modelagem. Se uma interpolação não é capaz de gerar um

modelo que passa (ou que se ajusta) pelos dados fornecidos o modelo não pode ser considerado correto, pois está fora da "realidade de campo".

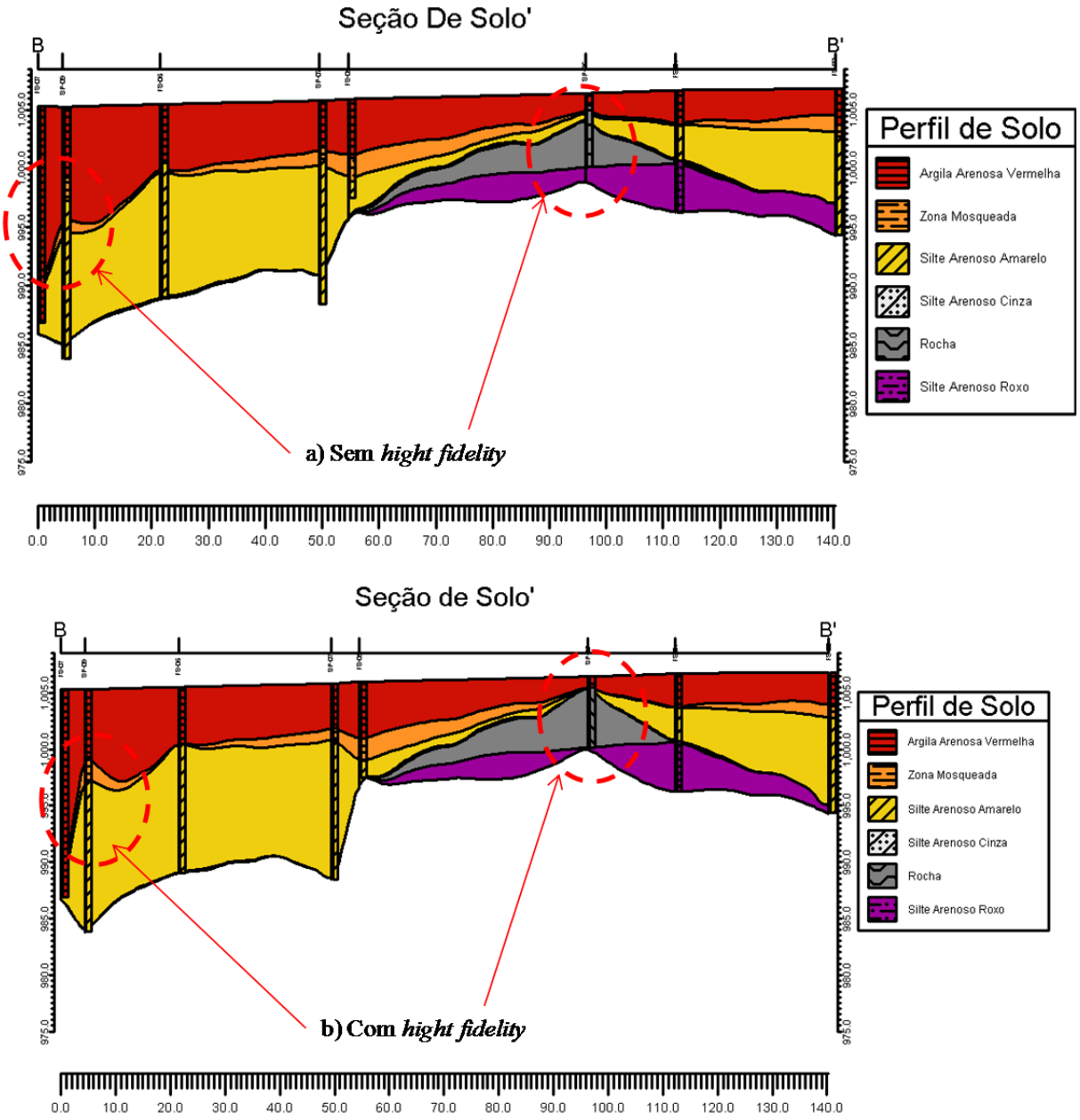


Figura 3.67 – Efeito do ajuste *hight fidelity* no interpolador para modelagem no *RockWorks* 15, a) Sem *hight fidelity*; b) Com *hight fidelity*.

3.10.4- MODELAGEM 3D DE DADOS GEOFÍSICOS

Após o processamento dos dados geofísicos os valores de cada processamento são exportados em formato de coluna de texto simples (ASCII) e importados para o *Rockworks* 15 para uma planilha de dados. Eventualmente, qualquer valor numérico que se queira espacializar pode ser representado em formato de planilha.

Os dados geofísicos normalmente geram uma grande quantidade de dados, ou seja, uma linha sísmica ou de eletrorresistividade gera uma grande quantidade de pontos após o processamento (inversão), o que inviabiliza o cadastro de cada ponto para posterior modelagem. De forma que a disponibilidade de uma planilha de dados dentro do programa *RockWorks* 15 é de fato bastante útil para esse tipo de modelagem. A Figura 3.68 mostra um exemplo de dados de eletrorresistividade dispostos na planilha do *RockWorks* 15, para se ter ideia da quantidade de pontos, nessa planilha estão dispostos 7.908 pontos de eletrorresistividade. A forma de representação é bem simples, basta inserir na planilha o valor de coordenada leste, o valor de coordenada norte, a cota Z de cada ponto e o valor de resistividade elétrica em Ohm.m para cada ponto.

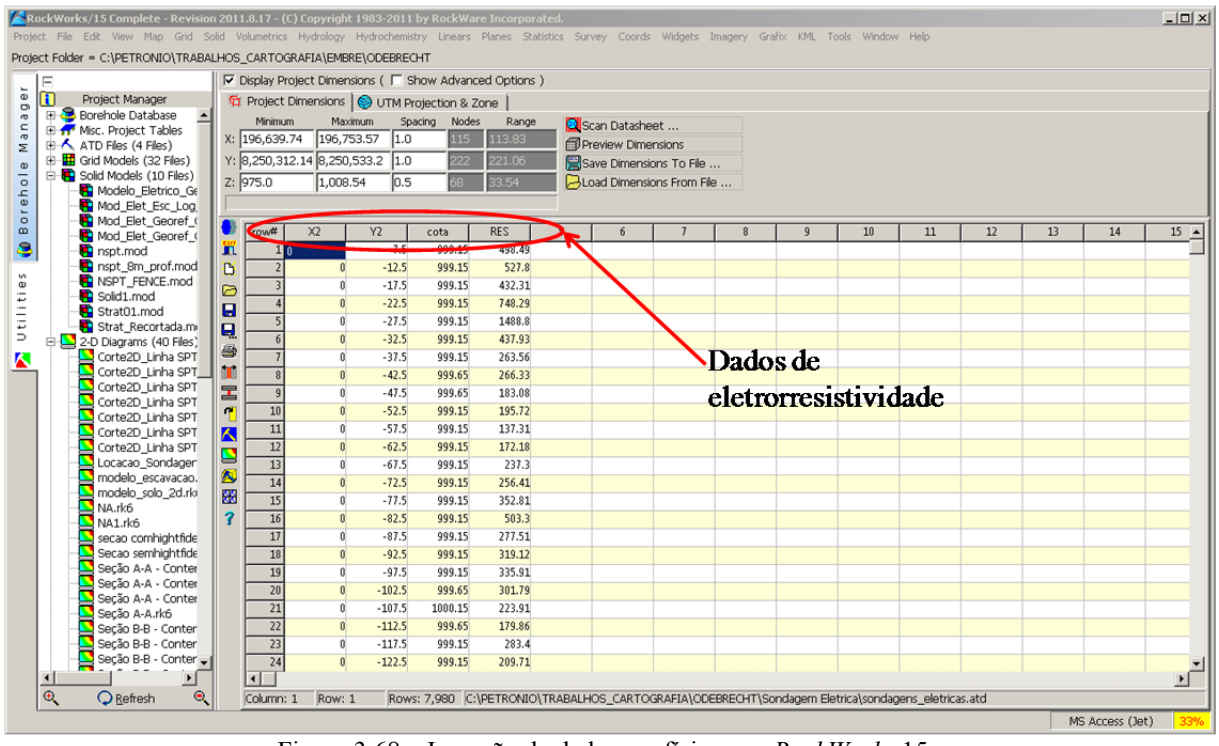


Figura 3.68 – Inserção de dados geofísicos no *RockWorks* 15.

Após a inserção dos dados geofísicos realiza-se o procedimento de modelagem tridimensional do mesmo. É importante que nesta etapa os limites do modelo sejam os mesmos limites adotados durante a modelagem dos dados geotécnicos (dados de sondagem mecânica) ou vice-versa, para que seja possível realizar os procedimentos de sobreposição de modelos ou para que se possa recortar, caso seja necessário, algum volume excedente. Normalmente recorta-se a parte superior dos modelos baseado na topografia do terreno e a parte inferior baseado nos limites das sondagens mecânicas.

4- RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados provenientes dos estudos de caso e do setor noroeste de Brasília. Cada modelo, fatiamento, seção vertical ou horizontal foi concebido para atender aos problemas enfrentados em cada um dos estudos da pesquisa.

Via de regra não houve uma maneira formatada de apresentar os resultados, apesar de a pesquisa buscar uma maneira de padronizar pelo menos alguns deles em todos os estudos, como por exemplo, as cartas de locação de sondagens, mapa de locação das linhas geofísicas e mapas como o hipsométrico em razão da apresentação da topografia do terreno.

Com os dados obtidos em campo e com a possibilidade de geração de modelos, seções, fatiamentos, cartas, entre outros produtos resultantes do trabalho de processamento e interpretação dos dados obtidos em campo, no geral, todos os produtos foram realizados para atender as especificidades de cada estudo realizado.

4.1- BREVE DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO DISTRITO FEDERAL

As características físicas da área do território do Distrito Federal têm sido abordadas desde longas datas. Almeida (1968) e Ab' Saber (1968) realizaram uma síntese importante das principais características físicas do Brasil envolvendo, ainda que de forma indireta, os traços fundamentais das características fisiográficas da área. Os relatos de viajantes e de naturalistas fornecem importantes informações gerais, porém assistemáticas, sobre a geologia e a geomorfologia da área. Dados e informações mais sistematizadas são encontradas em dois importantes relatos técnicos sobre a área: os relatórios Cruls e Belcher. O Relatório Belcher foi publicado em 1954 pelo Serviço de Documentação do Departamento Administrativo do Serviço Público (Dasp); o relatório Cruls, em 1894. Devido à importância histórica desses documentos a Companhia de Desenvolvimento do Distrito Federal – Codeplan - os vem publicando em edições sucessivas (Codeplan, 1995a, 1995b).

A decisão da transferência efetiva da Capital da República Brasileira para o Planalto Central imprimiu a aceleração da produção de dados e informações que interessam a presente pesquisa. Assim a fundação de Brasília e a consequente institucionalização e consolidação da Universidade de Brasília, constituíram momentos fundamentais indutores da acumulação de dados e da produção de conhecimento sobre a área. Parada (1961) e Barbosa *et al.* (1966, 1969) realizaram as primeiras abordagens sistemáticas envolvendo o território sob análise.

Seguem-se lhes diversos outros autores onde diferentes graus de contribuição ao conhecimento da área são apresentados. Sob o ponto de vista geral devem-se considerar os estudos de Fernandes *et al.* (1982), Codeplan (1984), Faria (1995), Aguiar (1997), Silva & Campos (1998), Lacerda Filho *et al.* (2004), Lemos (2004), Moreira *et al.* (2008). Além desses estudos genéricos existem muitas abordagens sobre aspectos geológicos e geotécnicos específicos disponíveis nos arquivos do Instituto de Geociências e do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.

Verifica-se que o conhecimento do arcabouço geológico fundamental da área evoluiu desde a simples noção descritas no relatório Crulz de 1895 como de um conjunto de "grez, schisto argilloso e calcareo" sobrepostos ao "complexo fundamental dos schistos crystallinos" (Cruls, 1987), ou mesmo da ideia de um substrato ígneo e metamórfico sobreposto por rochas sedimentares quartzíticas, argilosas e carbonatadas do histórico Relatório Belcher de 1954 (Codeplan, 1984), à moderna concepção na qual os elementos fundamentais da geologia da região integram a Província Tocantins (Almeida *et al.*, 1977). Este conceito geotectônico global compreende a auto-organização diacrônica de três grandes cinturões metamórficos em domínios da Plataforma Sul-Americana: as faixas Paraguaia (Almeida, 1946, 1964, 1965), Araguaia (Hasui, Abreu & Silva, 1977) e Brasília (Almeida, 1967a, 1967b; Marini *et al.*, 1981).

A Província se situa entre os *cratons* Amazônico (Almeida *et al.,* 1976) e São Francisco (Almeida, 1978) e, a Sul, sofre interferência do *Craton* Paranapanema ou Paraná (Neves *et al.*, 1999, citados por Valeriano *et al.*, 2004). A Faixa Brasília, segundo Marini *et al.*, 1981 é representada por um polígono de forma grosseiramente triangular, dividido por meio da Megaflexura dos Pirineus (Costa & Angeiras, 1971) ou Sintaxe dos Pirineus (Araújo Filho, 2000) em dois segmentos: o segmento setentrional, com orientação geral SW-NE e o meridional, disposto segundo SE-NW. É integrada por um "embasamento" granito-gnáissico metamorfisado, o qual acolheu diferentes sequências vulcanossedimentares e faixas de "greenstone belts".

Este substrato de complexa evolução geotectônica suportou, diacronicamente, depósitos sedimentares e rochas vulcânicas as quais, submetidas a diferentes graus de metamorfismo, constituem os conjuntos litoestratigráficos denominados grupos Araxá (Barbosa, 1955, 1963), Canastra (Barbosa, 1955, 1963), Paranoá (Barbosa, 1963, Dardenne, 1978) e Bambuí (Riman,

1917, citado por Dardenne, 1978). Estes grupos admitem várias subdivisões, conformando formações ou outras unidades litoestratigráficas de hierarquia inferior.

À área objeto da presente investigação interessam, fundamentalmente, os grupos Paranoá e Canastra e os depósitos aluviais, eluviais, coluviais e tecnogênicos com eles relacionados.

O referencial litoestratigráfico aqui adotado é o ordenamento proposto por Faria (1995) (Figura 4.1), e modificado por Silva & Campos (1999) Figura 4.2. São colunas litoestratigráficas compostas. Nelas o Grupo Paranoá, principal unidade litoestratigráfica da área, é representado por onze unidades litológicas em escala comparável àquela de formação, ora codificadas sob a forma de letras do alfabeto, ora sob a denominação de fácies. Neste último caso o Grupo Paranoá é denominado Sequência Paranoá e os diversos termos litológicos que a compõem são denominados fácies.

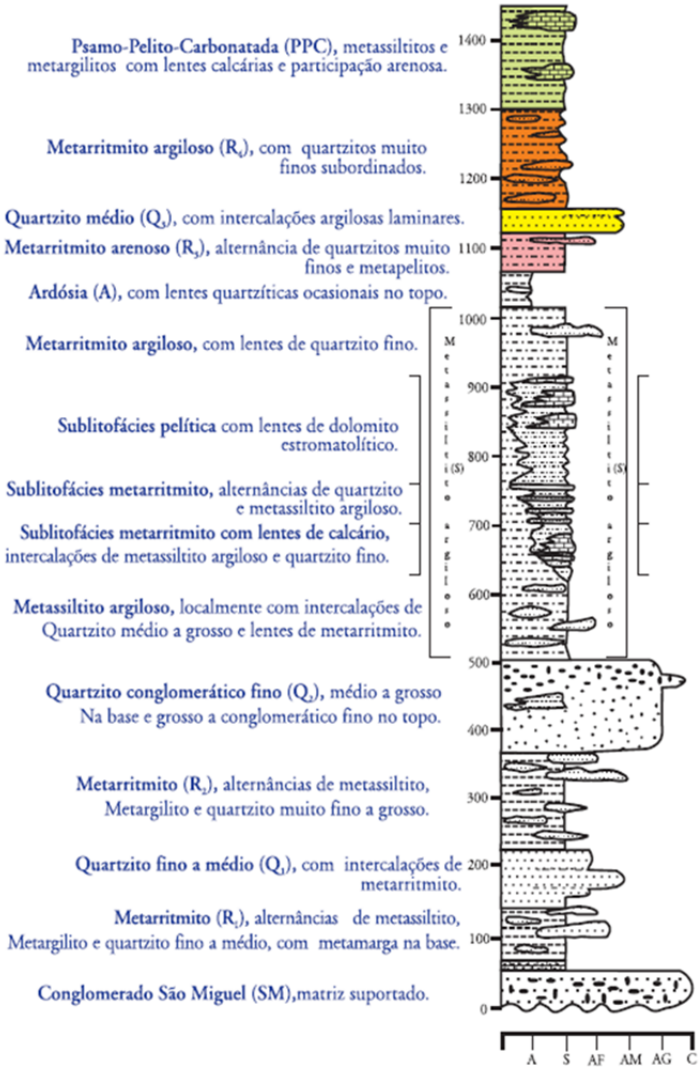


Figura 4.1 – Coluna estratigráfica do Grupo Paranoá, definida na área-tipo de São João d'Aliança – Alto Paraíso de Goiás (Faria, 1995).

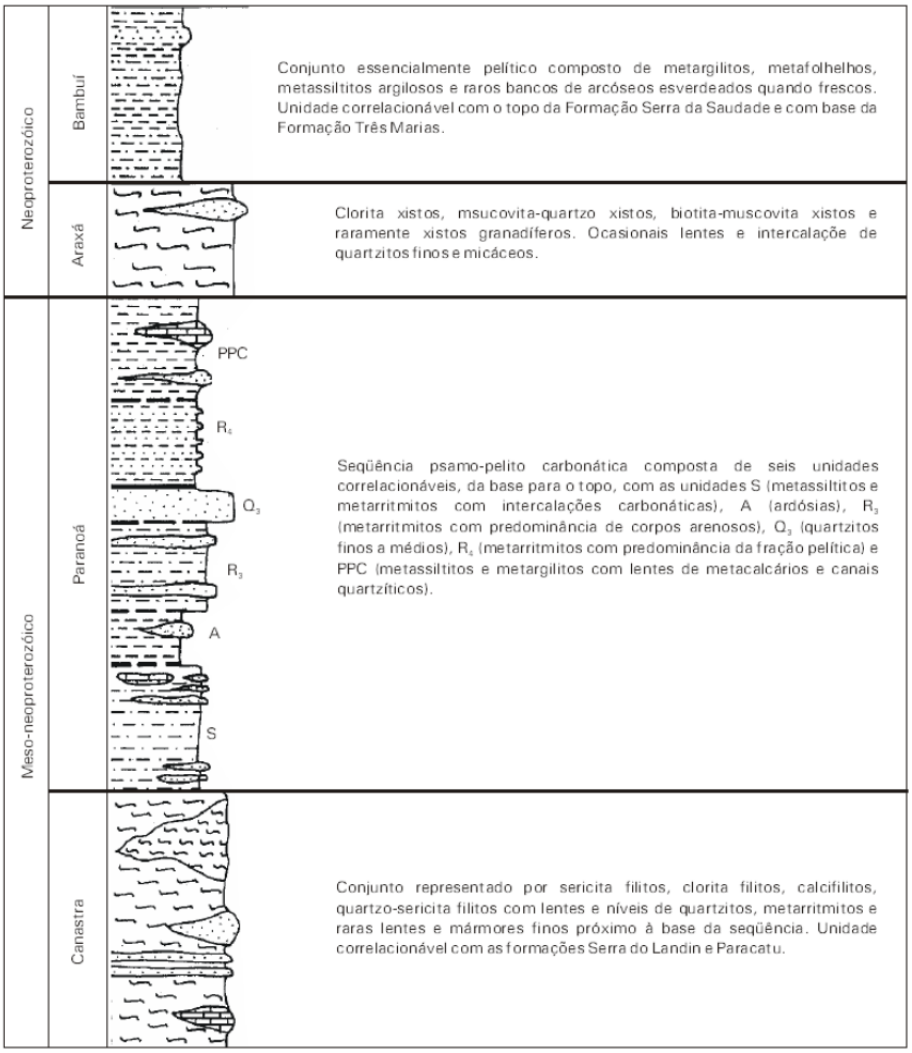


Figura 4.2 – Recomposição litoestratigráfica do DF (Silva & Campos, 1999).

O conceito sequência estratigráfica, formalizado nas últimas décadas representa um conjunto litológico, limitado na base e no topo por discordâncias cuja descrição sumária, da base para o topo, segue:

- Unidade SM (informalmente denominada de conglomerado São Miguel): representada por um paraconglomerado com seixos, calhaus e blocos subangulosos de metassiltitos, quartzo, quartzitos e mármores finos cinzas flutuantes em uma matriz síltico-argilo-carbonatada. O aspecto maciço da rocha dificulta, em alguns casos, a observação da forma e composição dos clastos. A cor cinza esverdeada da rocha fresca passa a tons rosados e avermelhados quando alterada. Esta unidade, embora apresente um grande espalhamento regional, não é contínua e apresenta espessura máxima de 60 metros.

- Unidade R1: apresenta contato concordante com o conglomerado São Miguel e é constituída por uma sucessão de horizontes margosos e metassiltitos argilosos na base passando para um metarritmito com delgadas intercalações de quartzitos finos a médios geralmente feldspáticos. Gretas de contração e pseudomorfos de cubo de sal são freqüentemente observados próximo à base do pacote. Nas áreas-tipo alcança 70 metros de espessura.

- Unidade Q1: é representada por quartzitos finos a médios, brancos, bem estratificados em bancos de 30 a 40 cm e com raras intercalações de horizontes síltico-argilosos no topo e freqüentes estratos cruzados tabulares. Apresenta até 80 metros de espessura.

- Unidade R2: apresenta passagem abrupta a partir do quartzito anterior e uma espessura de até 150 metros, sendo caracterizada por bancos centimétricos de quartzitos finos rosados, intercalados com metassiltitos e níveis milimétricos de lamitos de coloração esbranquiçada. São comuns as laminações cruzadas truncadas por ondas, marcas onduladas assimétricas nos bancos de quartzitos, *quick sand* e estruturas de fluidização.

- Unidade Q2: composta por camadas decimétricas a métricas de quartzitos amarelo-ocres de granulação média a grossa. Em direção ao topo da sucessão são comuns leitos e canais conglomeráticos finos feldspáticos, com grânulos e seixos sub-angulosos a arredondados. As estratificações cruzadas tabulares são comuns e nos níveis conglomeráticos ocorrem estratificações cruzadas reviradas e do tipo espinha de peixe. Sua espessura pode alcançar 150 metros.

- Unidade S: é o pacote que apresenta maior variabilidade, podendo alcançar espessuras superiores a 500 metros. É subdivido em cinco litofácies, sendo um conjunto de metassiltitos esverdeados homogêneos que podem conter intercalações arenosas compondo metarritmitos ou lentes de calcários e dolomitos (estas últimas bastante raras). O topo deste conjunto geralmente é representado por um metarritmito pelítico a arenoso onde bancos decimétricos de quartzitos e metassiltitos intercalam-se aos metassiltitos argilosos.

- Unidade A: apresenta contato transicional a partir da unidade anterior, sendo constituída por ardósias homogêneas de cor cinza esverdeada, que passam a tons vermelhos característicos com a alteração intempérica. Neste conjunto, são observadas duas foliações

penetrativas que representam clivagens ardosianas. Sua espessura é de difícil estimativa em virtude do intenso dobramento, sendo considerada da ordem de 70 metros.

- Unidade R3: corresponde a um metarritmito arenoso, caracterizado por intercalações de bancos decimétricos a métricos de quartzitos e materiais pelíticos (compostos por metassiltitos e ardósias). Localmente são observados pacotes de até 10 metros de espessura que destacam do conjunto rítmico. A espessura total deste conjunto pode alcançar 90 metros.

- Unidade Q3: composta por quartzitos brancos, finos, bastante silicificados, ricos em estratificações cruzadas tabulares, acanaladas e do tipo espinha de peixe, além de marcas onduladas assimétricas. A máxima espessura de 70 metros foi estimada na região de são João D'Aliança.

- Unidade R4: metarritmito argiloso, composto por intercalações de materiais sílticos e argilosos além de delgados estratos de quartzitos finos rosados a avermelhados. Os níveis arenosos apresentam estruturas do tipo laminações cruzadas, laminações truncadas por ondas e *hummockys*. Esta unidade apresenta espessuras variando de 100 a 150 metros.

- Unidade PC: dominantemente pelítica com ardósias cinzas e metassiltitos argilosos associados com lentes de mármores finos que podem conter estruturas algais do tipo estromatólitos colunares e cônicos. São comuns os níveis decimétricos a métricos, lenticulares ou não, de quartzitos médios, grossos e até conglomeráticos, apresentando tonalidades escuras. Sua espessura varia de 120 a 150 metros.

Ao norte da área, no Município de Planaltina de Goiás, ocorrem rochas pertinentes ao Grupo Bambuí (Sequência Pelito-Carbonatada) e à Formação Canastra. Esta sobreposta tectônicamente ao Grupo Paranoá.

Depósitos eluviais estão presentes nas áreas aplanadas, geralmente associados a lateritas concrecionadas, as quais, em certos locais parecem denunciar retrabalhamento.

Os colúvios preferem as partes dos terrenos com maiores declives e, nos domínios dos fundos de vale, se interdigitam ou se sobrepõem às aluviões quaternárias.

O esquema estratigráfico e tectônico formulado por Silva & Campos (1999) (Figura 4.2) para o domínio territorial do Distrito Federal reflete os principais eventos geológicos dos quais a região foi palco. Nele se pode observar que os metamorfitos do Grupo Araxá, mais antigos, foram transportados tectonicamente para cima do Grupo Paranoá, promovendo, desta forma, a inversão local da coluna litoestratigráfica. A pesquisa desses autores detalha os eventos de deformação pelos quais a área passou, revelando a complexidade de sua história. Desta forma a execução de projetos geotécnicos necessita da análise detalhada dos aspectos estratigráficos e estruturais do local, com vista a evitar desperdícios de dinheiro e ou inviabilização de obras.

4.1.1- CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA ÁREA DE ESTUDO

O retângulo que constitui o quadro geoambiental da área de interesse desta tese (Figura 4.3) se inscreve no contexto geral do Grupo Paranoá (Dardenne, 1978) o qual foi submetido a cinco fases de deformação (Silva & Campos, 1999). As fases F3 e F4 ordenaram o padrão de interferência definido por dobras com eixos aproximadamente ortogonais que resultou no sistema de domos e bacias presente na área do Distrito Federal. Os domos de Brasília, Sobradinho e Pipiripau são os testemunhos locais deste magno fenômeno tectônico. Existem debates profundos em relação aos aspectos tectônicos, estratigráficos e sobre o conteúdo litológico pertinente às diversas unidades geológicas presentes na área. Todavia, via de regra, os autores concordam com a abordagem feita a seguir.

O grupo é representado, localmente, da base para o topo, pelas seguintes unidades, conforme designação informal de Faria (1995): Fácies Ardósia (MNPpa), Fácies Metarritmito (MNPpr3), Fácies Quartzito Médio (MNPpq3), Fácies Metarritmito Argiloso (MNPpr4), Latossolos e Lateritas (TQdl) e Depósitos Aluvionares (Qal). Verifica-se desta forma que a distribuição dessas unidades assim como suas conformações estruturais ordenam-se de modo a representarem a metade oriental do Domo de Brasília e também uma pequena fração da porção sudoeste do Domo de Pipiripau, conforme definido por Silva & Campos (1999).

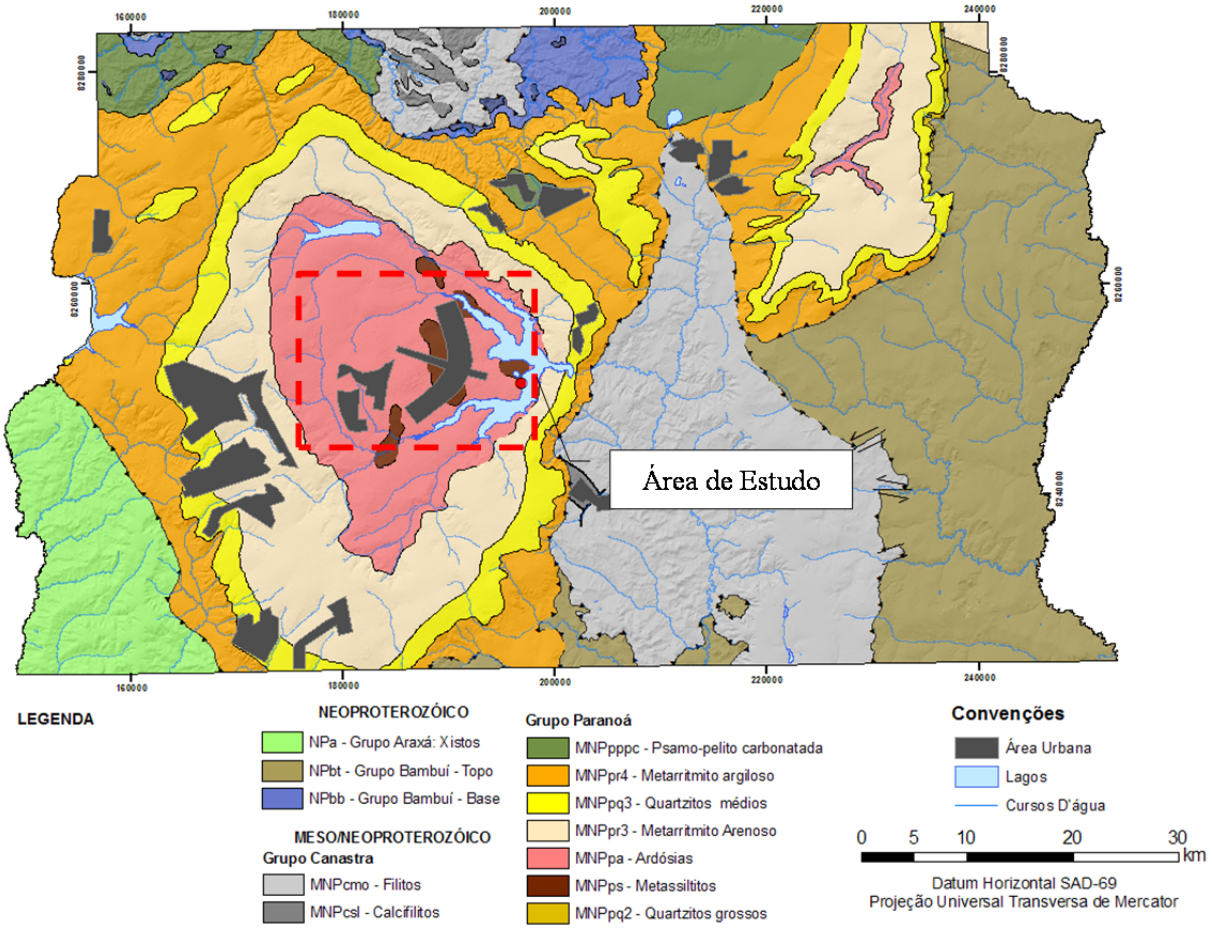


Figura 4.3 – Identificação da área de estudo na carta geológica de Silva & Campos (1999).

4.1.1.1- FÁCIES ARDÓSIA (MNPpa)

Esta unidade ocorre preferencialmente na porção oriental do Domo de Brasília. Descreve um arco aberto no qual o ramo norte, orientado segundo NW-SE, inflete para NE-SW na altura do paralelo da Barragem do Paranoá. A passagem desta fácies para as fácies sotoposta (MNPps) e sobreposta (MNPpr3) é transicional. Esta última relação de contato pode ser analisada na base da Chapada da Contagem, na Estrada Parque de Sobradinho, próximo à Barragem de Santa Maria e junto às obras do Metrô, em Águas Claras (Silva & Campos, 1999). Os termos litológicos são constituídos, basicamente, por ardósias cinza-esverdeadas que se apresentam arroxeadas ou amareladas, conforme a intensidade do intemperismo.

4.1.1.2- FÁCIES METARRITMITO ARENOSO (MNPpr3)

Também disposta na forma de uma faixa em volta ao Domo de Brasília, descreve, na área selecionada para estudo, um arco convexo para oriente, seccionado pelo paralelo da Barragem do Paranoá em dois ramos: o setentrional, disposto segundo NW-SE e o meridional, segundo SW-NE. Esta fácies, tal como a anterior, tem sua continuidade física interrompida pelos

depósitos eluviais, coluviais e aluviais, correlativos dos processos morfogênicos que vêm atuando na área.

A passagem desta fácies para a Fácies Quartzito Médio (MNPpq3) é também transicional e caracteriza-se pelo aumento da frequência das intercalações das camadas de quartzito em relação às de pelitos. Seus termos litológicos principais são os seguintes: quartzitos, metassiltitos, metargilitos interestratificados, com banco de quartzito próximo à base. Gretas de contração e vulcões de areia são estruturas conspícuas.

4.1.1.3- FÁCIES QUARTZITO MÉDIO (MNPpq3)

Esta unidade também envolve o Domo de Brasília. Na área desta tese ela representa uma faixa descontínua, orientada na direção SW-NE, disposta no canto sudeste da área. É composto por quartzito cinza-claro a branco, subarredondado, bem selecionado, contendo marcas onduladas assimétricas. Apresenta estratificação cruzada tabular, acanalada e em espinha-de-peixe, além de lentes de metarritimito. Lâminas sítico-argilosas estão presentes na base.

4.1.1.4- FÁCIES METARRITMITO ARGILOSO (MNPpr4)

Apresenta extensão limitada na área. Conforma um pequeno polígono no extremo nordeste o qual representa uma pequena fração do flanco sudoeste do Domo de Sobradinho. O polígono disposto no extremo sudeste da área corresponde a uma faixa descontínua, orientada segundo SW-NE. A descontinuidade superficial é devida à presente de extensos depósitos eluviais, coluviais e aluviais, relacionados à evolução geomorfológica da paisagem.

No extremo sudeste da área, esta unidade encontra-se sotoposta tectonicamente aos epimetamorfitos do Grupo Canastra, do Proterozóico Médio. Neste local esse tipo litológico integra a magna estrutura denominada Sinclinal do São Bartolomeu. Sob o ponto de vista litológico a fácies é representada por meta-argilitos, metassiltitos, quartzitos e cataclasitos.

4.1.1.5- LATOSSOLOS E LATERITAS (TQdl)

Esta unidade resultou dos processos de evolução geomorfológica da paisagem, a partir do período Terciário. É constituída por depósitos eluviais, coluviais, aluviais e tecnogênicos os quais apresentam diferentes graus de pedogenização e de intemperismo. Esses depósitos têm recebido pouca atenção pelos estudos geológicos clássicos. Esses estudos os têm abordados geralmente sob uma designação informal de Depósitos Detrito-Lateríticos e, desta forma, suas

características estruturais, estratigráficas, sedimentares e mineralógicas têm merecido pouca atenção. Entretanto esses materiais jogam um papel singular no contexto dos estudos geotécnicos, porquanto eles constituem o substrato no qual a espécie humana realiza a maior parte de suas demandas socioeconômicas.

No retângulo de interesse da presente pesquisa esses materiais têm distribuição ubíqua. Ocupam praticamente toda a porção nuclear do Domo de Brasília, cujo eixo leste-oeste favoreceu a instalação do sistema de drenagens que constitui a Bacia Hidrográfica do Rio Paranoá. A este sistema de drenagem são associadas raras planícies aluviais. Dado que esses materiais se auto organizaram somente a partir do período Terciário, o relevo ao qual se associam é frequentemente aplanado, favorecendo os processos pedogenéticos, resultando na formação de extensos sistemas de Latossos e Argissolos. Aos fundos dos vales se relacionam os Neossolos Aluviais, frequentemente pouco pedogenisados. Sob o ponto de vista litológico têm sido descritos Latossolos, colúvios e alúvios, estes limitados aos cursos dos rios meandrantes.

4.2- ESBOÇO GEOMORFOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

A descrição e explicação das formas de relevo de interesse para a área sob investigação têm sido abordadas desde a época dos pesquisadores naturalistas, no século XIX. A necessidade de dados e informações sobre o arcabouço físico e sobre os aspectos sociais e culturais da área na qual seria instituído o Distrito Federal induziu o Poder Público a realizar estudos básicos visando apreender a ordenação dos elementos do meio, segundo sistemas coerentes e lógicos.

Os históricos relatórios da Comissão Cruls de 1895 (Codeplan, 1987) e Belcher de 1954 (Codeplan, 1995) fazem parte do conjunto de esforços iniciais visando conhecer a ordem e a função dos elementos do meio ambiente nos domínios territoriais do Distrito Federal. Durante essas abordagens foram identificadas três superfícies de erosão, denominadas, respectivamente, superfície de primeira, de segunda e de terceira erosão. A primeira, correspondendo ao nível das chapadas, estaria situada entre 1000 e 1100 metros de altitude e representaria uma "antiga peneplanície que foi sobrelevada". A segunda, de menor extensão espacial, estaria estabelecida entre 5 a 25 metros abaixo da "superfície de 1ª erosão". A terceira corresponderia aos vales, sugerindo a existência de uma quarta e quinta superfícies, representadas, respectivamente, por alguns terraços e planícies de inundação no interior de alguns vales. Observa-se que embora as informações referentes às altitudes, produzidas por

estas primeiras abordagens sistemáticas, sejam discrepantes, a ideia de várias superfícies envolvendo o território do Distrito Federal por eles desenvolvida, vem sendo aceita e descrita por diversos autores com diversas denominações.

Uma abordagem criativa sobre o ordenamento dos fatos geomorfológicos da porção sudeste do território brasileiro foi realizada por King (1956). De acordo com este autor o relevo daquela porção do território brasileiro, esculpido a partir do período Terciário, seria constituído por três superfícies de aplanamento fundamentais: Superfície Sul-America, Superfície Velhas e Superfície Paraguaçu. A Superfície Sul-Americana, estabelecida a partir do Terciário Inferior, corresponderia às chapadas que se elevariam sobre os sistemas de vales ou das planícies onduladas. A Superfície Velhas corresponderia ao entalhamento da superfície Sul-Americana pelos sistemas fluviais. Seria representada por uma paisagem ondulada, pedimentada, dissecada por vales do ciclo seguinte, o Ciclo Paraguaçu. Este seria caracterizado essencialmente, pela abertura de gargantas e vales que se estendem ao mar. Esta ordenação dos fatos geomorfológicos tem sido estendida a diversas partes do território brasileiro. Braun (1971) estendeu esta concepção ao território do Distrito Federal.

Esses processos consideram que a esculturação da paisagem depende fundamentalmente da corrosão química. Desta forma os níveis topográficos superiores a 1200 m de altitude e aqueles dispostos entre 1200 e 1100 m, sustentados por quartzitos, de idade Paleogênica, resistiriam diferencialmente aos processos de intemperismo químico, quando comparado aos níveis neogênicos, dispostos entre 1100 e 1000 m, esculpidos em rochas tenras. Este último patamar estaria sendo entalhado pelo sistema de drenagem, a partir do Plioceno-Pleistoceno, promovendo a esculturação do relevo por processos de pedimentação e pediplanação, constituindo, desta forma, os níveis de entalhamentos da paisagem. Levando em consideração as características formológicas, hipsométricas, dos padrões de drenageme dos processos de esculturação, a autora ordenou a paisagem do Distrito Federal em três regiões: a Região de Chapadas, as áreas de dissecação intermediária e a região corrugada de vales fluviais, dividindo essas três feições da paisagem regional em cerca de doze unidades geomorfológicas, conforme dispostas na Figura 4.4.

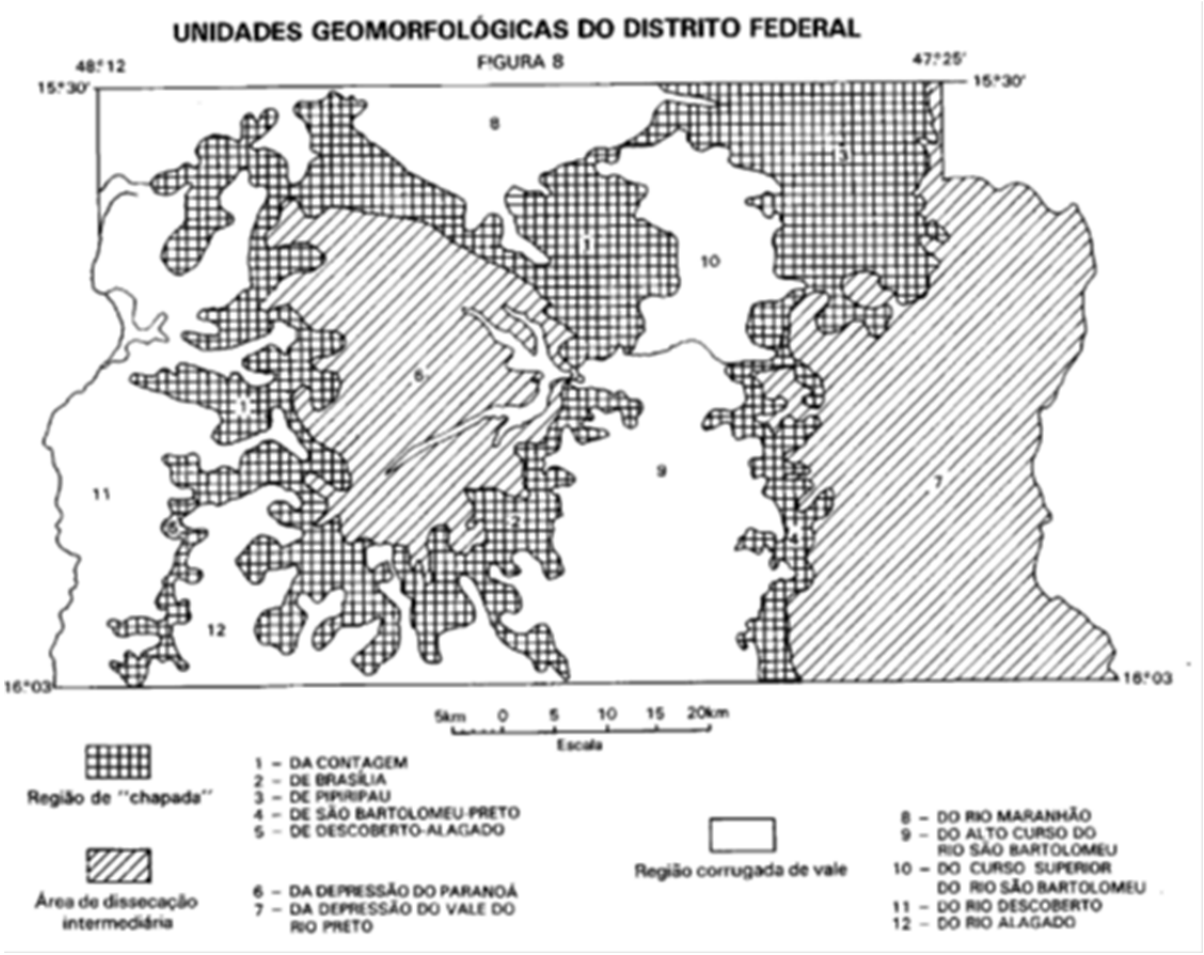


Figura 4.4 – Unidades geomorfológicas do Distrito Federal (Pinto, 1987).

Tomando como base este ordenamento a área da presente pesquisa situa-se, quase inteiramente em domínios da Área de dissecação intermediária, ou, mais especificamente, na Depressão do Paranoá. Caracteriza-se por apresentar relevo relativamente aplanado a suave ondulado, em razão do entalhamento do sistema de drenagem que constituem os alimentadores da Bacia Hidrográfica do Paranoá. Apresentando um padrão tipicamente anelar, esta bacia é constituída por drenagens relativamente pouco entalhadas, com vertentes pouco inclinadas, encobertas por depósitos coluviais e materiais eluviais, os quais inumam rochas predominantemente pelíticas. Entretanto, pontos subordinados apresentam exposições de quartzitos.

Dois anos depois da edição do Relatório Belcher é produzida uma abordagem taxonômica para o relevo da região central e sudeste do país (King, 1956). O estudo, desenvolvido durante dois meses de trabalho de campo, realiza a interpretação paleogeográfica dos domínios do território brasileiro. Demonstra que o atual relevo do país pode ser considerado como resultado de três grandes ciclos de evolução geomorfológica. Estes ciclos foram denominados,

do mais antigo para o mais novo, de Ciclo Sul-Americano, Ciclo das Velhas e Ciclo Paraguaçu.

O Ciclo Sul-Americano seria representado por superfícies relativamente aplanadas, correspondendo às chapadas que se distinguem na paisagem regional. Elas seriam sustentadas por lateritas. O processo de estruturação teria se desenvolvido entre o final do Cretáceo e o início do Mioceno.

O Ciclo das Velhas, do Terciário Inferior, não tem aplanamento generalizado na área de estudo, correspondendo aos vales das drenagens que se instalaram na superfície sulamericana, com inselbergs remanescentes isolados ou em grupos. Resulta uma paisagem ondulada, edificada durante o Terciário Superior. Os depósitos correlativos deste ciclo correspondem ao Grupo Barreiras do nordeste, esplendidamente pedimentados, esculturados pelos vales do Ciclo Paraguaçu.

O Ciclo Paraguaçu é representado pela abertura de gargantas e vales em drenagens menores que demandam o Oceano. Caracterizam o escarpamento magnífico da zona costeira. Duas fases podem ser distinguidas: a primeira é representada por terraços elevados sobre os fundos dos vales atuais, nivelados ou não; a segunda é expressa por saltos e corredeiras. Deste resultaram depósitos como aluviões, dunas e pântanos, quase sempre próximos à costa. Vista sob esta perspectiva, a taxonomia de King simplifica, de certo modo, as superfícies de erosão referidas do Relatório Belcher.

A partir dessas abordagens iniciais muitas pesquisas em escala regional e de detalhe têm sido feitas interessando aos domínios territoriais da pesquisa em foco. Sob o ponto de vista regional há que se destacar o esforço do Projeto RADAMBRASIL na produção de um método e consequentes procedimentos objetivando cartografar o relevo brasileiro na escala 1:1.000.000. Deste esforço resultou um conjunto de dados e informações codificados, multidisciplinarmente, sob os temas geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da Terra. O produto foi materializado em mais de 30 volumes os quais constituem a Série Levantamento de Recursos Naturais. Este projeto, vinculado ao Ministério das Minas e Energia, posteriormente integrado à Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE forneceu um quadro geral da geomorfologia do Brasil e também, da geologia, da pedologia, da vegetação e do uso potencial da Terra, ainda hoje tomados como base em muitos estudos de âmbito regional.

A indução foi tomada como o princípio norteador da construção ordenada dos fatos geomórficos porquanto certos subconjuntos formados por modelados, constituem a base para a identificação das unidades e estas permitem a delimitação das regiões. A união de regiões constitui o domínio, o maior nível taxonômico adotado. Sob esta perspectiva a área objeto desta tese estaria inscrita em partes de domínios de Planaltos em Estruturas Sedimentares Dobradas e de Planaltos em Estruturas Sedimentares Concordantes. O Domínio de Planaltos em Estruturas Sedimentares Dobradas seria representado especificamente pelas unidades de relevo Chapadas do Alto Rio Maranhão, pertencente à Região do Planalto Central, e Chapadas do Distrito Federal, pertencentes à Região do Planalto Goiás/Minas o qual é conteúdo do Domínio de Planaltos em Estruturas Sedimentares Concordantes. Ainda que a expressão Planalto em Estruturas Sedimentares Concordantes seja imprópria, o objeto finalístico da classificação é relevante, porque considera elementos morfo-estruturais.

4.3- BREVE CARACTERIZAÇÃO GEOLOGICA DAS ÁREAS DE ESTUDO

Foi realizado, em cada área abordada pela pesquisa, um breve estudo geológico com intuito de facilitar as análises dos resultados provenientes dos levantamentos geotécnicos e geofísicos, além de facilitar a construção e posterior análise dos resultados provenientes dos modelos tridimensionais desenvolvidos na pesquisa. As características geológicas destas áreas foram descritas de acordo com cada estudo realizado.

4.4- RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO - OBRA "BRISAS DO LAGO"

4.4.1- CONTEXTO GEOLÓGICO DO ESTUDO DE CASO 1 – OBRA "BRISAS DO LAGO"

O relevo local é aplanado, apenas levemente rampeado para Leste, no sentido da lâmina d'água do Lago Paranoá. Em superfície são encontrados blocos métricos de quartzito. É bem estratificado, mostrando subordinados estratos cruzados acanalados. Nos domínios de dissipação das ondas provocadas pelo vento ocorrem depósitos areno-siltosos, resultantes da desagregação dos quartzitos. O local onde foram feitos os ensaios geotécnicos e geofísicos situa-se no denominado Grupo Paranoá, (Figura 4.5). Embora a área de estudo (Plano Piloto de Brasília e arredores) esteja situada onde ocorrem predominantemente as ardósias do Grupo Paranoá na área em específico do projeto, vários testemunhos de sondagem indicaram outra unidade conhecida como metassiltitos (MNPps).

A unidade que representa tais metassiltitos é conhecida como Unidade S (MNPps) que é o pacote que apresenta maior variabilidade, podendo alcançar espessuras em torno de 500 metros. O grupo é subdivido em cinco litofácies, de forma que o conjunto dos metassiltitos é descrito como argilosos, cinza claros, vermelhos a brancos, com intercalações de até 3 m de quartzito, localmente grosso de geometria lenticular. O topo deste conjunto, que por vezes ocorre na área de estudo, geralmente é representado por um metarritmito argiloso a arenoso, onde bancos decimétricos (a métricos neste estudo de caso) de quartzitos e metassiltitos intercalam-se aos metassiltitos argilosos (Faria, 1995).

Na área foram encontrados afloramentos de quartzito o que motivou ainda mais o estudo detalhado da área para que a tomada de decisão com relação à solução de fundação adotada pela obra fosse a mais adequada possível.

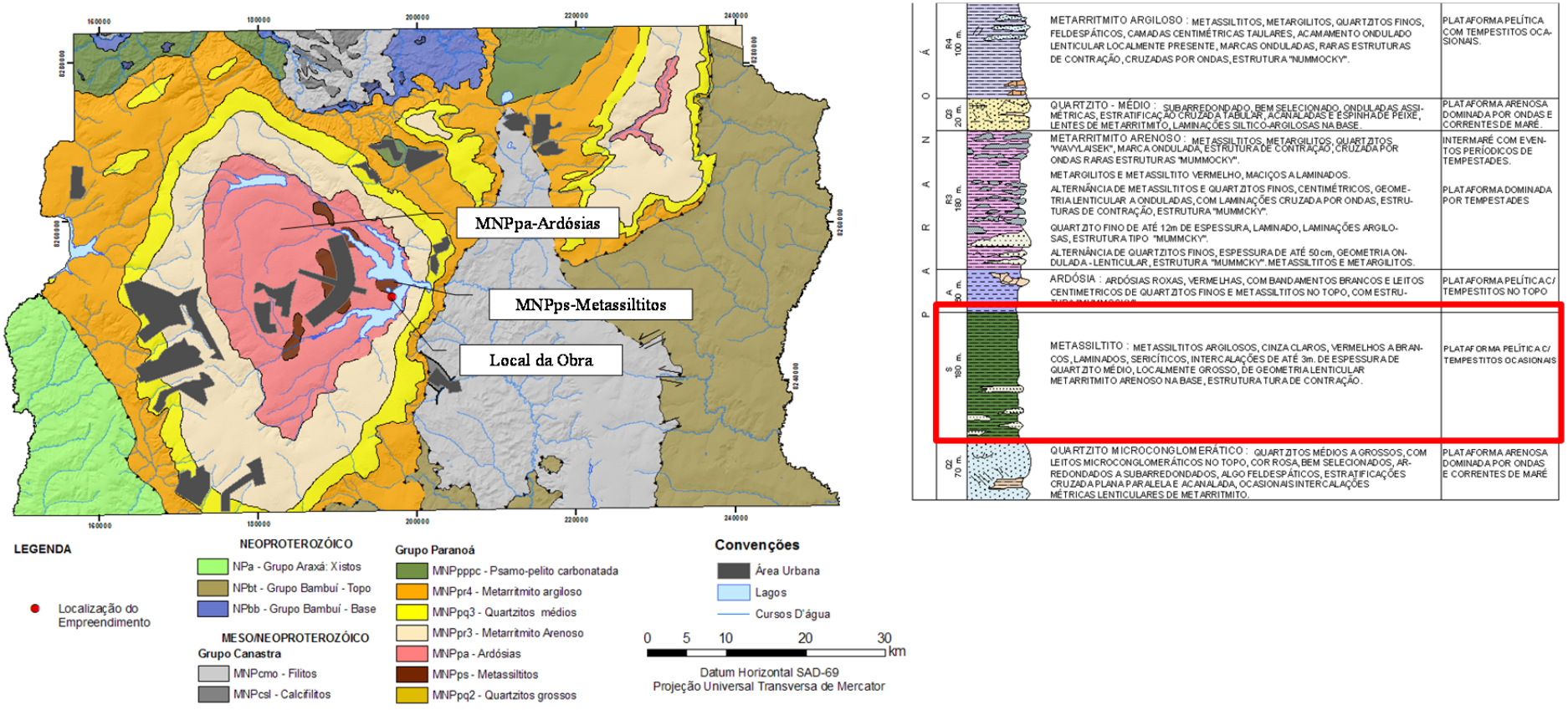


Figura 4.5 – Carta geológica simplificada do Distrito Federal e breve descrição da camada de metassiltito encontrada na obra (modificado de Silva & Campos, 1999).

4.4.2- CARTAS BÁSICAS COM LOCAÇÃO DAS SONDAGENS MECÂNICAS, LOCAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES, LOCAÇÃO DAS ESTACAS DE CONTENÇÃO E HIPSOMETRIA DO TERRENO

O primeiro resultado obtido para este estudo de caso envolve a mescla de três informações básicas que são a locação das sondagens mecânicas, a locação das edificações e a hipsometria do terreno baseada em curvas de nível de metro em metro. Vale lembrar que o projeto está à beira do lago Paranoá.

A Figura 4.6 mostra o primeiro resultado obtido para o estudo de caso em questão. Todo o projeto foi georreferenciado utilizando o sistema de projeção UTM, e a referencia de nível leva em consideração o nível do mar (geoide), é informação pública que o lago Paranoá tem cota aproximada de 1000 m acima do nível do mar. Pode-se observar que o projeto começa com uma cota de apenas 0,50 m acima do nível do lago Paranoá e de acordo com o projeto de escavação a obra deverá ficar com o primeiro piso do subsolo estabelecido na cota 1001,20 m, o que levou a pesquisa a produzir outro resultado importante que é a carta de nível d'água do terreno. A Figura 4.7 mostra outro resultado, apenas para situar o projeto, que é a locação das estacas de contenção da obra para posterior escavação do terreno. As estacas de contenção seguem o limite do terreno.

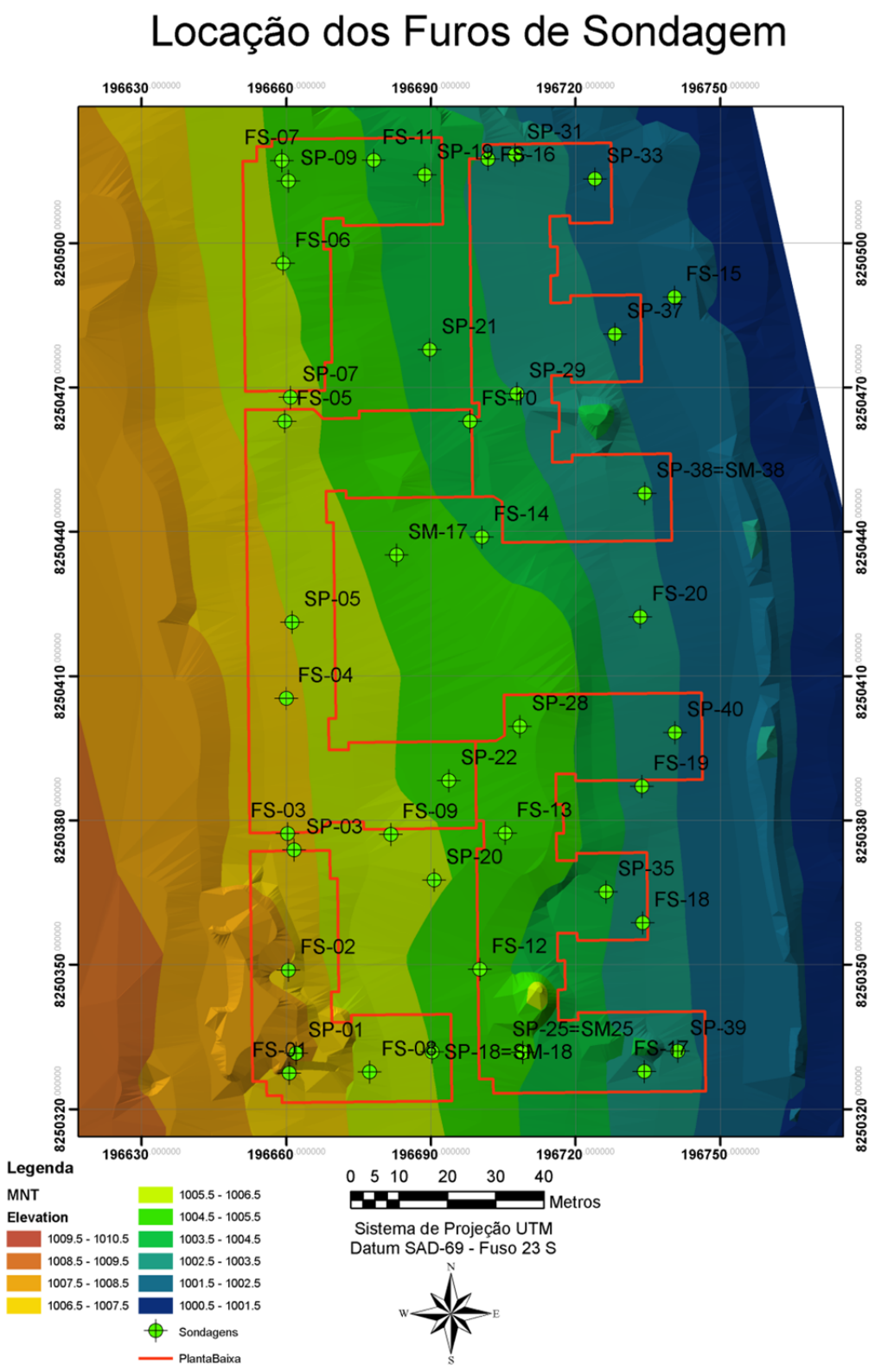


Figura 4.6 – Carta hipsométrica com locação das sondagens mecânicas e locação das edificações do estudo de caso "Brisas do Lago".

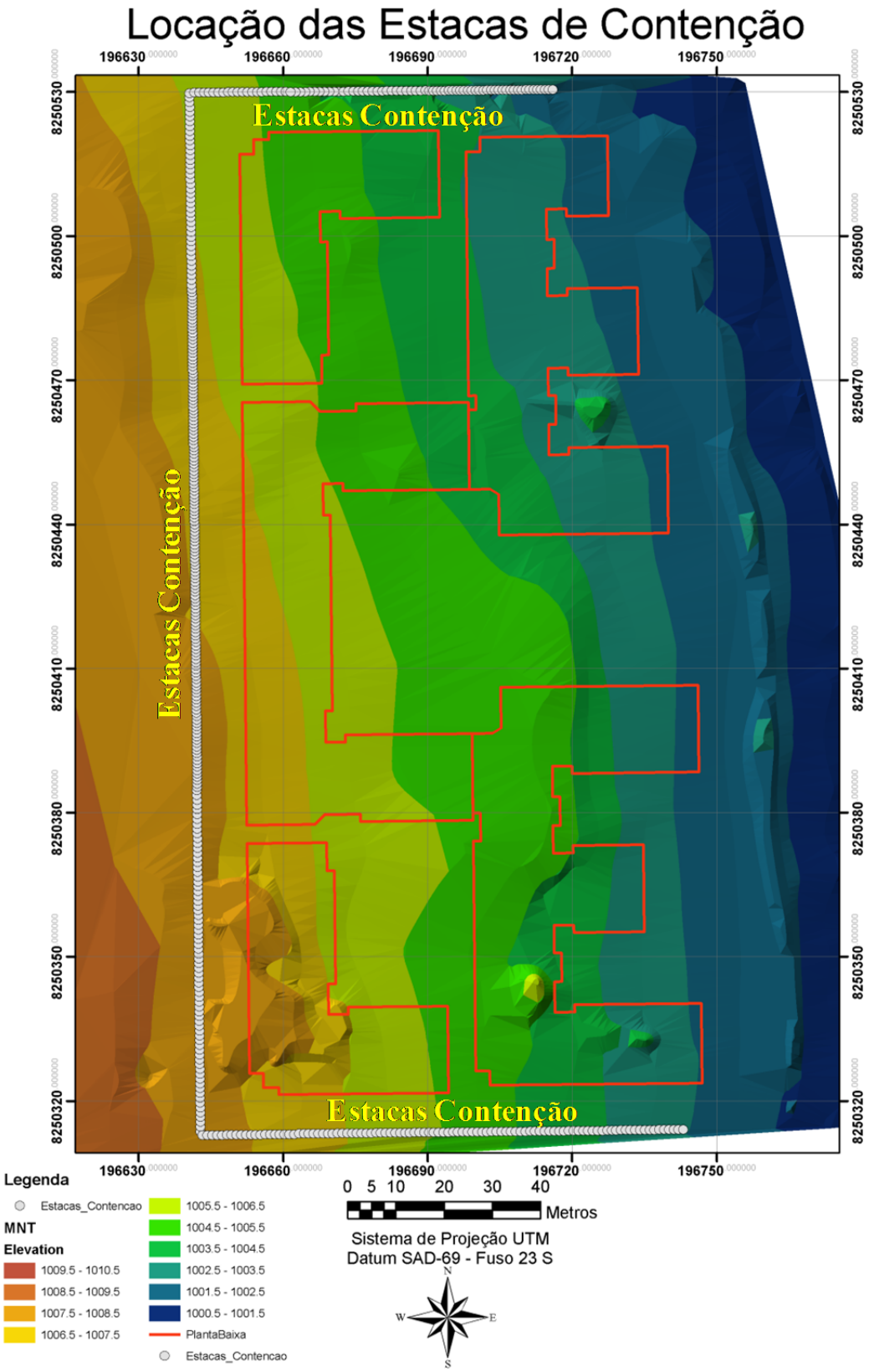


Figura 4.7 – Carta hipsométrica com locação das estacas de contenção e locação das edificações do estudo de caso "Brisas do Lago".

4.4.3- MODELO TRIDIMENSIONAL DE SOLO/ROCHA

Neste estudo de caso foi possível realizar um modelo tridimensional de solo/rocha para a obra. Nem sempre é possível realizar um modelo de solo/rocha para a obra e uma das razões para isto é a variabilidade dos materiais presentes no local, quanto maior a variabilidade mais difícil é construir um modelo tridimensional de solo, solo/rocha ou somente rocha.

A Figura 4.8 mostra o modelo tridimensional de solo/rocha realizado para este estudo de caso. Como referência a praia do lago Paranoá está para o sentido Leste (E) na referida figura. Este modelo possui algumas particularidades a serem observadas, sendo a primeira delas a espacialização das camadas de solo e rocha que foram identificadas nas sondagens mecânicas do tipo mista, após a espacialização das camadas o modelo foi recortado até o nível de escavação na cota 1001,20 m. Após o recorte do modelo, realizou-se a espacialização das edificações, o que facilita bastante o usuário a situar-se no momento de visualizar os modelos.

Com o recorte no modelo de solo/rocha, fez-se a modelagem tridimensional do nível d'água e adicionou-se este resultado no modelo de solo/rocha, conforme pode ser visto na Figura 4.8, de forma que a obra pôde verificar que durante e após a escavação deveria enfrentar problemas com o nível d'água aflorante, e com este resultado em mãos seguiu-se para o estudo de rebaixamento de nível d'água para obra, que foi realizado por uma empresa especializada neste tipo de trabalho.

Obviamente que o rebaixamento da obra para a cota 1001,20 m requereu um projeto de contenção de talude para obra. Esta obra realizou o projeto de contenções baseado nas metodologias já existentes e baseado nos resultados dos modelos tridimensionais, de forma que foram espacializadas todas as estacas das contenções e posteriormente foram realizadas seções verticais nos modelos de Nspt e solo/rocha para otimizar o projeto de contenções, levando em consideração o parâmetro "superfície resistente" comentado na revisão bibliográfica desta pesquisa.

A Figura 4.9 mostra o modelo tridimensional de solo/rocha, com a espacialização dos furos de sondagem da obra e com a espacialização de todas as estacas da contenção. Após a construção desse modelo foram feitas as seções verticais em cada trecho da contenção. Pode-se dizer que os modelos foram determinantes para a etapa de otimização do projeto de contenções.

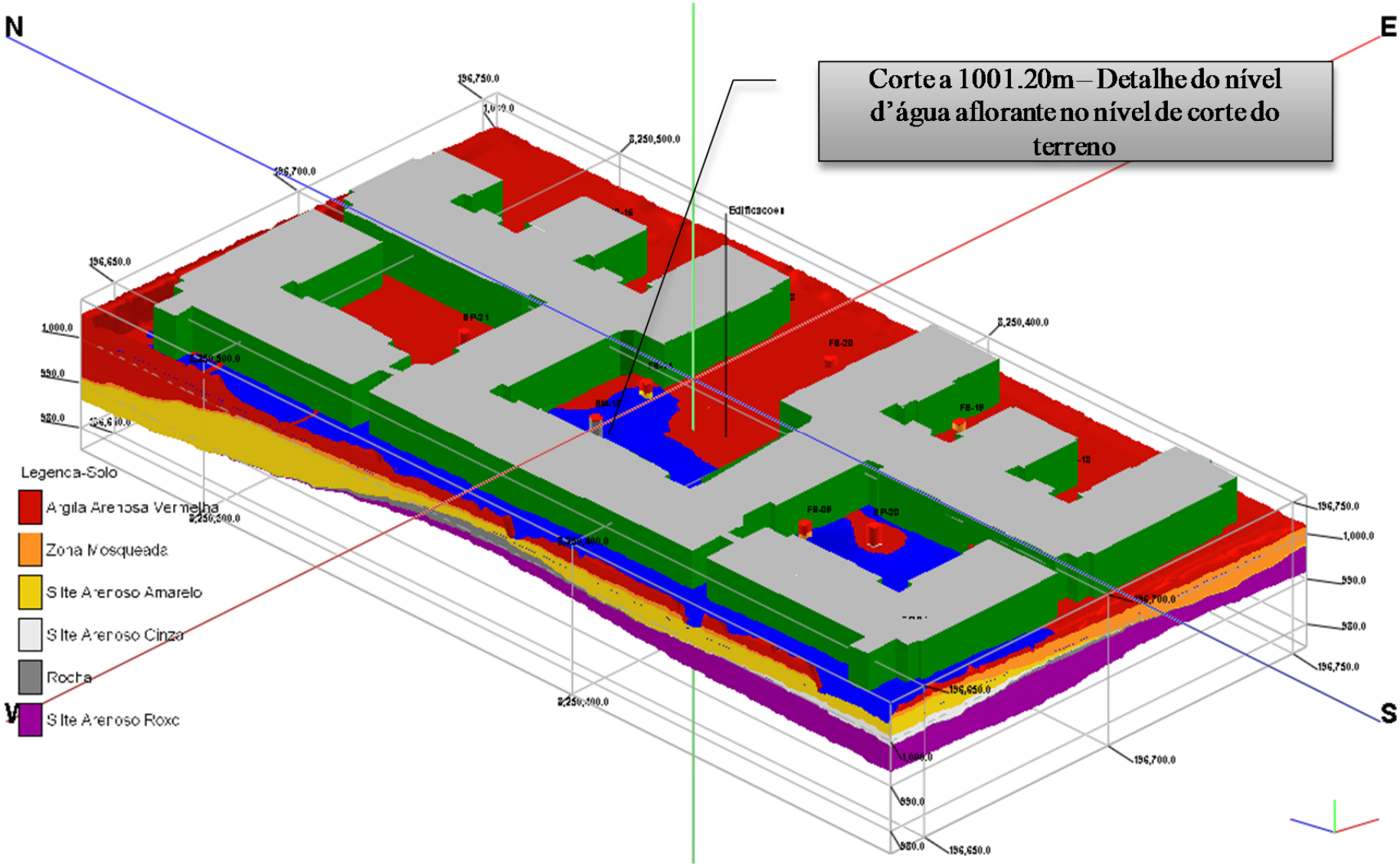


Figura 4.8 – Modelo tridimensional de solo/rocha com espacialização do nível d'água e edificações para o estudo de caso "Brisas do Lago".

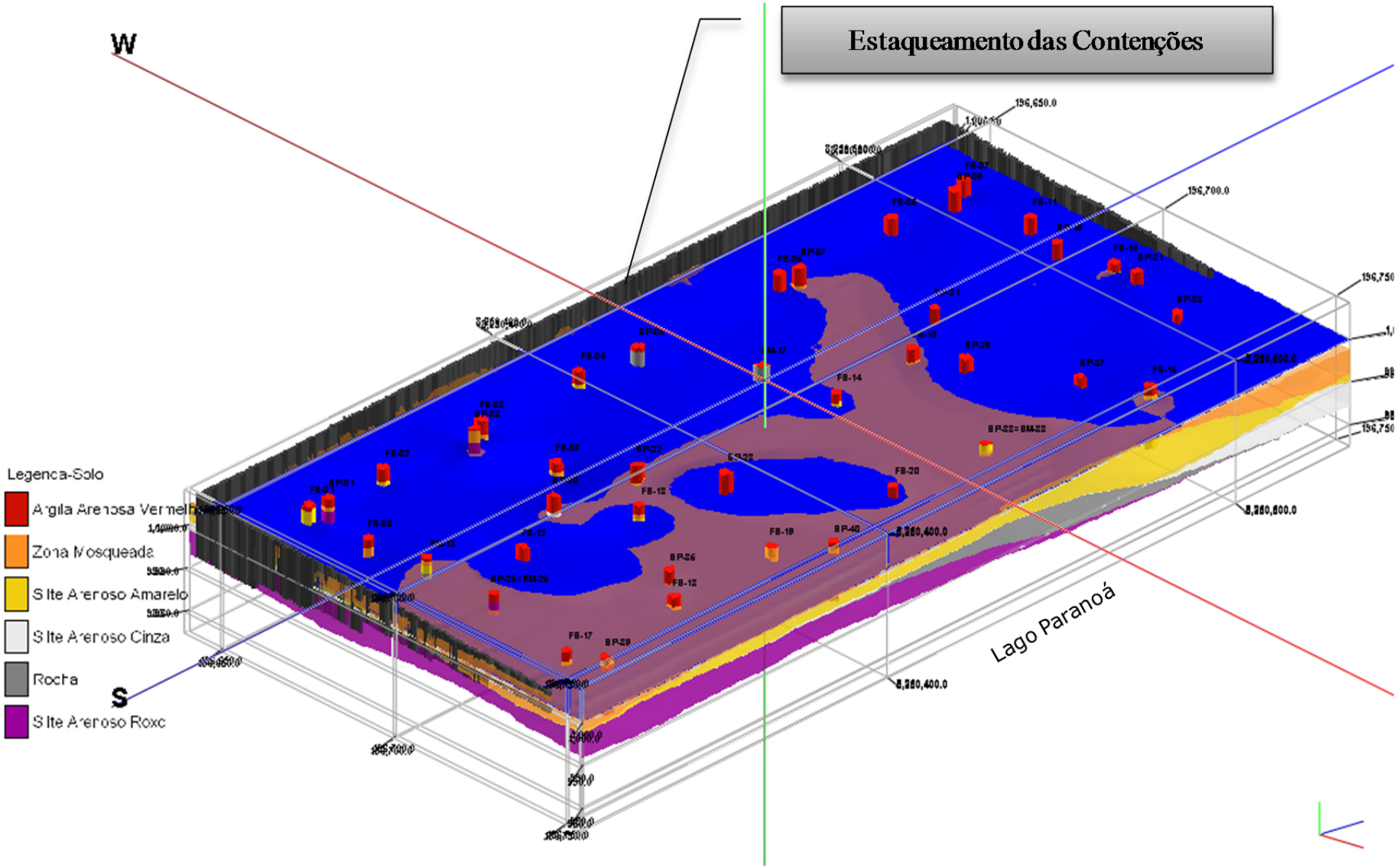


Figura 4.9 – Modelo tridimensional de solo/rocha com espacialização dos furos de sondagens e contenções para o estudo de caso “Brisas do Lago”.

4.4.4- CARTA DE NÍVEL D'ÁGUA

Com a identificação dos problemas com o nível d'água, praticamente aflorante na obra, foi realizado uma carta com as cotas do nível d'água em todo o terreno, de maneira que o mapeamento do nível d'água na obra foi um produto bastante apreciado, pois facilitou as analises de tipo de fundação a ser adotada e o tipo de rebaixamento de lençol freático a ser feito na obra.

A Figura 4.10 mostra a cota do nível d'água na obra, cuja variação é de aproximadamente 2 m com relação à cota 1000 m referente ao nível médio do lago Paranoá. Ou seja, a obra após a escavação prevista para cota de 1001,20 m estará com o nível d'água aflorante em boa parte do terreno, o que levou a obra a adotar uma solução de rebaixamento do lençol freático para realizar as obras de fundação necessárias.

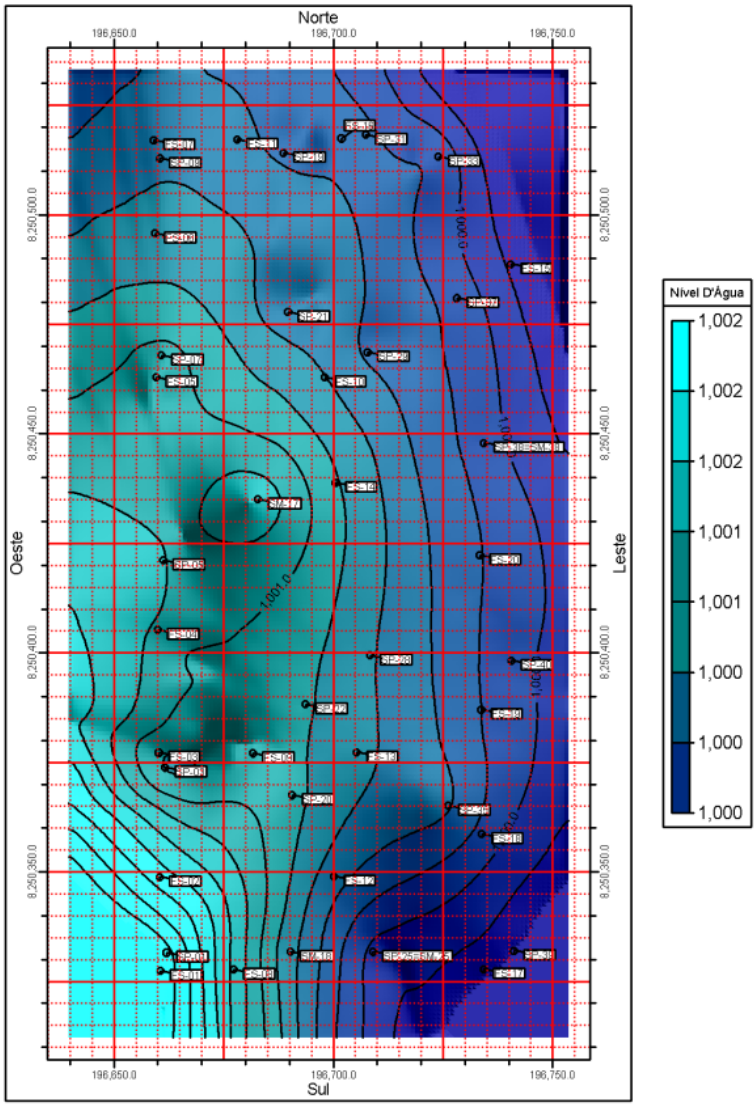


Figura 4.10 – Carta da cota do nível d'água do estudo de caso "Brisas do Lago".

4.4.5- MODELO TRIDIMENSIONAL DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Para os projetistas da obra, o que mais interessava saber eram os locais de ocorrência da rocha (quartzito). O método elétrico empregado foi bastante favorecido com o nível d'água quase que aflorante, o que possibilitou um perfeito mapeamento do sinal elétrico dos materiais, inclusive a rocha quartzito. A Figura 4.11 mostra a quantidade de pontos coletados pelas seções geofísicas realizadas na obra, pode-se observar uma malha densa de pontos. Com os testemunhos de sondagem e com os valores de resistividade elétrica (Ohm.m) pôde-se aferir os valores de resistividade elétrica característicos do quartzito. Com isso, ficou estabelecido que valores acima de 5.000 Ohm.m seriam os valores característicos dessa rocha neste caso.

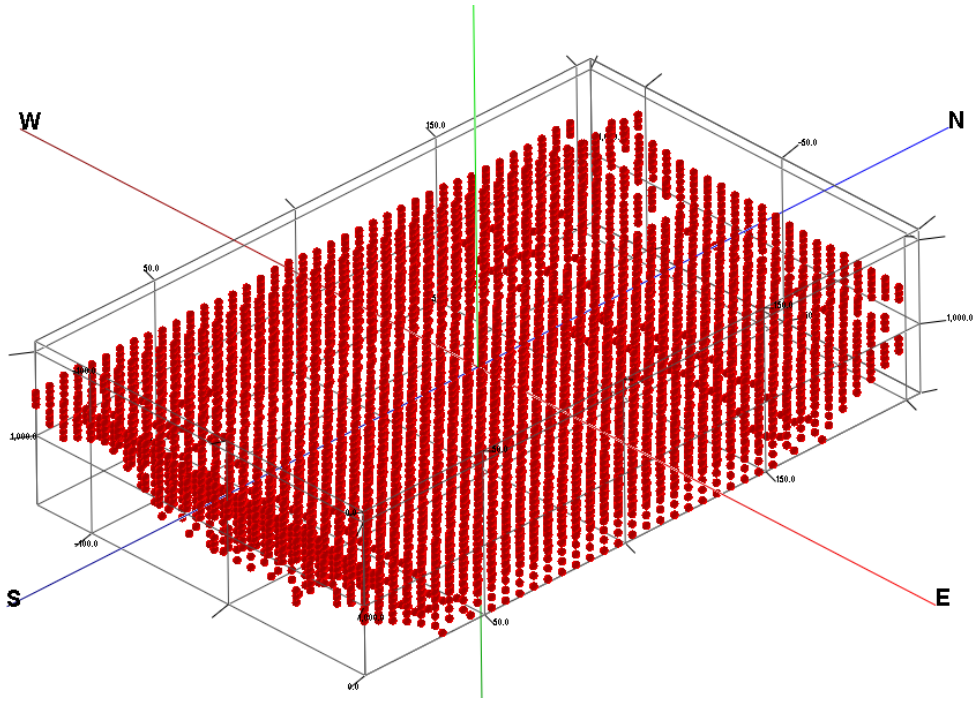


Figura 4.11 – Modelo 3D dos pontos de resistividade elétrica coletados no levantamento geofísico do estudo de caso "Brisas do Lago".

A Figura 4.12 apresenta o resultado da espacialização tridimensional dos valores de resistividade acima de 5.000 Ohm.m. Com essa informação, pode-se fazer uma excelente comparação com os valores encontrados nas sondagens, além disso, foi possível estudar o fluxo preferencial da água, outro ponto muito importante, principalmente para a tomada de decisão com relação ao projeto de rebaixamento do lençol freático. Até mesmo pequenas manchas isoladas, presentes no modelo, foram confirmados com auxilio de sondagem à trado e posteriormente durante a execução das estacas hélice contínua na obra. Estabelecer a direção do fluxo de água só foi possível com ajuda técnica de um profissional experiente em geofísica.

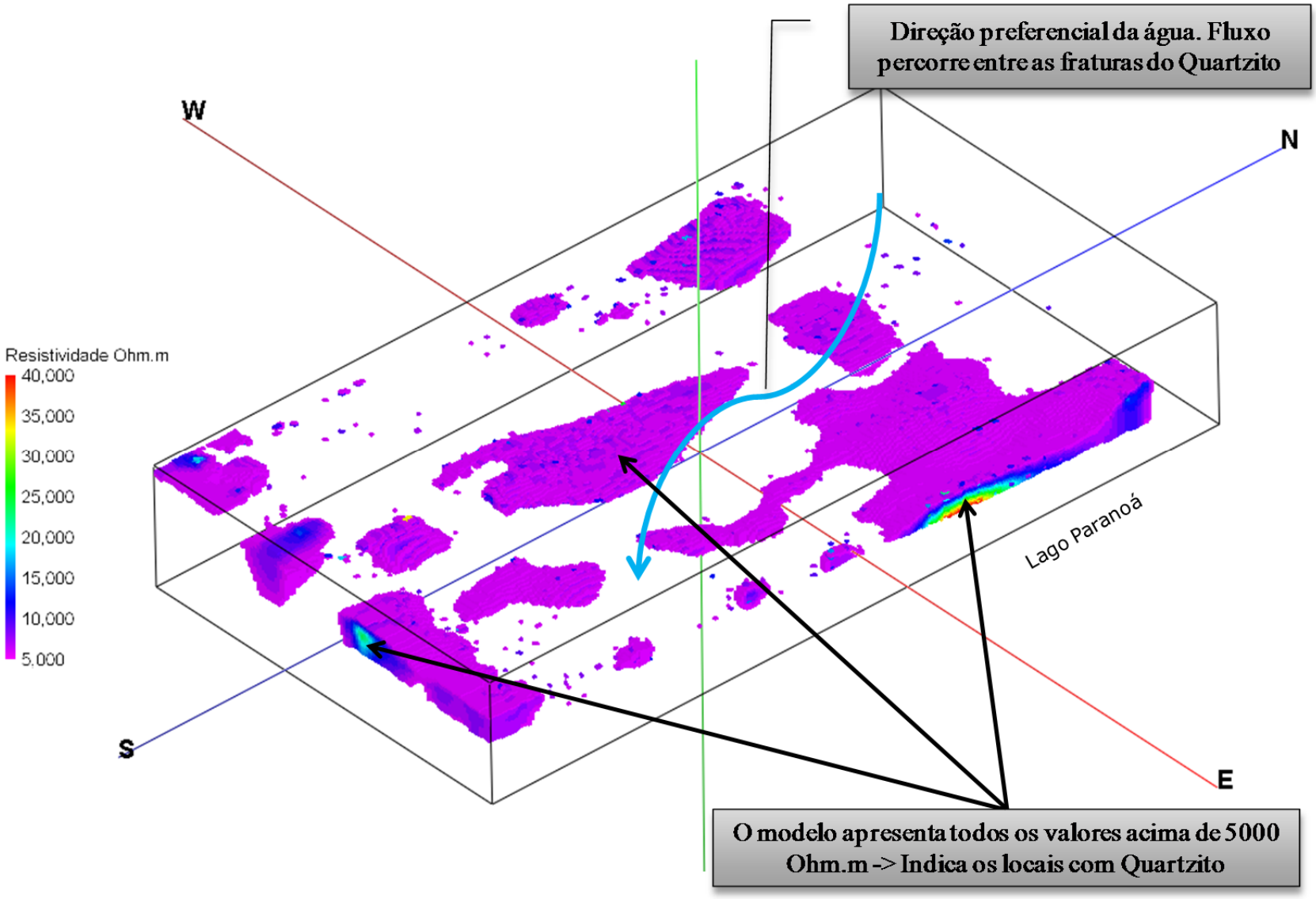


Figura 4.12 – Modelo 3D de resistividade elétrica para valores acima de 5.000 Ohm.m do estudo de caso "Brisas do Lago".

4.4.6- MODELO 3D DE Nspt COM SOBREPOSIÇÃO DOS VALORES DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

O diagrama de cercas 3D (*fence diagram*) de Nspt permite melhor visualização do modelo 3D de Nspt, pois fatiam o modelo em várias seções, o que auxilia na visualização interna do modelo 3D de Nspt. Para realizar o fatiamento é necessário primeiramente realizar a localização das fatias ou seções (Figura 4.13), o ideal é que as fatias fiquem sobrepostas aos furos de sondagem ou próximas para facilitar o processo de análise do modelo.

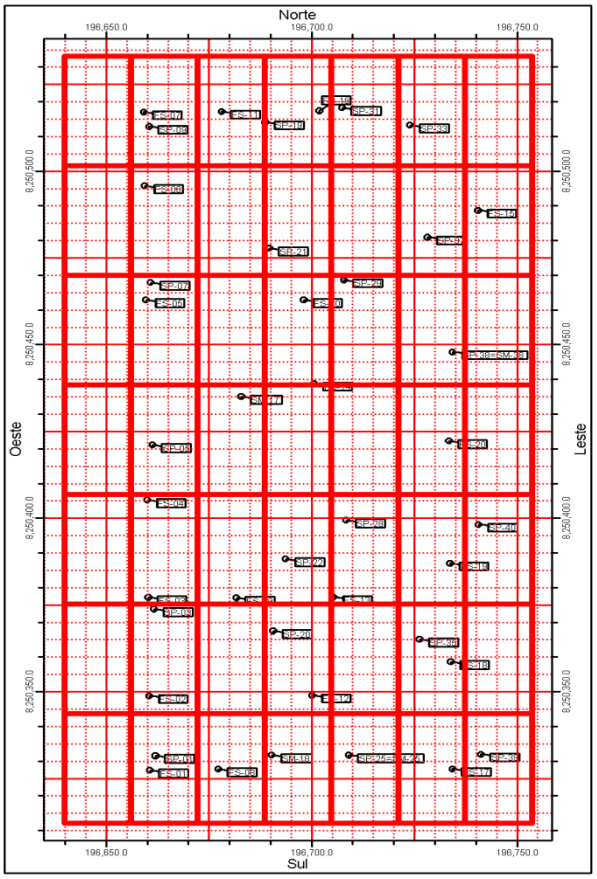


Figura 4.13 – Locação de fatias para construção de diagrama de cercas do estudo de caso "Brisas do Lago".

Para reforçar a utilidade do modelo, fez-se a sobreposição dos resultados de resistividade elétrica com os resultados obtidos da interpolação dos valores de Nspt (Figura 4.14). Os locais com resistividade acima de 5.000 Ohm.m estão na cor cinza. Observa-se nesse modelo uma excelente sobreposição de resultados, em que, locais não mapeados pelos furos de sondagem foram preenchidos pelos valores de resistividade elétrica e posteriormente foram conferidos alguns locais com furos de sondagem à trado. De forma direta o resultado desse modelo definiu o tipo de solução de fundação que foi adotado pela obra e serviu para otimizar o projeto de contenções da obra.

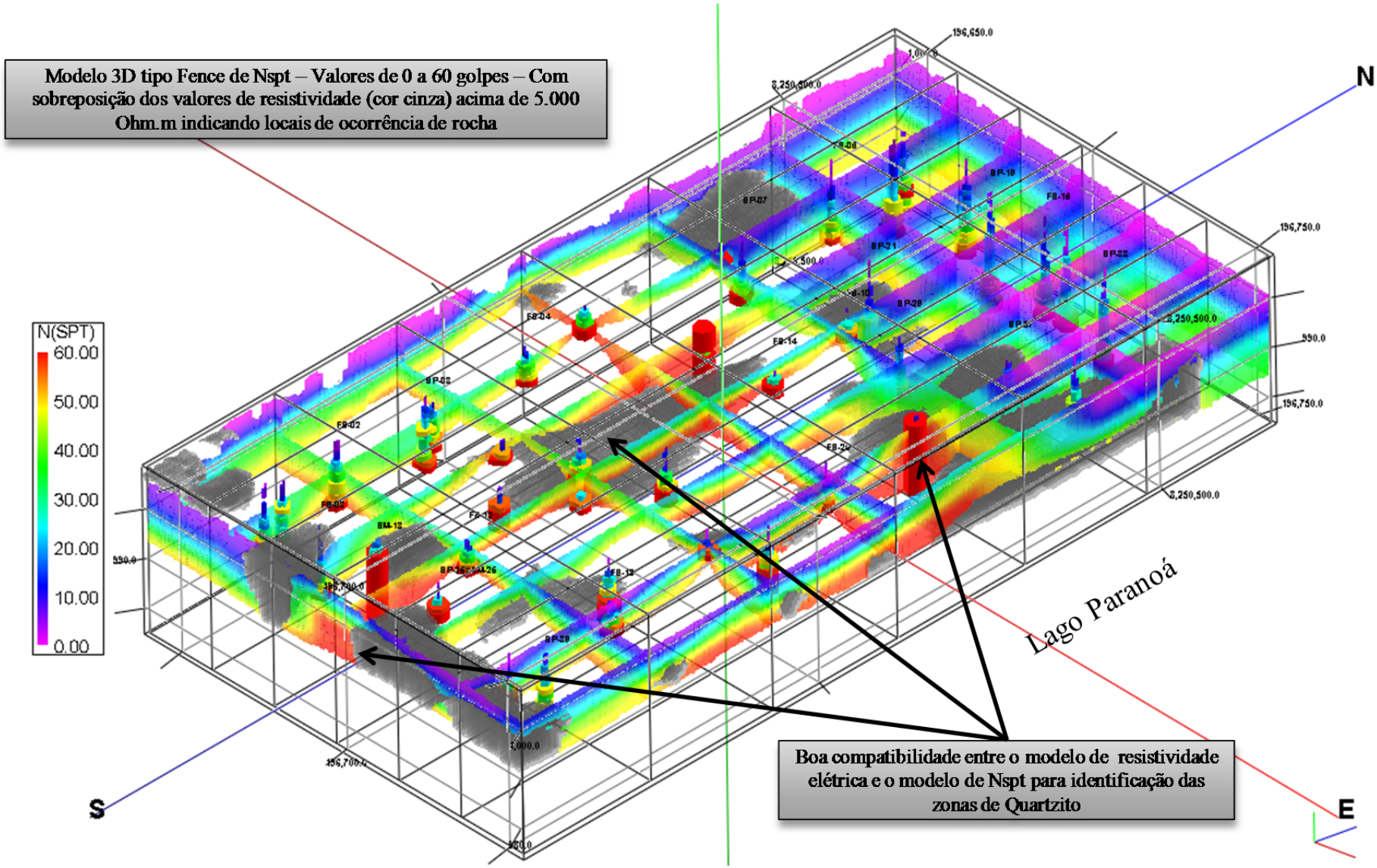


Figura 4.14 – Modelo 3D de Nspt com sobreposição dos valores de resistividade elétrica do estudo de caso "Brisas do Lago".

4.4.7- SEÇÕES BIDIMENSIONAIS (2D) DE Nspt E SOLO

As seções bidimensionais de Nspt e solo são o resultado do fatiamento bidimensional dos modelos 3D de Nspt e solo, este fatiamento vertical foi realizado em cima da linha de estacas de cada trecho da contenção. Para se ter ideia da aplicabilidade desse tipo de produto, nas Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17 estão os resultados das soluções de fundação para os muros de contenções da obra.

Observa-se nas figuras as estacas que serão executadas em cada trecho e o perfil de Nspt (superfície resistente) em que as estacas estão embutidas, além do tipo de material (solo/rocha) em que as estacas estarão apoiadas, pode-se notar que as estacas, neste caso, acompanharam sempre que possível a chamada superfície resistente do solo, ou seja, não foi estabelecido um valor de profundidade único para as estacas (solução tradicional) baseado somente nos cálculos desenvolvidos em escritório, o que permitiu um excelente grau de otimização e economia no projeto das contenções.

Tais seções diminuíram consideravelmente as incertezas na tomada de decisão com relação às soluções de fundação adotadas em todos os níveis da obra. Além dos cálculos de fundações tradicionalmente utilizados, as seções permitiram avaliar se em algum momento os resultados obtidos estavam muito conservadores ou abaixo da margem de segurança, em que todo esse cuidado ficou em função do melhor conhecimento da superfície resistente do solo.

Quando o projetista, em função da análise conjunta dos cálculos do projeto e visualização dos modelos, considerou que mesmo que a superfície resistente permitisse estacas com menor profundidade, mas que por questões da análise do fator de segurança a obra não estaria segura, algumas estacas ficaram com profundidades abaixo da linha da superfície resistente, não significando, porém, que as estacas não pudessem, de fato, ficar com profundidades menores, mas o controle dessas estacas ficaria combinado de ser feito durante a execução das mesmas. A grande vantagem é que tudo pôde ser controlado ainda na fase de projeto.

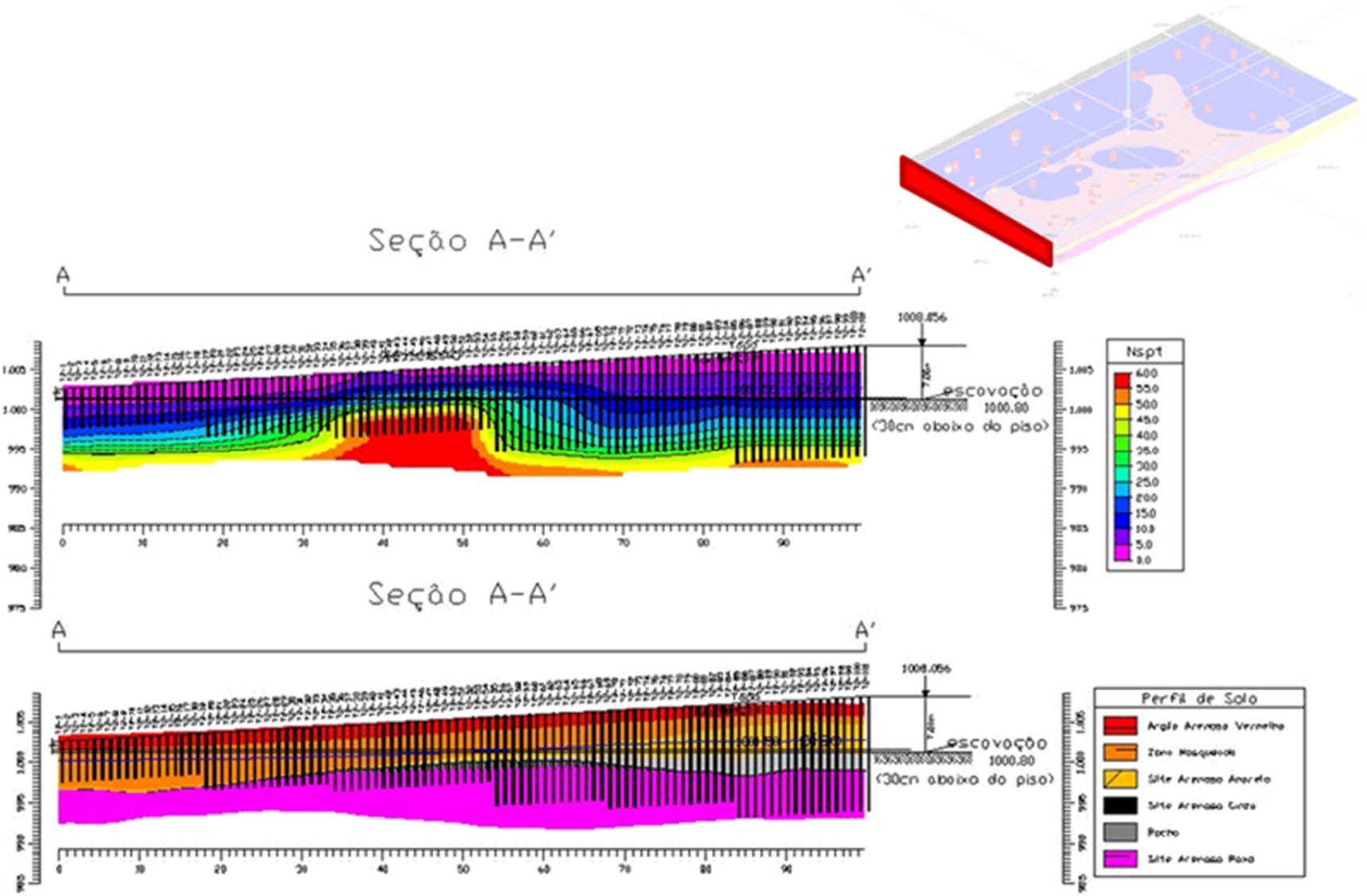


Figura 4.15 – Seção 2D de Nspt e Solo com a solução de estacas projetas para as contenções da obra do estudo de caso "Brisas do Lago".

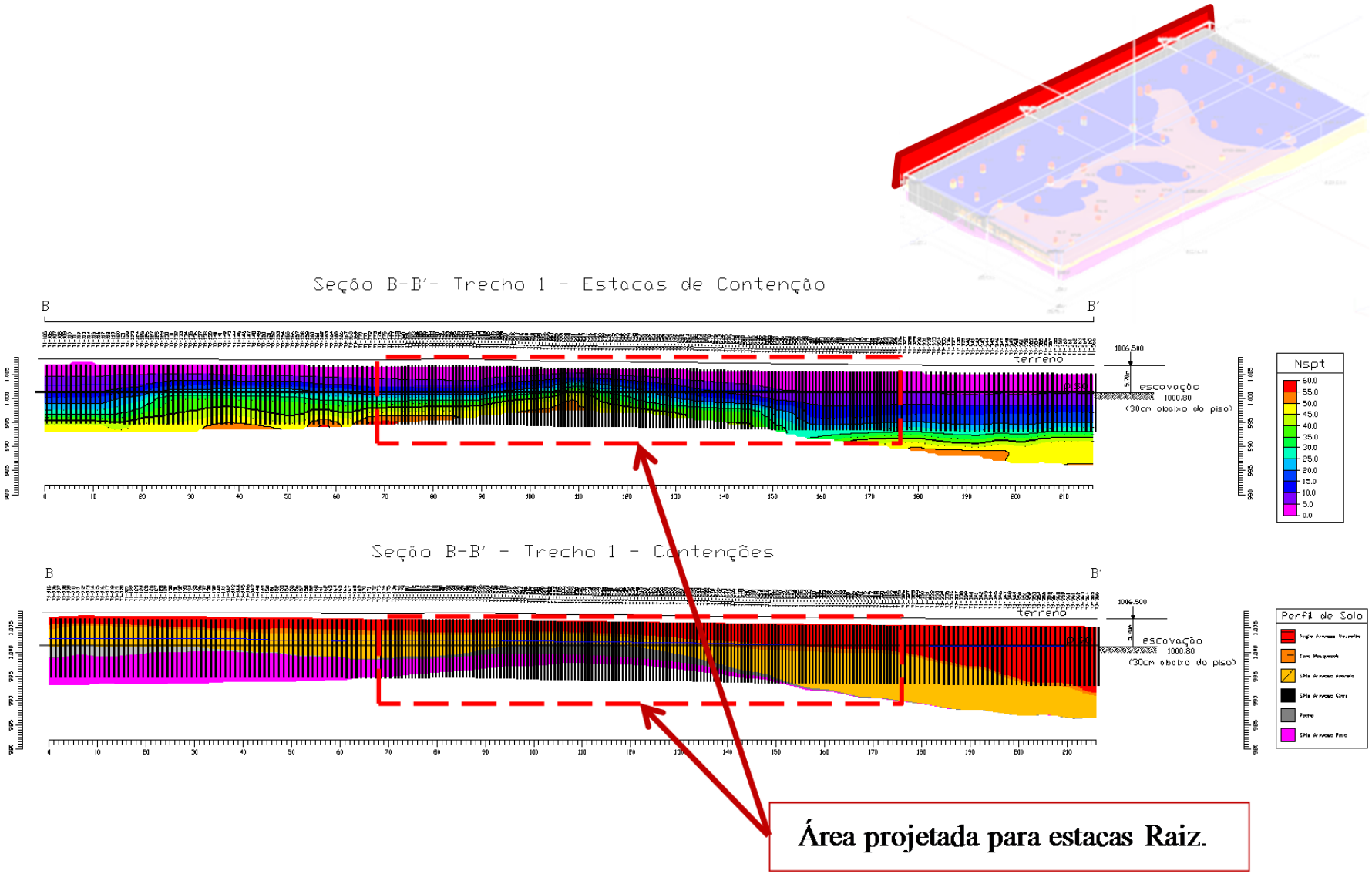


Figura 4.16 – Seção 2D de Nspt e Solo com a solução de estacas projetas para as contenções da obra do estudo de caso "Brisas do Lago".

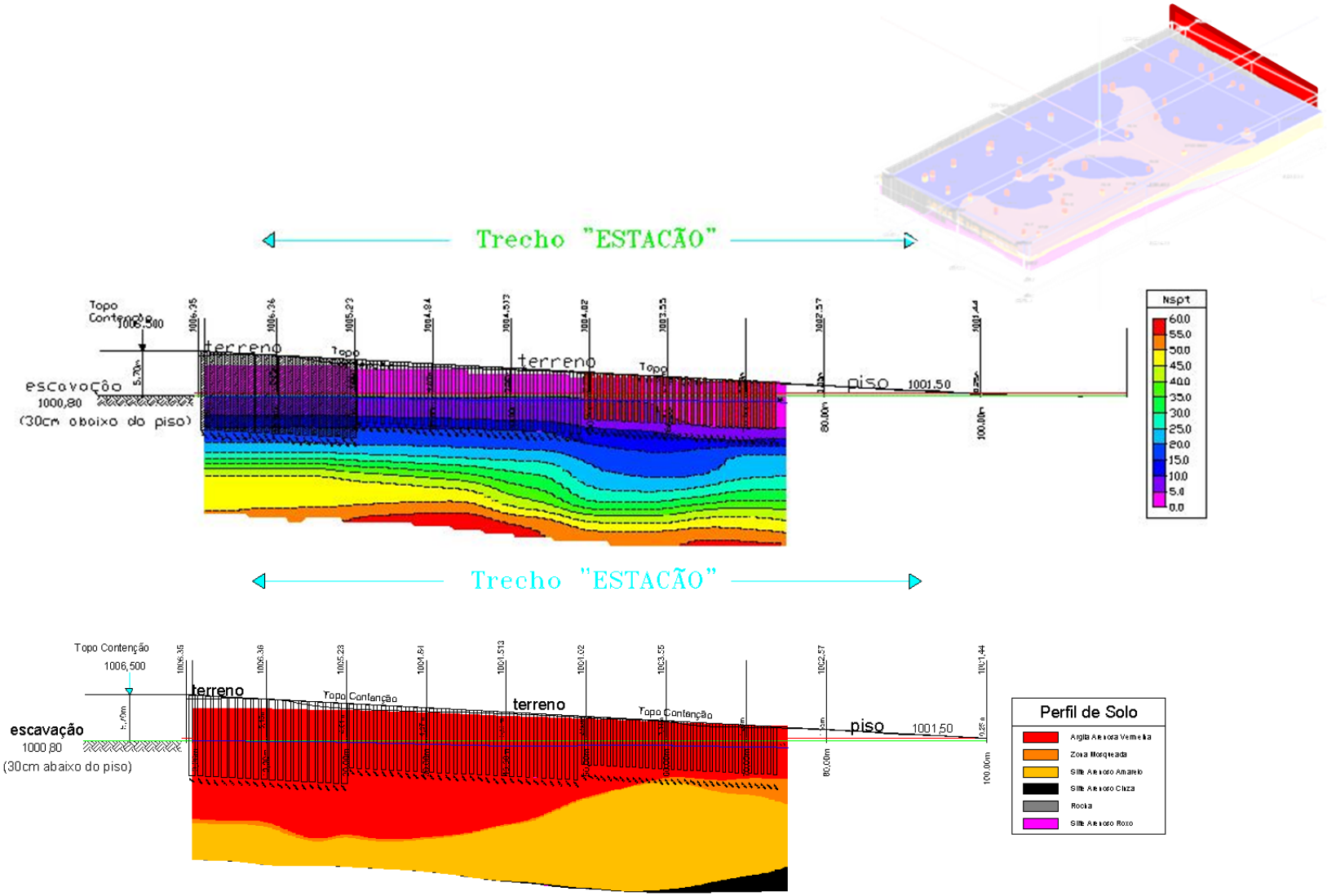


Figura 4.17 – Seção 2D de Nspt e Solo com a solução de estacas projetas para as contenções da obra do estudo de caso "Brisas do Lago".

4.4.8- FATIAMENTO HORIZONTAL (2D) DE Nspt

Um produto bastante útil para obra é o fatiamento em várias seções horizontais no modelo 3D, ou seja, visualização de valores em profundidade. Da Figura 4.18 até a Figura 4.23 está a sequência de fatiamento necessária para as tomadas de decisão de fundações do estudo de caso, esta sequência mostra os fatiamentos horizontais feitos no modelo de Nspt em contas de interesse para a obra, a partir da cota de implantação de 1001,20 m.

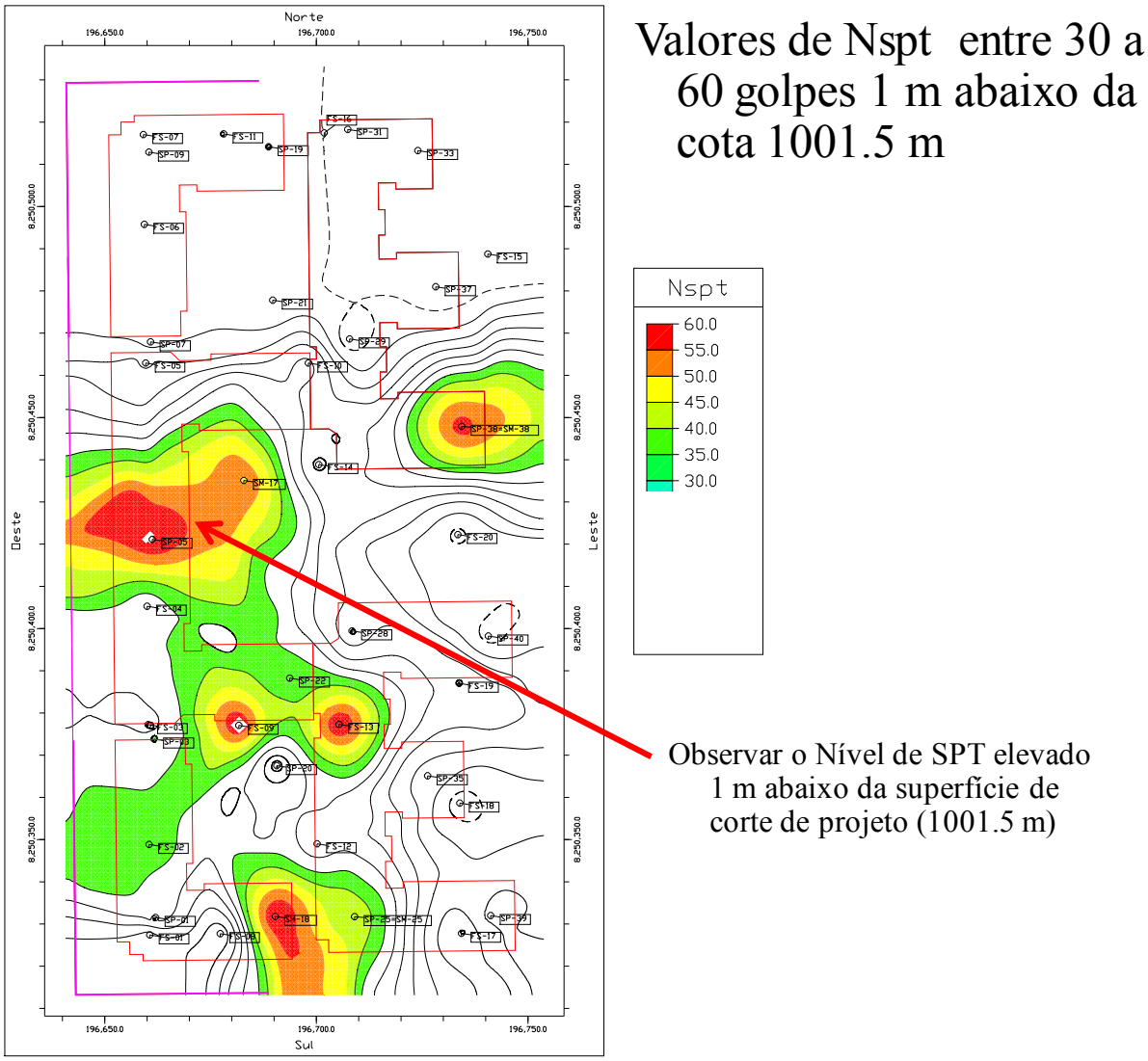


Figura 4.18 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 1 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago".

O motivo de se fatiar na profundidade de 1 m, conforme mostra a Figura 4.18, era verificar a viabilidade de se fazer a fundação em sapata que era a solução mais barata quando comparada com as outras soluções apresentadas. Para que esta solução funcionasse era necessário garantir o perfeito rebaixamento do lençol freático, fato que não foi possível em razão da solução adotada para a obra.

Como a solução por sapata não era possível em razão da solução adotada para o rebaixamento do lençol freático, foi proposta uma nova solução, mais cara economicamente, mas possível de ser executada que é a solução por estaca raiz. Desta vez o fatiamento foi feito 2 m abaixo da cota 1001,20 m para que se pudesse analisar a continuidade dos valores de impenetrável, a Figura 4.19 mostra o fatiamento realizado para este estudo.

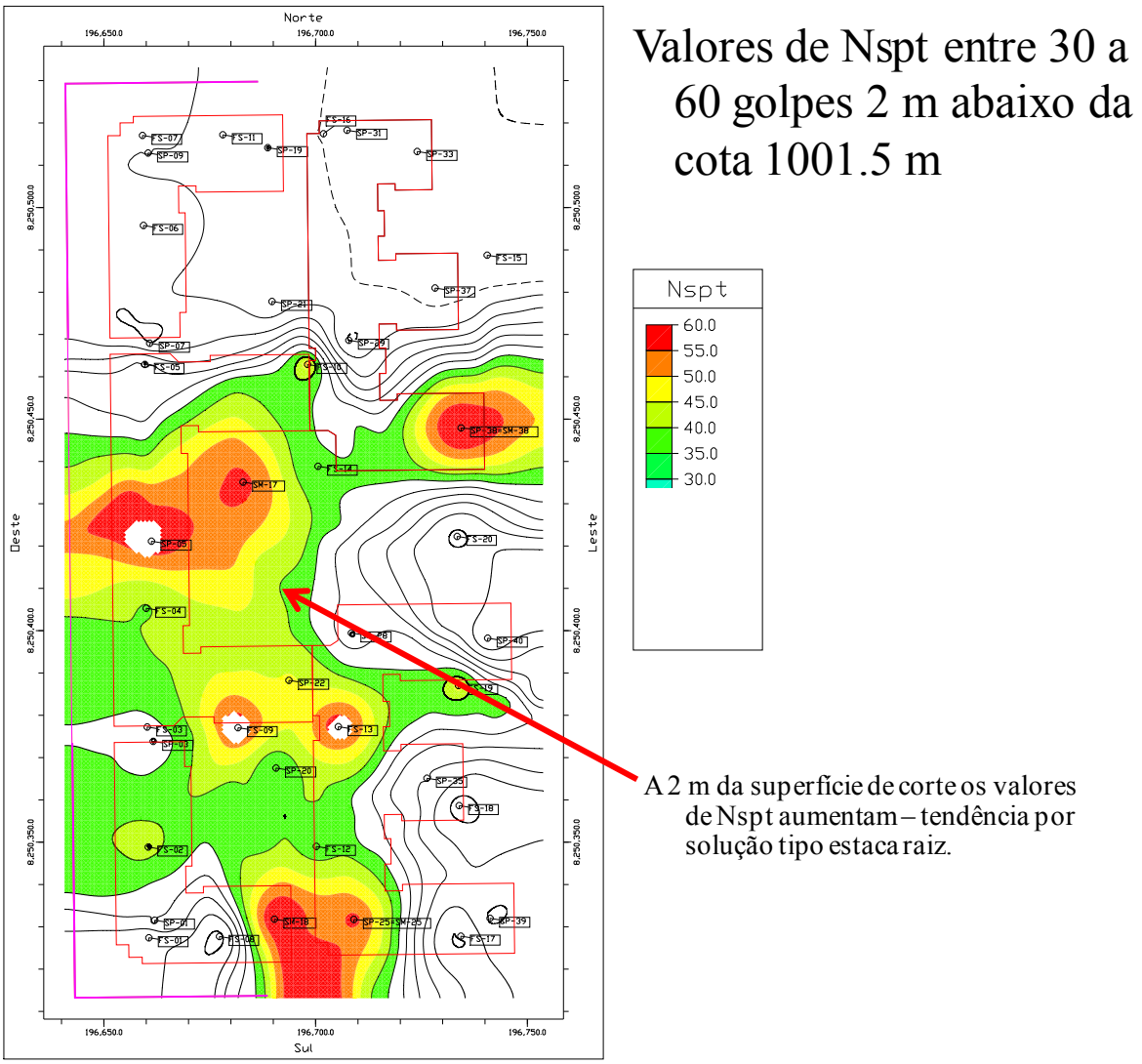


Figura 4.19 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 2 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago".

A obra também estudou a solução de fundação por estaca hélice contínua, porém existem algumas premissas para que este tipo de solução possa ser viável em termos de execução, a primeira delas é que a estaca hélice só passa a ser viável a partir de 6 m de profundidade, outra premissa é que a estaca hélice só pode ser executada com valores de Nspt até 40 golpes, pois a partir desse valor o equipamento sofre o risco de danificar algum componente.

Neste caso, o fatiamento a 6 m de profundidade era algo bastante interessante de ser feito para avaliar a viabilidade do uso de estaca hélice contínua na obra a partir dessa profundidade. A Figura 4.20 mostra o referido fatiamento, mostrando que era possível de ser realizar a solução por estaca hélice, porém era necessário avaliar em profundidades maiores com o objetivo de detectar algum tipo de interferência.

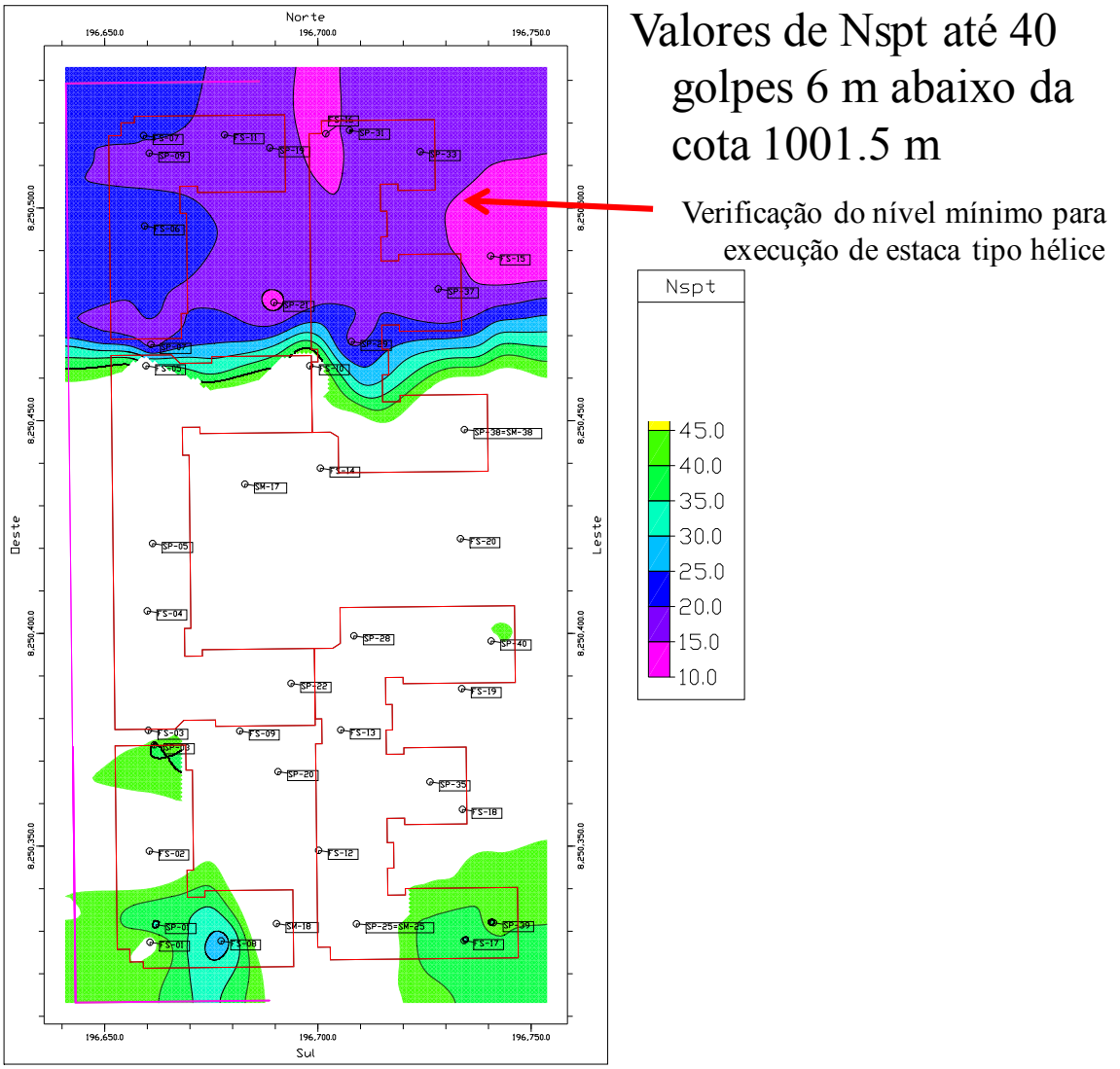


Figura 4.20 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 6 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago".

Assim foi feito e um novo fatiamento a 7 m (Figura 4.21) realizado com o objetivo de detectar possíveis interferências à execução da fundação em estaca hélice contínua. Com este fatiamento foi possível verificar que nesta profundidade ainda era perfeitamente possível realizar a hélice contínua.

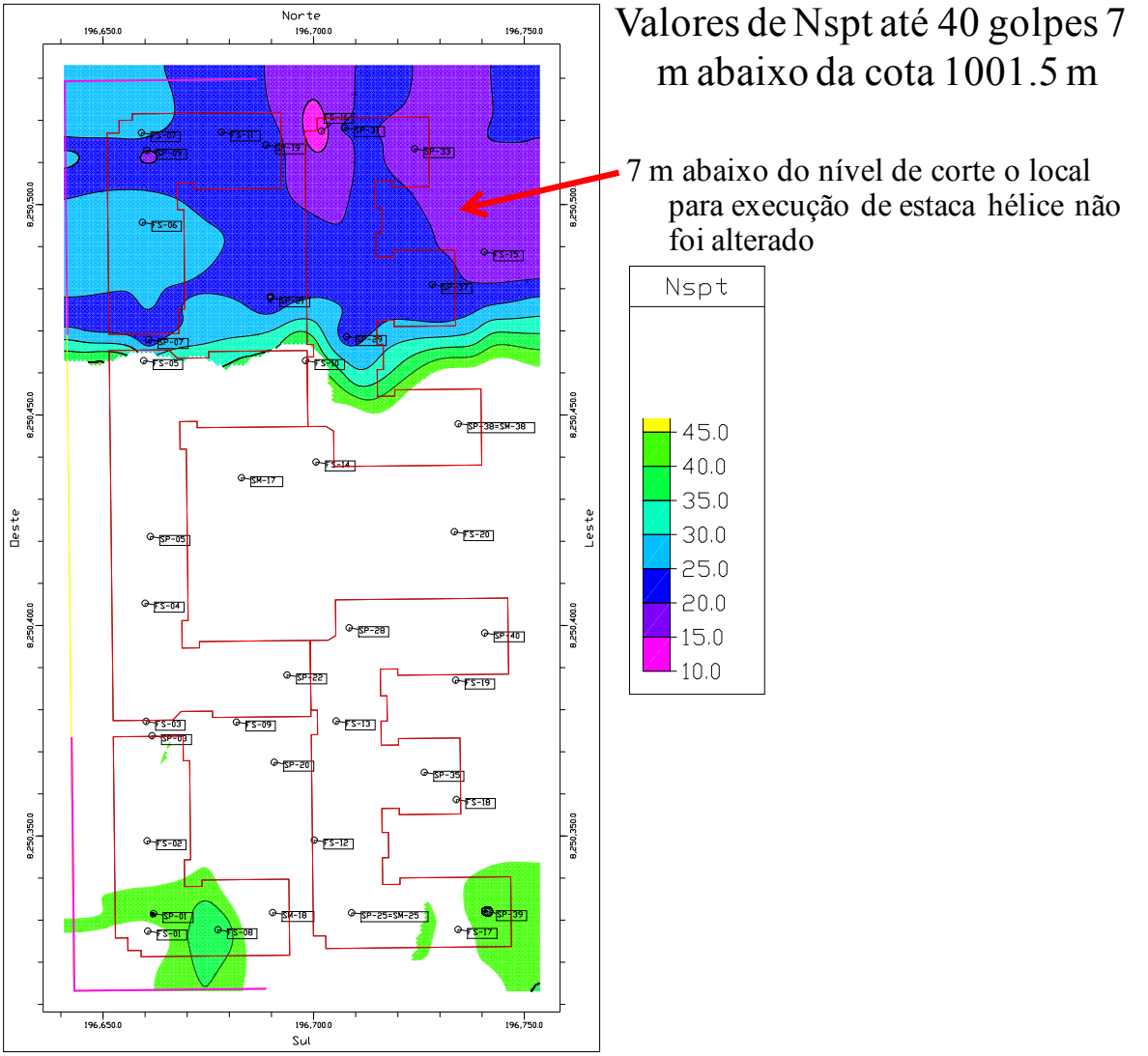


Figura 4.21 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 7 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago".

O fatiamento a 8 m de profundidade (Figura 4.22) tem o mesmo objetivo do fatiamento a 7 m de profundidade, e pôde-se verificar que a área escolhida para execução de estaca hélice contínua se manteve igual aos outros fatiamentos.

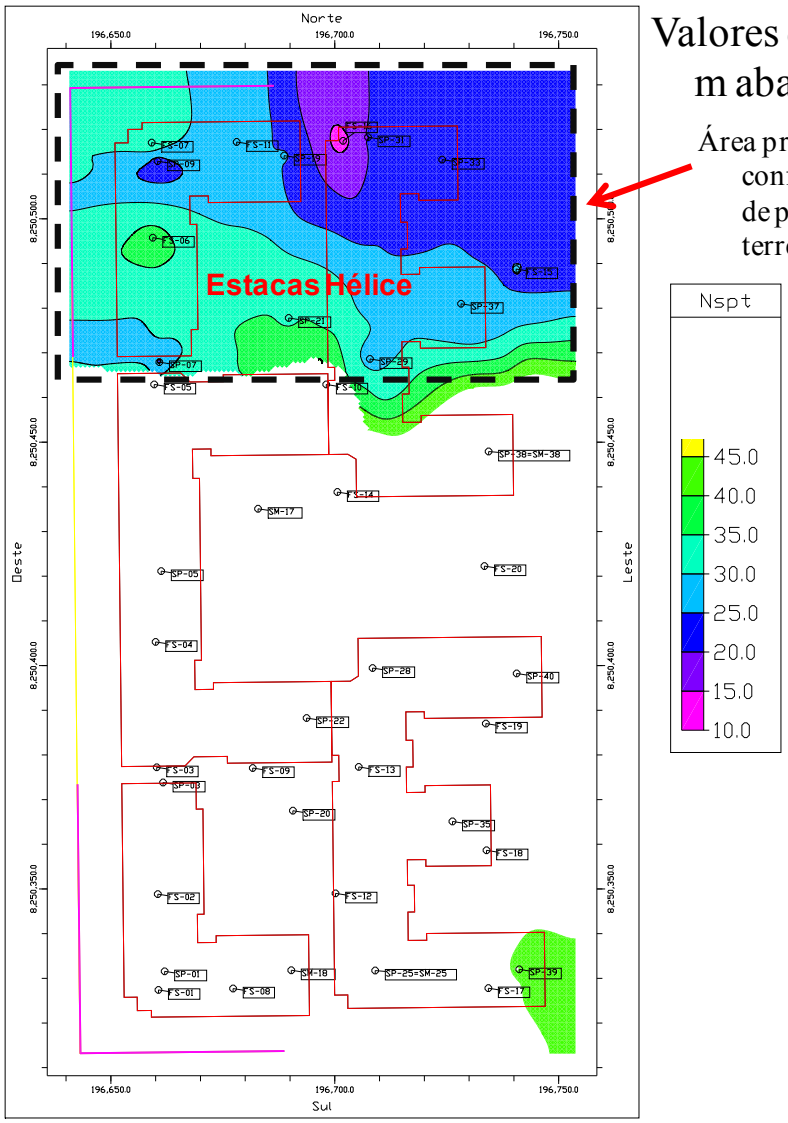


Figura 4.22 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 8 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago".

O fatiamento horizontal de valores de Nspt prosseguiu até a cota 9 m abaixo da cota de implantação (Figura 4.23), sendo o último fatiamento produzido, este fatiamento serviu para confirmar definitivamente a área que seria selecionada para execução da solução por estaca hélice contínua.

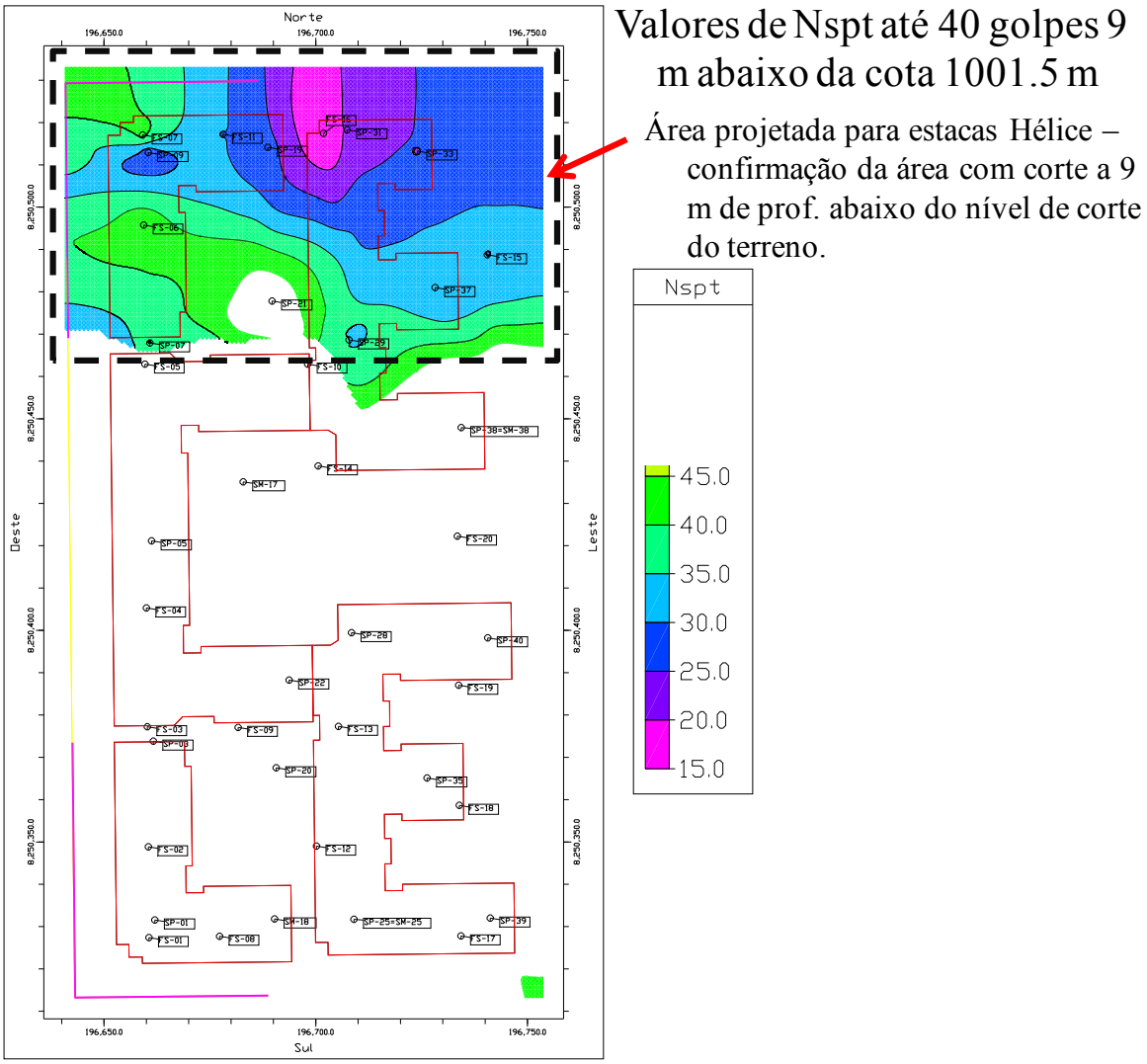


Figura 4.23 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 9 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago".

Após o estudo de todos os fatiamentos horizontais de valores de Nspt, pôde-se construir o critério de execução das fundações da obra, conforme pode ser visualizado na Figura 4.24. O motivo para optar por estacas raiz em vários trechos da obra (execução de custo mais elevado) e não usar fundação superficial (o que seria mais lógico e de menor custo), já explicado, é que o projeto de rebaixamento do nível d'água não garantia um terreno 100% drenado no momento da execução desse tipo de fundação o que inviabilizava operacionalmente a solução de fundação superficial na obra.

O fatiamento horizontal neste caso foi preponderante para uma tomada de decisão difícil para a obra que era adotar uma solução de maior custo, porém, neste caso, com os modelos a solução teve senão uma justificativa econômica, mas uma justificativa técnica para ser executada.

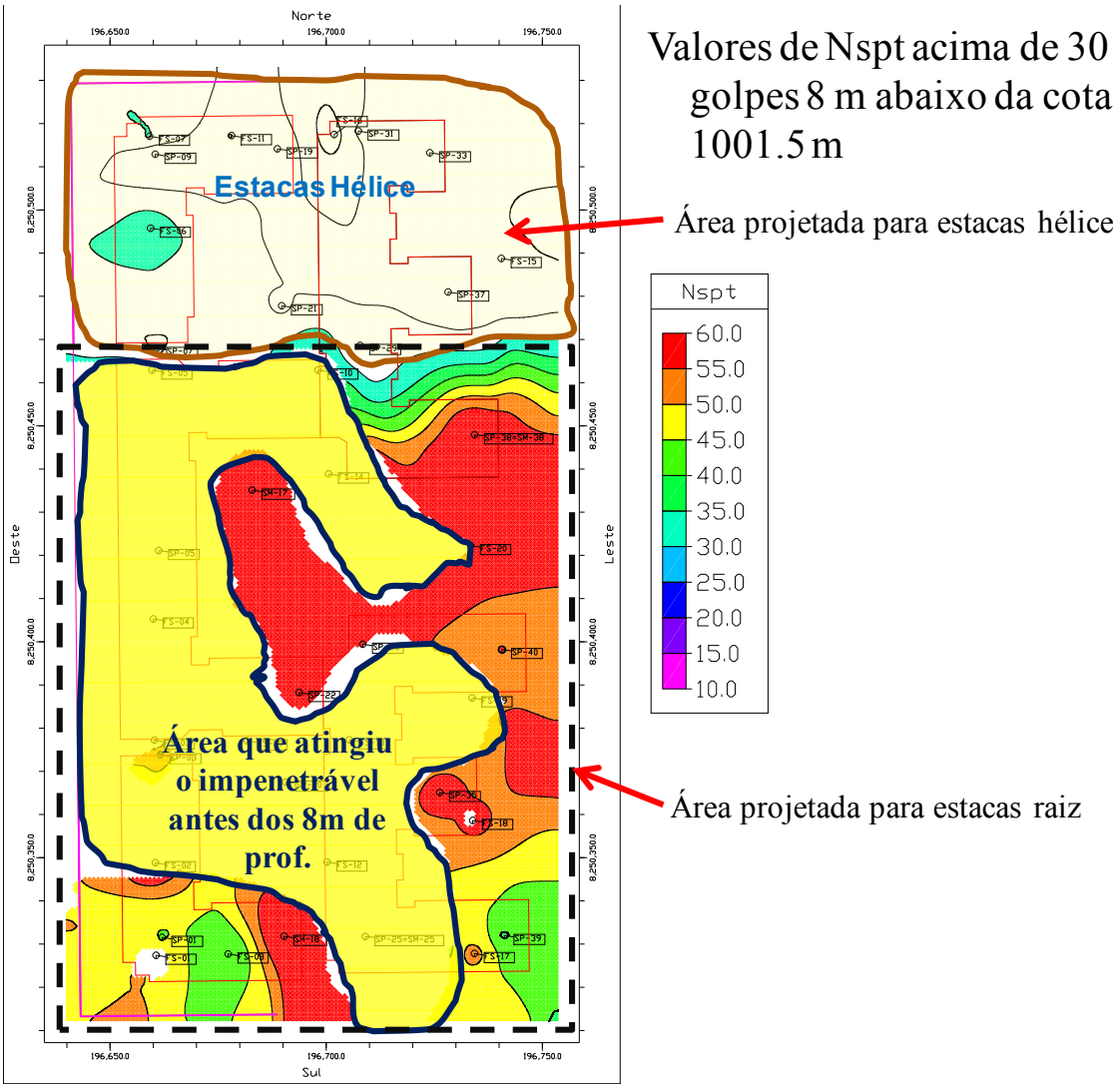


Figura 4.24 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt a 8 m de profundidade a partir da cota de implantação da obra do estudo de caso "Brisas do Lago".

4.5- RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO - OBRA "SAUN"

Neste estudo de caso os modelos focaram em duas frentes, a primeira era auxiliar o projeto de fundações e a segunda auxiliar no projeto de escavação do subsolo. A obra realizou uma campanha com 36 furos de sondagem mistas, além do levantamento geofísico com o método de eletrorresistividade para auxiliar na tomada de decisões. Assim como o estudo de caso 1 esta obra realizou primeiramente a campanha com sondagem mecânica e posteriormente fez o levantamento geofísico, o que não é o melhor método, mas de qualquer forma a campanha de ensaios geofísicos elucidaram várias dúvidas. Como de praxe, o primeiro passo é a locação dos furos de sondagem e das seções geofísicas. A Figura 4.25 mostra a locação dos furos de sondagem da obra na planta topográfica do terreno.

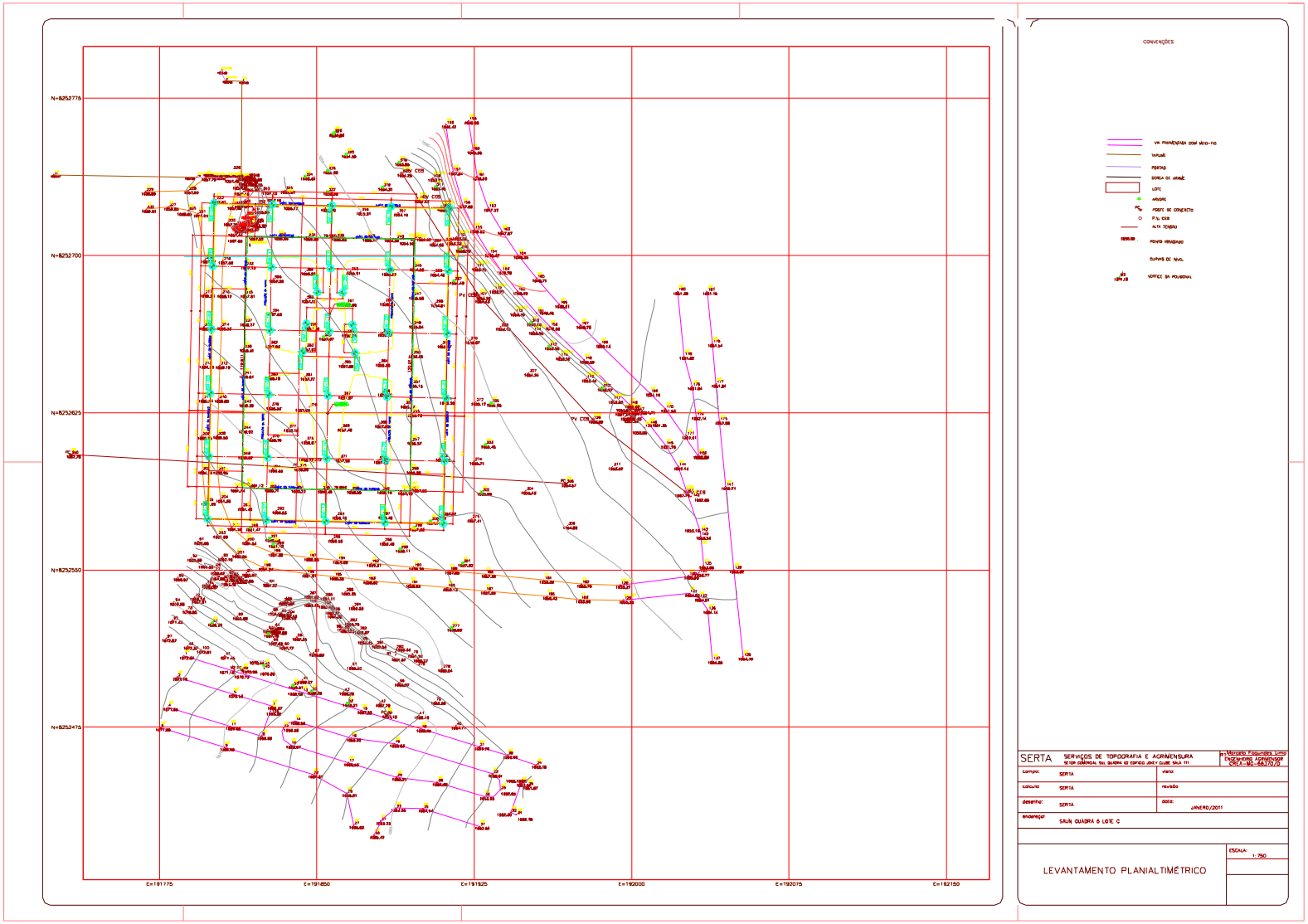


Figura 4.25 – Planta topográfica com locação dos furos de sondagem mista para o estudo de caso "Obra SAUN".

Com a planta topográfica e a locação dos furos realizou-se a compatibilização das cotas de boca de furo das sondagens cujos relatórios de sondagem forneciam apenas as cotas de boca de furo com referência de nível local. A Figura 4.26 mostra o processamento das curvas de nível da planta topográfica e a sobreposição dos furos de sondagem para posterior extração das cotas de boca de furo com referência à planta topográfica.

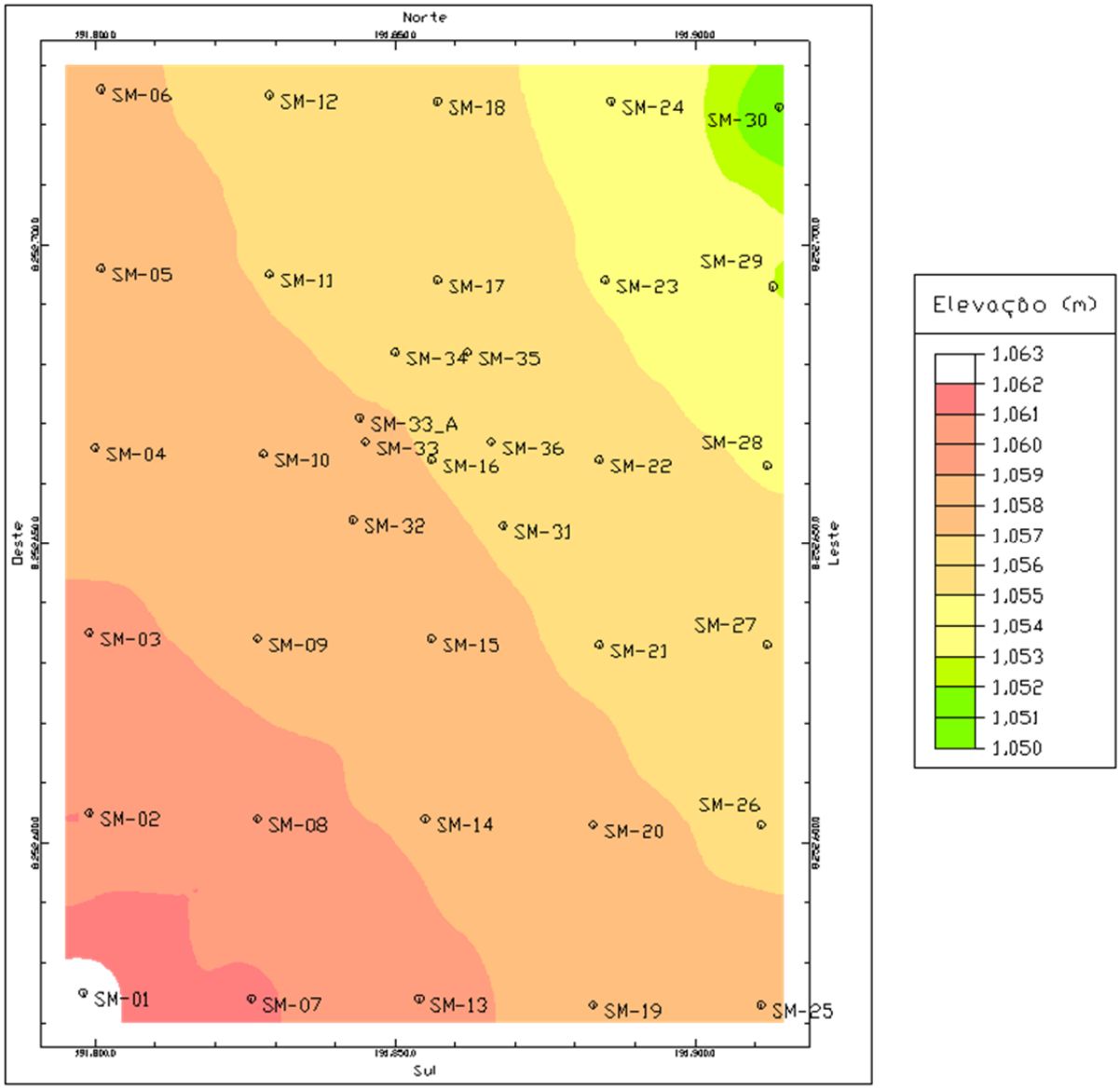


Figura 4.26 – Carta hipsométrica com locação dos furos de sondagem mista para o estudo de caso "Obra SAUN".

A Figura 4.27 mostra a locação do levantamento geofísico (eletrorresistividade) realizado no local da obra. A planta de locação das linhas geoelétricas foi cedida pela empresa contratante.

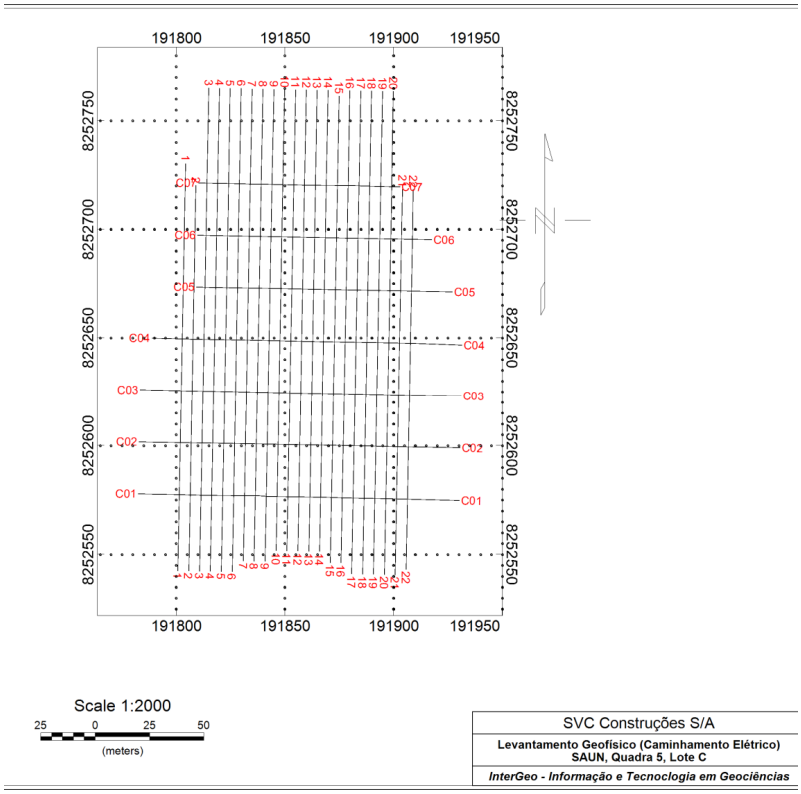


Figura 4.27 – Planta de locação das linhas geoelétricas para o estudo de caso "Obra SAUN".

4.5.1- CONTEXTO GEOLÓGICO DO ESTUDO DE CASO 2 – OBRA "SAUN"

O canteiro e a obra respectiva estão situados em uma área cuja paisagem sofreu profundo grau de alteração. (Figura 4.28).



Figura 4.28 – Vista parcial do canteiro da obra. Notar os quartzitos saprolitizados envoltos pelo evidente manto de intemperismo.

No local são encontrados na camada superficial, materiais movimentados pela ação humana consequente do processo de construção da cidade. São blocos de concreto de tamanhos diversos, vergalhões de ferro, blocos de quartzito e restos de aterro e materiais de bota fora com espessura que podem atingir 1 a 2 metros (Figura 4.29).

Os depósitos tecnogênicos resultaram de deposição mecânica na área, conforme ilustra a Figura 4.29. Foram depositados durante o processo de urbanização da cidade, apresentando profundidades variáveis entre alguns decímetros a três metros.

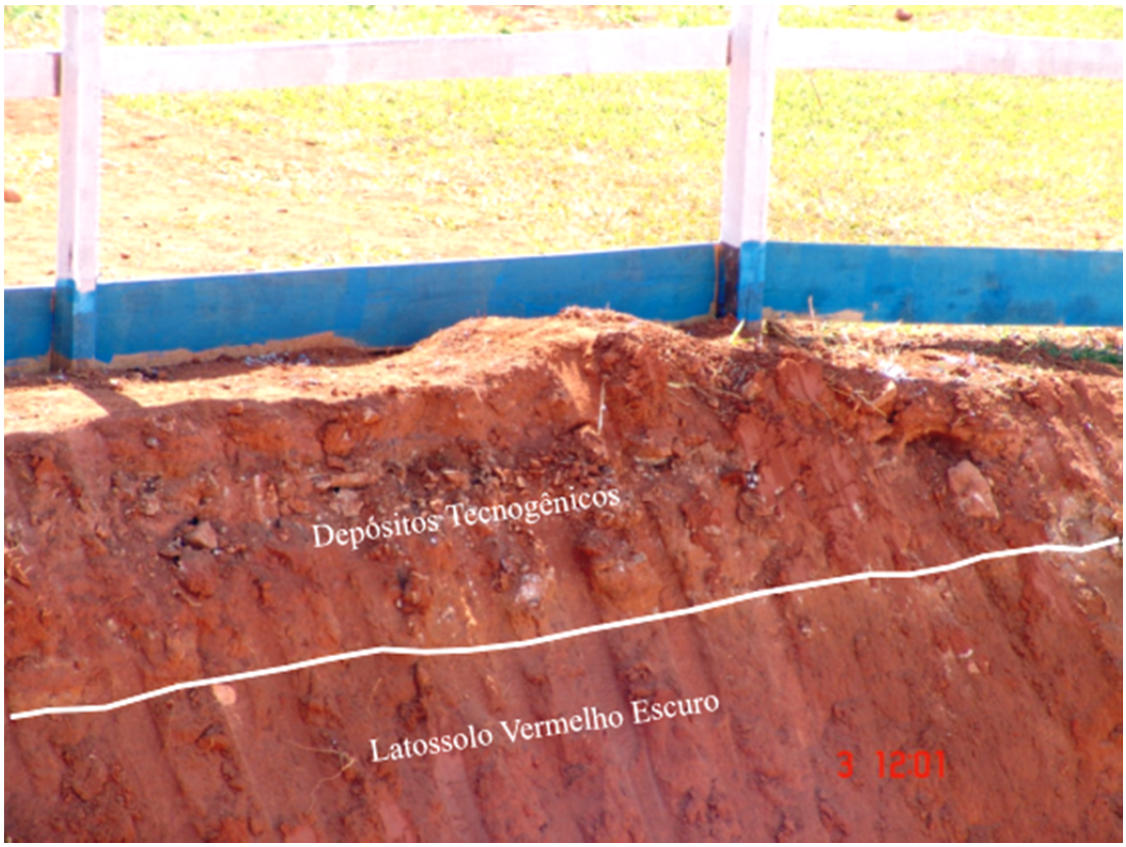


Figura 4.29 – Depósitos tecnogênicos construído envolvendo o Latossolo Vermelho Escuro. O Horizonte A já foi decapeado. O nível esbranquiçado é o quartzito alterado.

A escavação produzida para acolher a fundação da obra se aprofundou cerca de 10 m em alguns pontos expondo apenas rochas alteradas. Em profundidades maiores (a partir de 14 -15 m) a rocha é fresca, denotando cor cinza claro a cinza escuro e recuperação de testemunhos de sondagem rotativa superior a 50%.

Sob o ponto de vista litológico a área da obra pode ser considerada, como constituída de três unidades, de baixo para cima: a) quartzitos; b) latossolos; e c) depósitos tecnogênicos.

Os quartzitos são de cores predominantemente esbranquiçadas, mas existem níveis com cores amareladas, acinzentadas, esverdeadas e avermelhadas, em porções mais profundas, menos alteradas, são de cor cinza claro ou até mesmo cinza escuro. São rochas muito alteradas, razão pela qual se tornaram friáveis, se desagregando com a pressão dos dedos, e encontrados de forma intercalada com camadas de siltitos e argilitos. Alguns núcleos menos alterados exibem formas arredondadas, apresentando dimensões decimétricas a métricas. Exibem-se na forma de estratos com espessuras situadas entre 25 a 30 cm, geralmente com estrutura interna maciça. Alguns estratos apresentam planos de estratificação internos menos definidos. Encontram-se suavemente onduladas definindo eixos sub-horizontalizados orientados próximos à direção N-S. Exibem fraturas sob diversas orientações, normalmente preenchidas por quartzo leitoso. Sob o ponto de vista macroscópico a rocha é maciça, friável, composta predominantemente por quartzo, apresentando minerais pesados, provavelmente ilmenita, como acessórios. A granulometria é fina a média e os grãos, esféricos, apresentam-se bem arredondados. A partir da profundidade de 14 m os quartzitos são cinza escuros, aspecto maciço, fraturados, muito compacto. Por alteração essas rochas se tornam amareladas ou esbranquiçadas e, finalmente, avermelhadas quando muito alteradas (Figura 4.30).

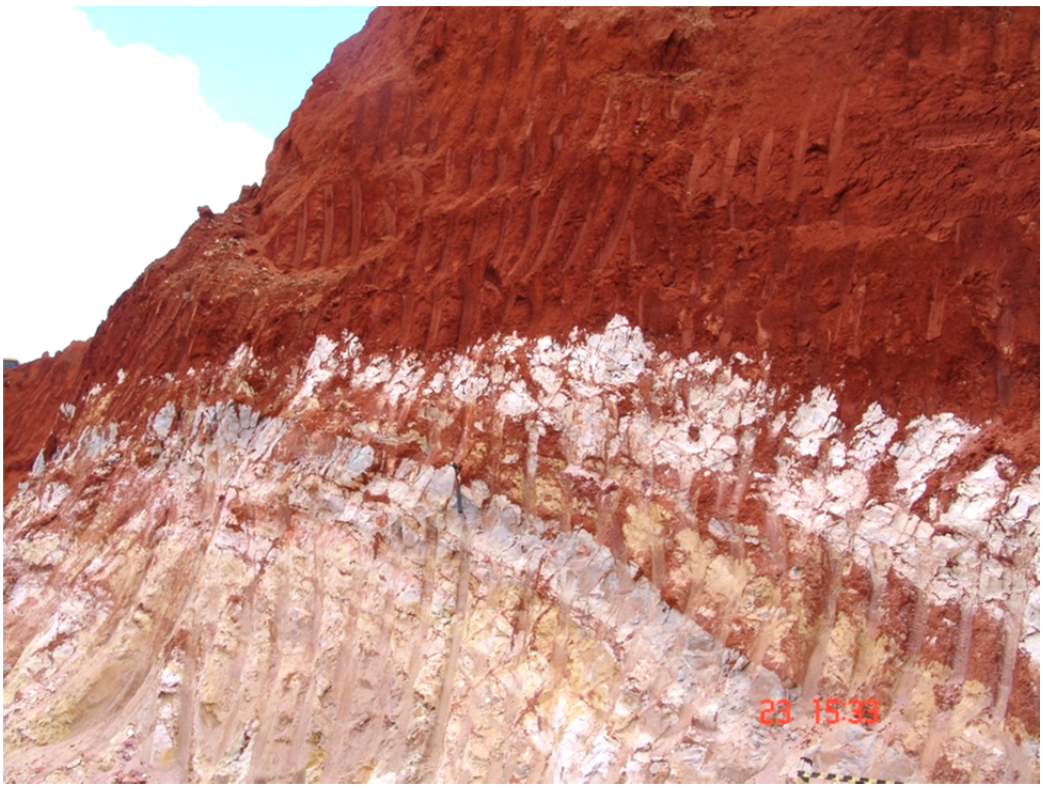


Figura 4.30 – Vista parcial de um corte na escavação da obra. Notar os níveis de quartzitos formando suave ondulação.

No topo essas rochas transicionam para o Latossolo Vermelho Escuro. Observa-se que as camadas de quartzito vão ficando progressivamente enriquecidas em níveis irregulares de material argiloso avermelhado, à medida que se atinge o topo do pacote. No limite, os quartzitos, em clara passagem transicional, são substituídos pelo Latosso Vermelho Escuro.

O Latossolo Vermelho Escuro tem profundidade variável, podendo atingir 10 metros em alguns pontos da área sob investigação. Denota textura areno-argilosa, apresentando boa escavabilidade. A cor vermelha resulta da intensa laterização dos materiais argilosos e ferromanganesíferos presentes na rocha original.

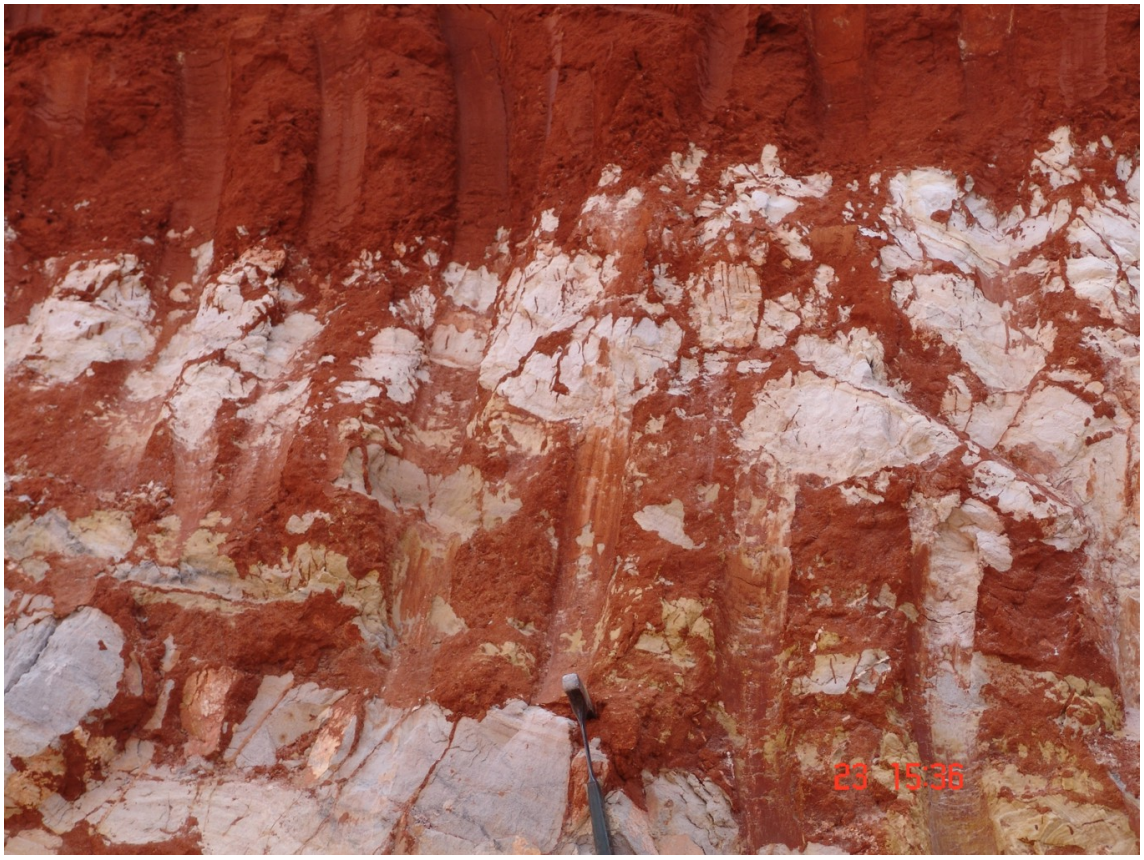


Figura 4.31 – Aspecto da passagem transicional do quartzito para o LVE (Latossolo Vermelho Escuro).

As características litológicas presentes na área sugerem que ela integre não a Fácies Ardósias conforme sugerido por Faria (1995), Guimarães & Figueiredo (1997), mas com a Fácies Metassiltitos (MPpps).

4.5.2- MODELO 3D DE Nspt

O primeiro resultado obtido foi o modelo tridimensional de Nspt. Apesar de esse modelo ser utilizado para confeccionar os outros produtos, tais como o diagrama de cercas (*fence*

diagram) de Nspt e as seções de Nspt, visualmente esse modelo é menos prático do que seus derivados. O destaque para este modelo é em razão das ferramentas disponíveis que tornam o modelo interativo, de forma que o usuário pode acessá-lo e visualizá-lo da maneira mais conveniente possível. A Figura 4.32 destaca o modelo tridimensional de Nspt realizado para o estudo de caso.

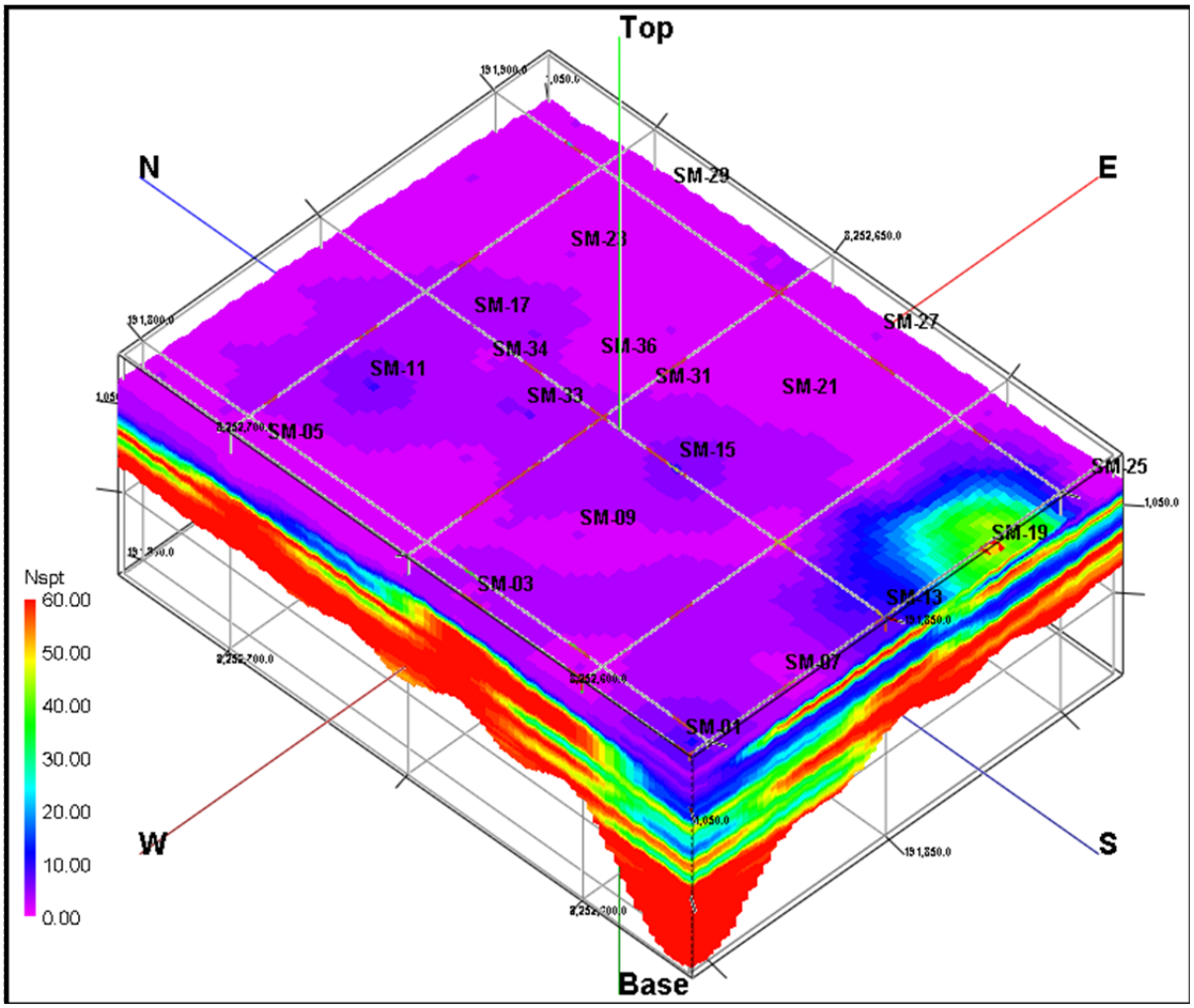


Figura 4.32 – Modelo 3D de Nspt para o estudo de caso "Obra SAUN".

4.5.3- DIAGRAMA DE CERCAS 3D (*FENCE* 3D) DE Nspt

O diagrama de cerca 3D de Nspt permite melhor visualização do modelo 3D de Nspt, pois fatiam o modelo em várias seções 3D, o que auxilia na visualização interna do modelo 3D de Nspt. A Figura 4.33 mostra o diagrama de cercas 3D de Nspt.

Observa-se nesse modelo a variabilidade de valores de Nspt no terreno, com fortes intercalações entre solo menos resistente e solo muito resistente. Como exemplo, basta observar a região entre os furos SM-15 e SM-21 que passam inicialmente por camadas de solo

muito resistente, até mesmo rocha e logo em seguida há um forte decréscimo de valores de Nspt que vai intercalando-se entre resistente e pouco resistente até atingir valores elevados novamente.

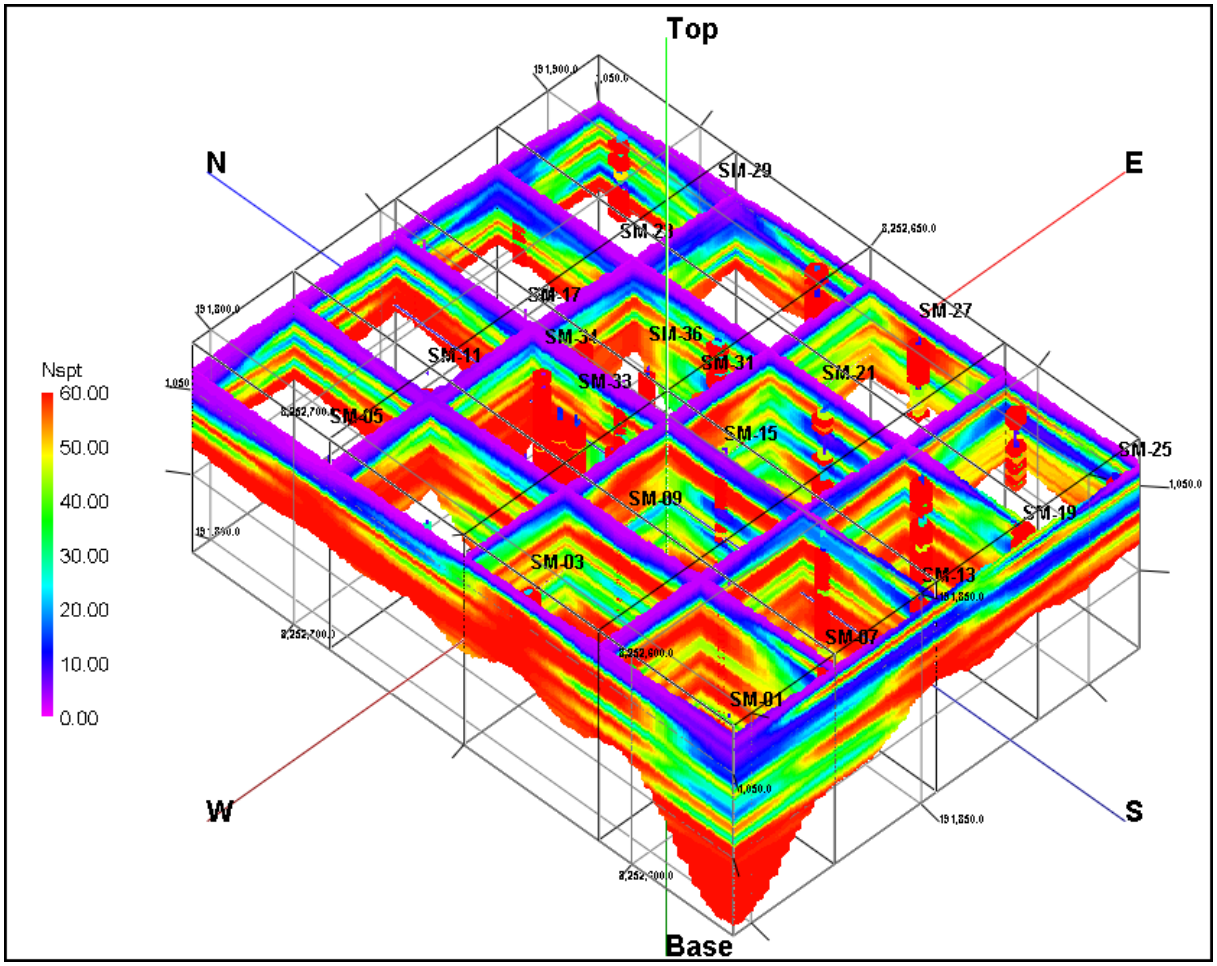


Figura 4.33 – Diagrama de cercas 3D (*Fence* 3D) de Nspt para o estudo de caso "Obra SAUN".

4.5.4- SEÇÕES BIDIMENSIONAIS (2D) DE NSPT

As seções bidimensionais de Nspt são o resultado do fatiamento bidimensional do modelo 3D de Nspt. A principio sugeriu-se 6 seções de Nspt que passassem nos furos de sondagem, contudo, como a variabilidade no terreno é grande, confeccionou-se mais seções não só de Nspt, mas de valores de recuperação e de resistividade elétrica, justamente para auxiliar na tomada de decisão da obra (projeto de fundações, contenções e escavação).

Todas as seções de Nspt foram convertidas para o formato CAD (dwg) para facilitar qualquer tipo de medição e ser mais usual entre os projetistas. A Figura 4.34 mostra uma seção Nspt de interesse, que passa entre os furos SM-13 e SM-18, nas seções bidimensionais ficam mais

evidente a variabilidade do terreno. Todas as outras seções de Nspt solicitadas estão em anexo no relatório.

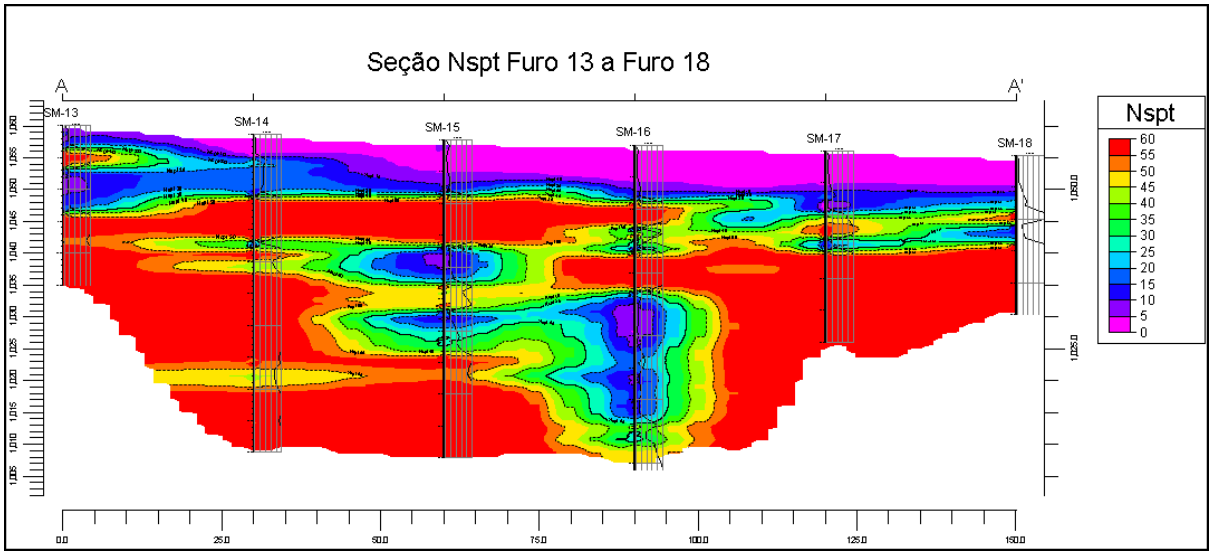


Figura 4.34 – Seção 2D de Nspt entre os furos SM-13 e SM-18 para o estudo de caso "Obra SAUN".

4.5.5- MODELO 3D DE RECUPERAÇÃO (%)

O modelo 3D de recuperação de rocha, apesar de seguir um critério de visualização bem parecido com o modelo 3D de Nspt, é um modelo bastante útil para outras finalidades, pois com ele pode-se fazer estimativa de quanto (volume) determinado material vai ser escavado. Nesse caso, pode-se estimar, por exemplo, o volume de rocha com uma dada faixa de valor de % de recuperação presente no terreno. A Figura 4.35 mostra o modelo 3D de valores de recuperação de rocha em porcentagem.

Ao criar os dados de recuperação (%) o seguinte critério foi adotado em função dos dados de Nspt usado na modelagem e em função dos dados obtidos nas sondagens mistas:

•Se o Nspt for menor que 45 o valor de recuperação é 1, este valor é o menor possível e deve existir apenas para que se possa realizar o modelo, adotar o valor zero (0), inviabiliza o processo de interpolação dos dados;

•Se o Nspt estiver entre 45 e 60 e não houver medida da % de recuperação usa-se para recuperação o valor 7;

•Se o Nspt for 60 e houver a % de recuperação usar o próprio valor da recuperação.

Com isso pode-se fazer uma avaliação da escavabilidade fatiando o modelo 3D resultante da interpolação desses dados, onde:

•De 0 a 5 - Facilmente escavável - escavável com equipamentos de terraplenagem;

•De 5 a 10 - Medianamente escavável - escavável com equipamentos de terraplenagem pesado;

•De 10 a 50 - Dificilmente escavável - escavável com equipamentos de terraplenagem pesado e uso de britadores e marteletes mecânicos;

•Maior que 50 - Não escavável - desmontado com uso de britadores marteletes e possivelmente com uso de explosivos.

A Figura 4.36 mostra um exemplo da utilidade desse modelo. Fez-se a estimativa de quanto deverá ser escavado em rocha da superfície até a cota 1040,5 m (cota de implantação), cujo total resultou em aproximadamente 10.000 m³ de rocha que apresenta a distribuição espacial visualizada na figura. Para facilitar, tabulou-se (Tabela 4.1) o total de cada faixa de valores de grau de recuperação estabelecido para o estudo de caso.

A pesquisa teve que esperar os resultados das escavações para saber se a previsão estava correta ou se estava aquém dos resultados da escavação. Contudo, de acordo com a gerência da obra, a previsão do valor de aproximadamente 10.000 m³ está muito próxima da realidade em campo, sendo que a obra não divulgou exatamente quanto retirou de rocha do local.

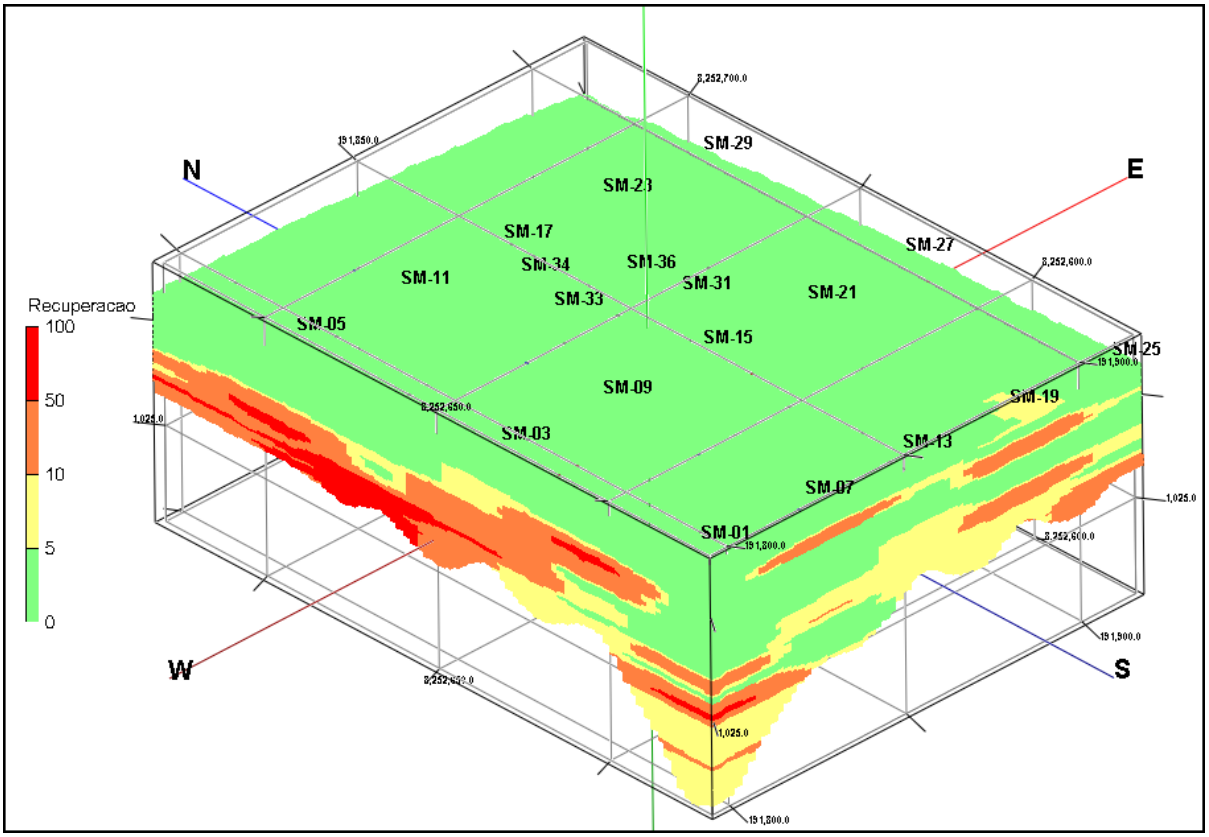


Figura 4.35 – Modelo 3D de Recuperação (%) para o estudo de caso "Obra SAUN".

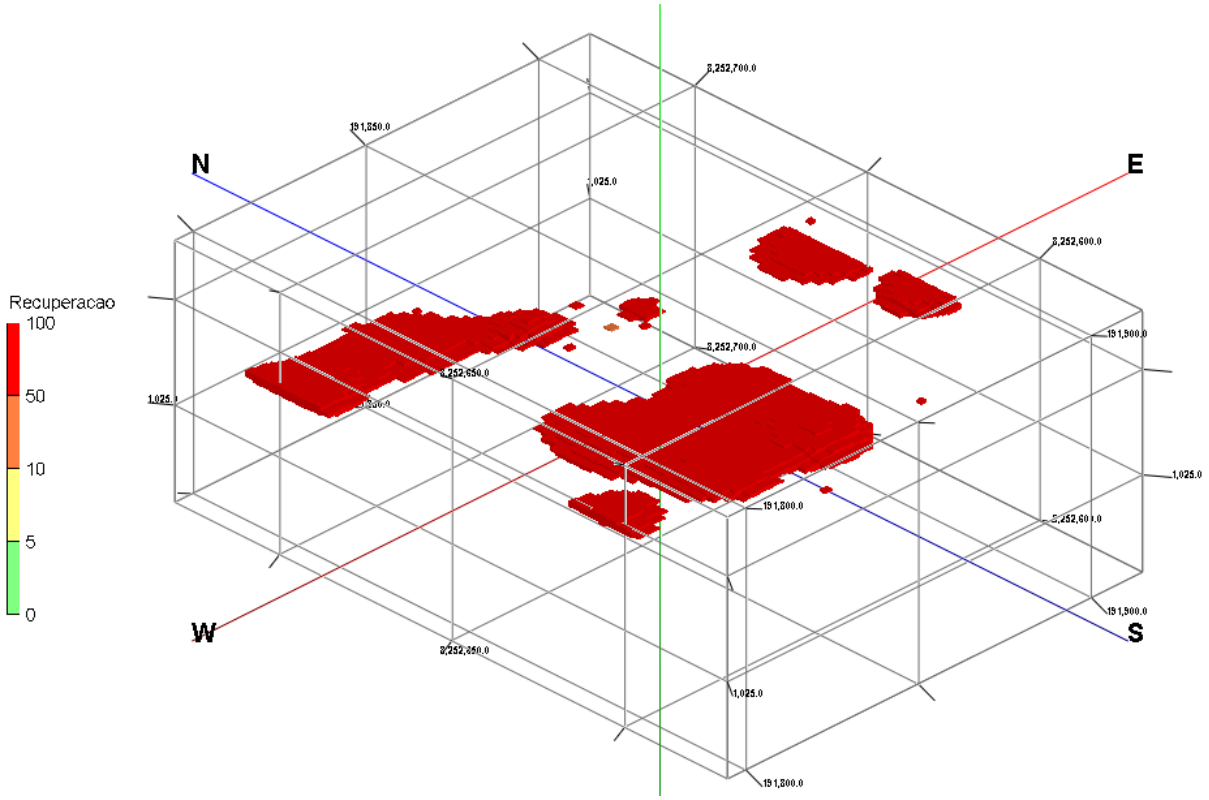


Figura 4.36 – Previsão de volume de rocha a ser escavada até a cota 1040,5m baseada no modelo 3D de recuperação (%) para o estudo de caso "Obra SAUN".

Tabela 4.1 – Previsão de escavabilidade (sem fator de empolamento) baseado no modelo 3D de Recuperação (%) até a cota 1040.5m para o estudo de caso "Obra SAUN".

Recuperação de 0 a 5%	Volume (m³) Total	177.044
Recuperação de 5 a 10%	Volume (m³) Total	50.424
Recuperação de 10 a 50%	Volume (m³) Total	96.202
Recuperação de 50 a 100%	Volume (m³) Total	9.262

4.5.6- DIAGRAMA DE CERCAS 3D (*FENCE* 3D) DE RECUPERAÇÃO (%)

Os diagramas de cerca 3D de recuperação (%) seguem a mesma ideia dos diagramas de cerca de Nspt, permitir melhor visualização do modelo 3D de recuperação, pois fatiam o modelo em várias seções 3D, o que auxilia na visualização interna do modelo 3D. A Figura 4.37 mostra o diagrama de cercas 3D de grau de recuperação (%).

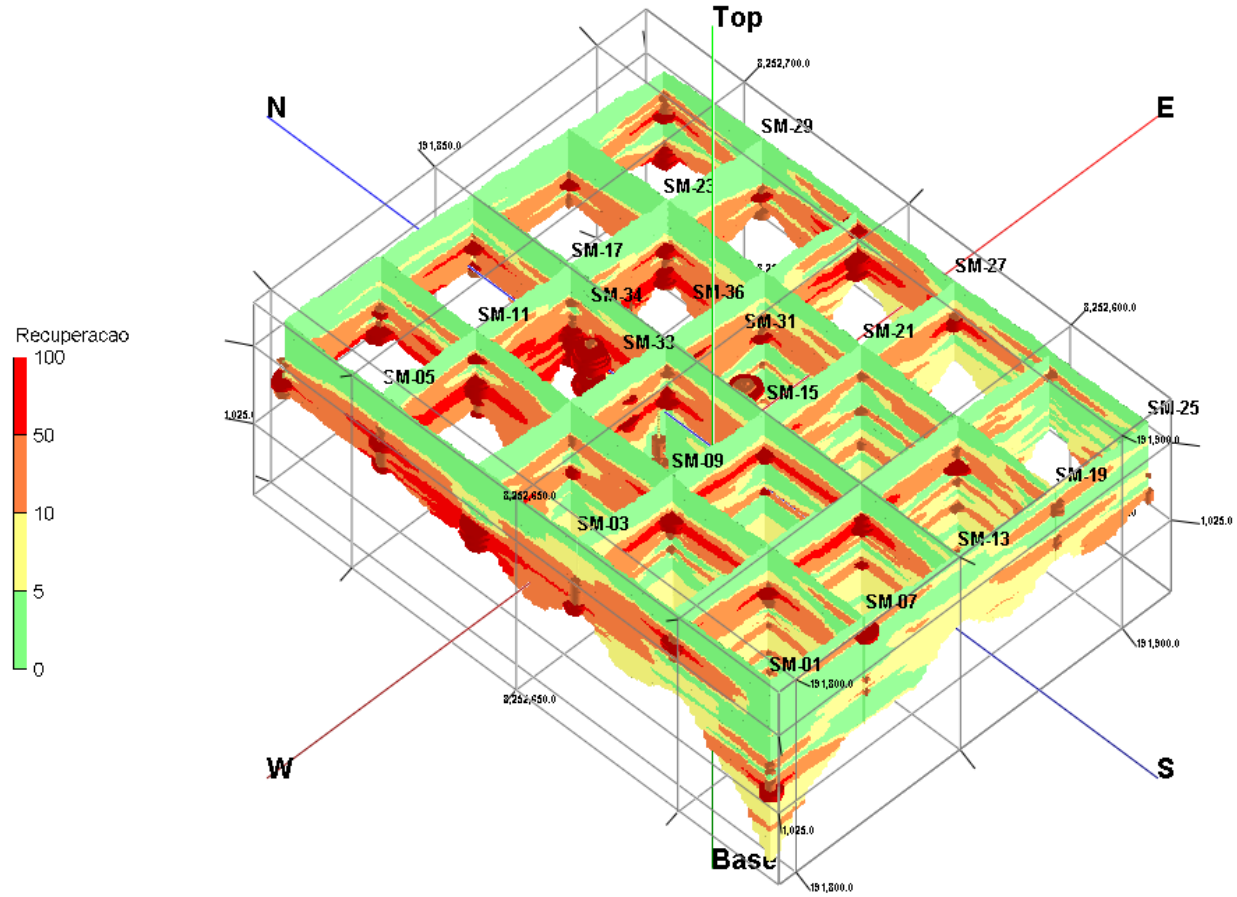


Figura 4.37 – Diagrama de cercas 3D (*Fence* 3D) de recuperação (%).

4.5.7- SEÇÕES BIDIMENSIONAIS (2D) DE RECUPERAÇÃO (%)

Seguindo a mesma metodologia das seções de Nspt, fatiou-se o modelo 3D de recuperação (%) nos mesmos locais onde se fatiou as seções 2D de Nspt. Adotou-se o mesmo critério para

os três parâmetros espacializados (Nspt, Recuperação e Resistividade elétrica). A Figura 4.38 mostra uma seção de interesse que passa entre os furos SM-13 e SM-18, as outras seções de interesse estão em anexo.

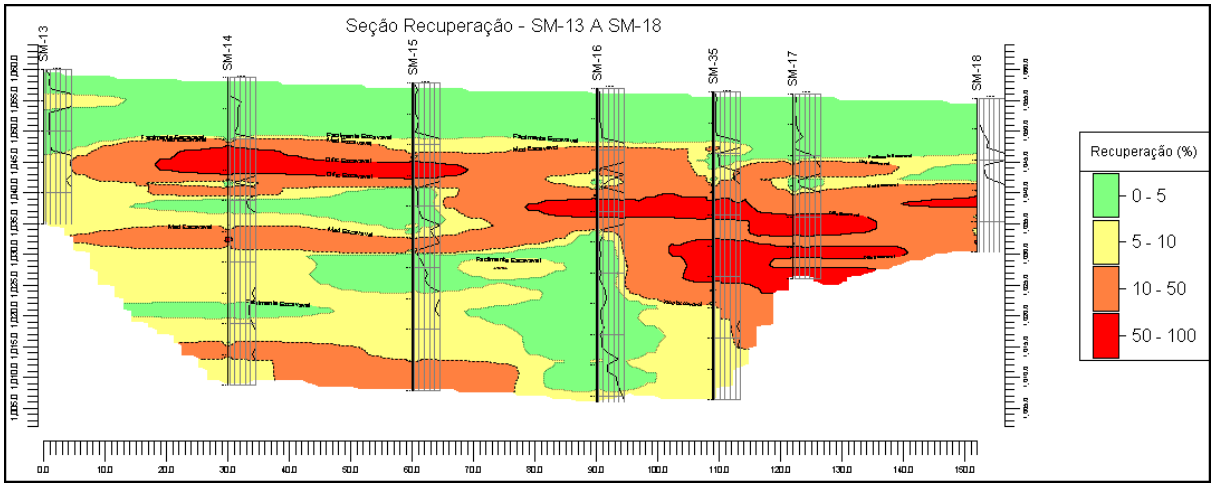


Figura 4.38 – Seção 2D de Recuperação (%) entre os furos SM-13 e SM-18.

4.5.8- MODELO 3D DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA (Ohm.m)

O modelo 3D de resistividade elétrica foi realizado a partir dos dados fornecidos pela própria SVC Construções S/A que contratou tal serviço geofísico. Os dados foram fornecidos de forma tabular em arquivo do tipo texto (txt). Tal arquivo texto contém aproximadamente 22.000 (vinte dois mil) pontos de sondagem geoelétrica, georreferenciados e processados pela empresa contratada para realizar tal serviço de levantamento geoelétrico.

O modelo 3D de resistividade desta pesquisa teve apenas a função de reproduzir os mesmos resultados alcançados pela empresa contratada para o serviço de levantamento geoelétrico. A finalidade desse modelo é fazer o cruzamento dos modelos obtidos com sondagem mista e o modelo geoelétrico a fim de elucidar o ambiente geológico/geotécnico que se mostrou complexo, de forma a evitar qualquer imprevisto para obra. A Figura 4.39 mostra o modelo 3D de resistividade elétrica espacializado.

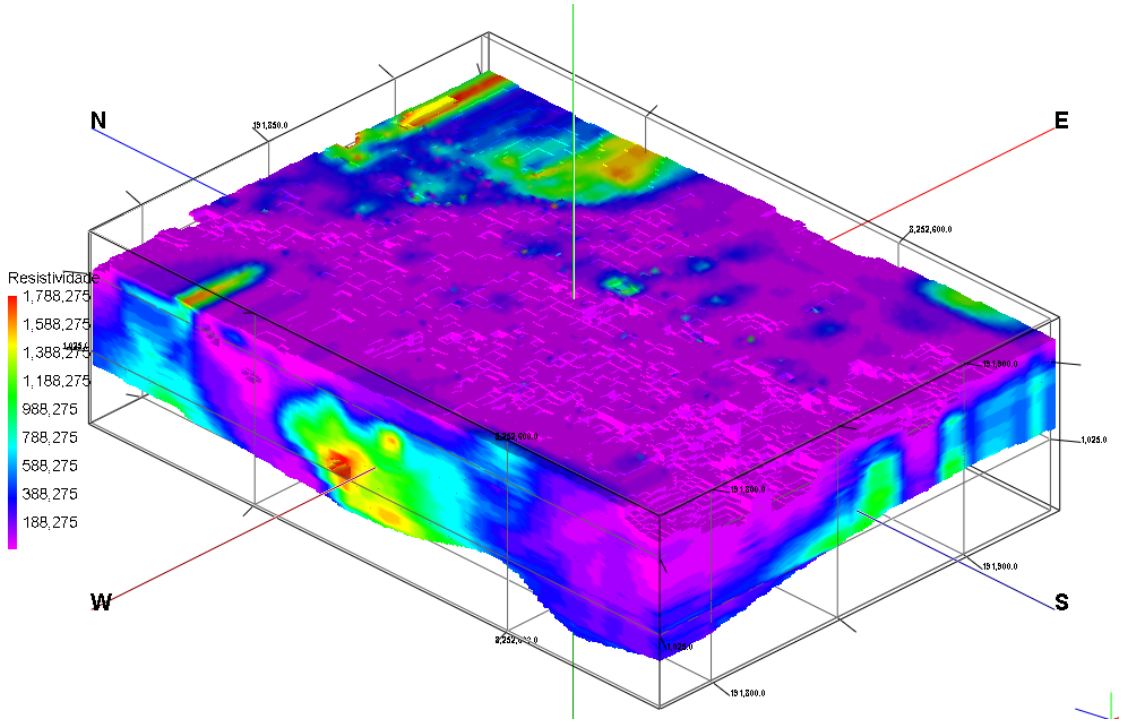


Figura 4.39 – Modelo 3D de Resistividade Elétrica (Ohm.m) para o estudo de caso "Obra SAUN".

4.5.9- DIAGRAMA DE CERCAS 3D (*FENCE* 3D) DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA (Ohm.m)

A Figura 4.40 mostra o modelo 3D de resistividade elétrica fatiado em seções 3D. O modelo de cercas foi ajustado para as profundidades correspondentes aos limites das sondagens, para que se possa comparar ou cruzar os modelos 3D de cada valor espacializado.

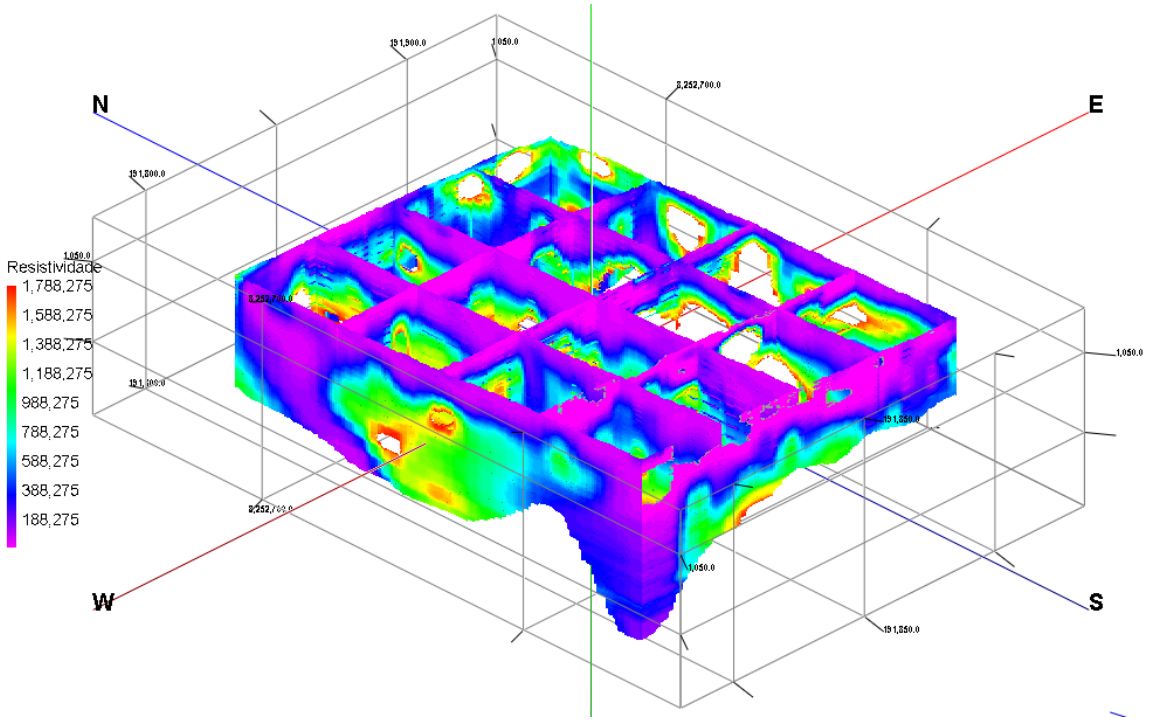


Figura 4.40 – Diagrama de Cercas 3D (Fence 3D) de Resistividade Elétrica (Ohm.m) para o estudo de caso "Obra SAUN".

4.5.10- SEÇÕES 2D DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Para complementar o estudo do terreno, utilizou-se a mesma metodologia de fatiamento das seções 2D de Nspt para confeccionar as seções de resistividade elétrica. A Figura 4.41 mostra uma seção de interesse que passa entre os furos SM-13 e SM-18. A pesquisa optou por classificar os valores de resistividade da seguinte forma:

- Resistividade de 0 a 1000 Ohm.m – Solo pouco resistente (solo argilo- arenoso);
- Resistividade de 1000 a 3000 Ohm.m – Solo medianamente resistente (solo siltoso);
- Resistividade de 3000 a 5000 Ohm.m – Saprólito;
- Resistividade de 5000 a 10000 Ohm.m – Rocha pouco alterada a rocha sã (quartzito);
- Acima de 10000 Ohm.m – Rocha sã.

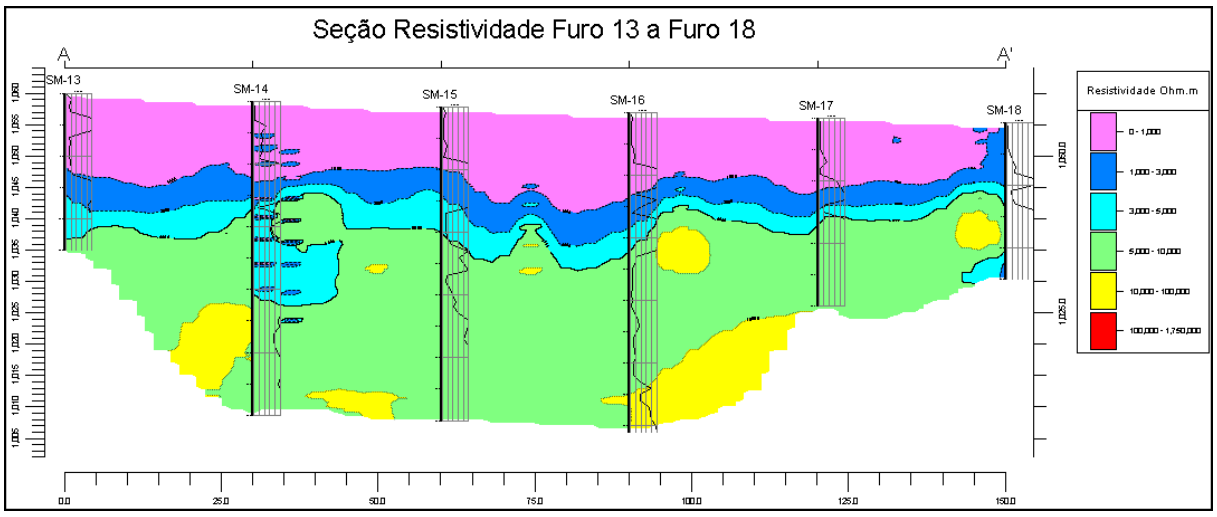


Figura 4.41 – Seção 2D de Resistividade Elétrica (Ohm.m) entre os furos SM-13 e SM-18.

4.5.11- FATIAMENTO HORIZONTAL DE VALORES DE Nspt E VALORES DE GRAU DE RECUPERAÇÃO (%)

Outro produto já comentado é o fatiamento horizontal dos modelos em várias camadas. Nesta obra, este produto serviu para conferir o trabalho realizado no projeto das fundações e para o controle das escavações, onde várias das fundações foram readequadas em função da análise desse produto. Obviamente que a obra solicitou vários fatiamentos em vários níveis diferentes a fim de acompanhar metro a metro as mudanças de valores de Nspt e de grau de recuperação da rocha. A Figura 4.42 mostra o resultado de um fatiamento horizontal de interesse para a obra, exatamente na cota 1040,5 m que é a cota de implantação da obra.

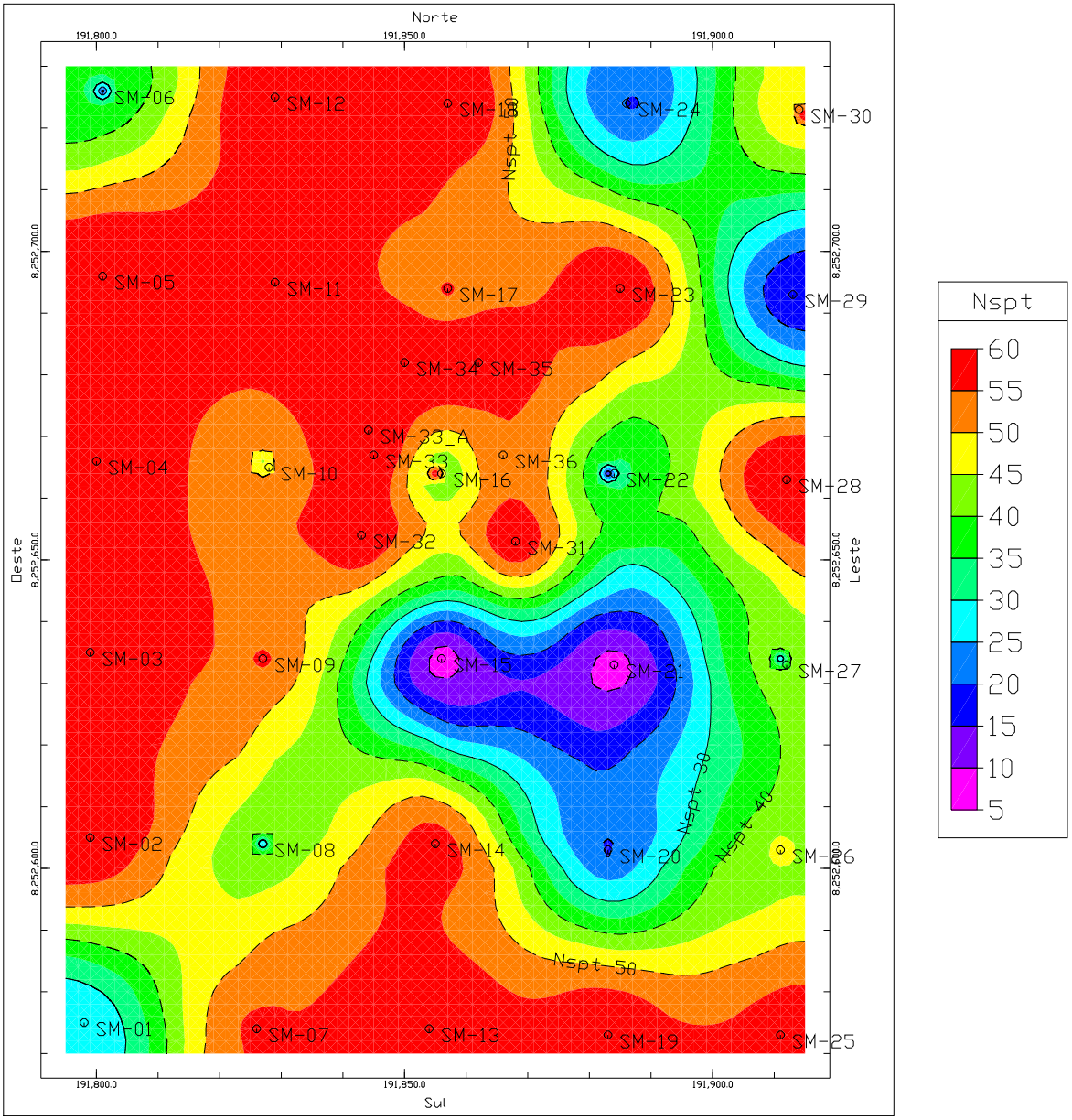


Figura 4.42 – Fatiamento horizontal de valores de Nspt na cota 1040,5 m do estudo de caso "Obra SAUN".

O mesmo trabalho foi realizado para os valores de grau de recuperação de rocha (%). É claro que não cabe aqui exibir mais de 60 fatiamentos desse produto, mas fica evidente a sua importância e aplicabilidade para esta obra. A Figura 4.43 mostra o resultado do fatiamento horizontal de grau de recuperação de rocha (%), também na cota 1040,5 m que é implantação da obra.

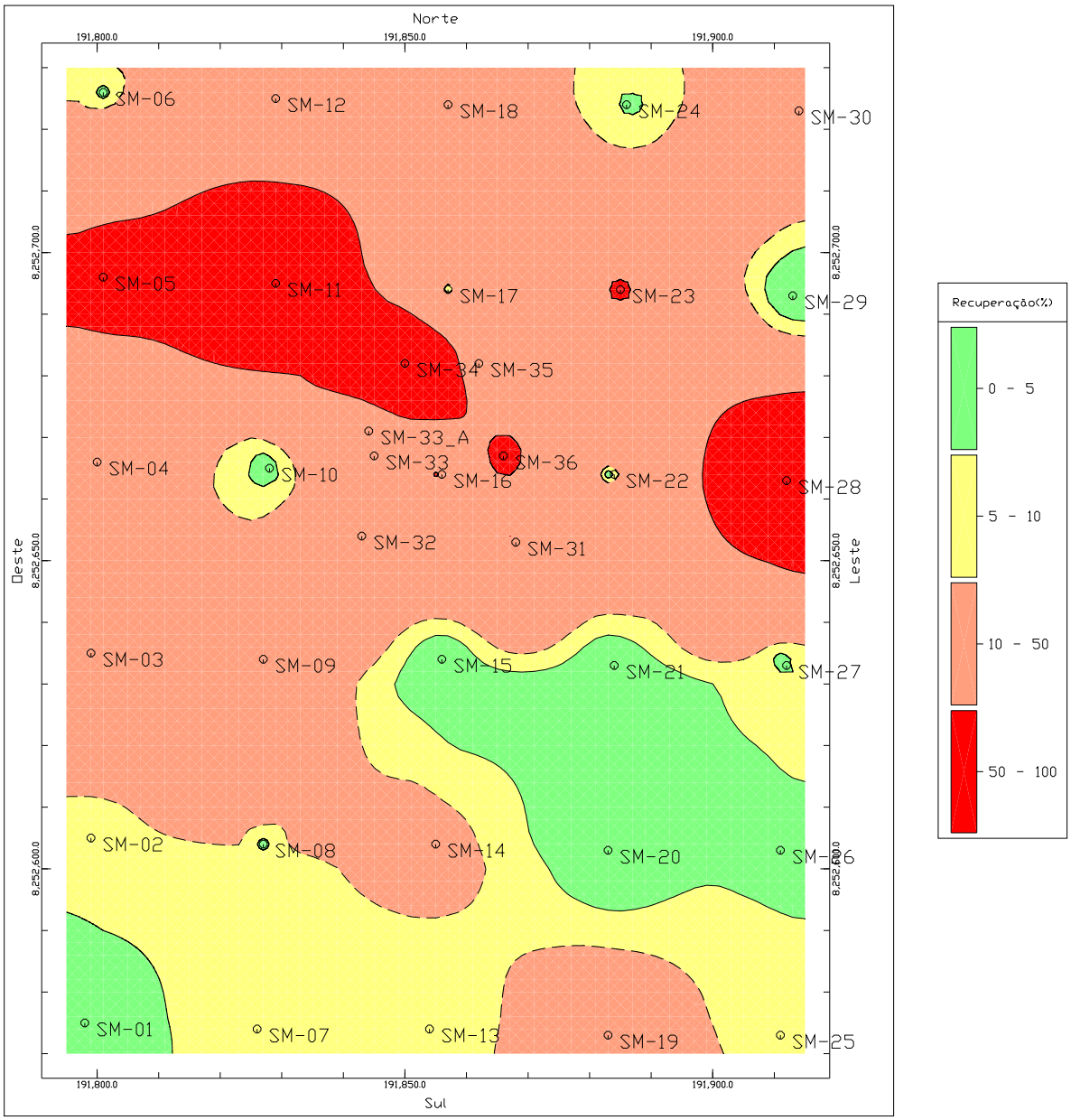


Figura 4.43 – Fatiamento horizontal de valores de grau de recuperação de rocha (%) na cota 1040,5 m do estudo de caso "Obra SAUN".

4.5.12- OUTROS PRODUTOS DERIVADOS

Um produto bastante apreciado pela equipe projetista da obra foi a espacialização de cada pilar da obra e a espacialização de todas as estacas das cortinas de contenção da escavação (ver Figura 4.44). No caso dos pilares, foi feito uma simulação do que seria a fundação da obra, como se cada pilar fosse uma única estaca na obra, esta simulação serviu para prever se o nível em que ficaria assentada a fundação correria algum risco de enfrentar algum problema geotécnico.

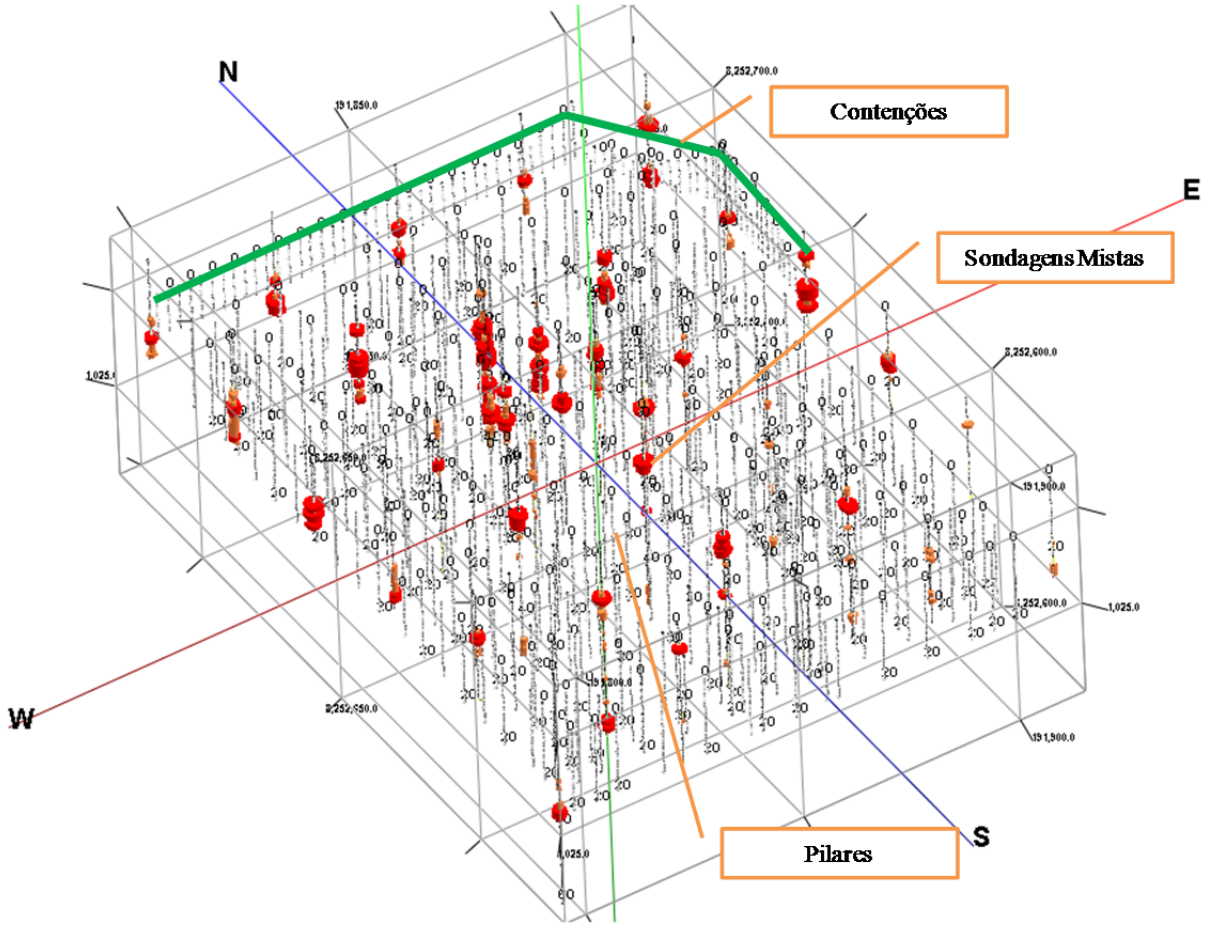


Figura 4.44 – Espacialização tridimensional das fundações e contenções do estudo de caso "Obra SAUN".

Com a espacialização dos pilares e das cortinas foi feita a sobreposição destes dados com os modelos de Nspt, grau de recuperação e resistividade elétrica. Um exemplo de resultado obtido com este método pode ser visualizado na Figura 4.45, que mostra um conjunto de seções verticais específicas e os respectivos pilares de interesse, que começam na cota 1040, 5 m (cota de implantação) e estendem-se até a cota 1020 m a pedido do projetista das fundações, pode-se observar na figura que alguns pilares enfrentariam sérios problemas geotécnicos até a cota 1020 m, mostrando a eficiência do modelo em prever situações graves e promover autonomia para tomada de decisões mais acertadas.

No caso da Figura 4.46 apresentada, as profundidades das estacas, desenhadas na referida figura, são as profundidades calculadas em projeto. O procedimento feito neste caso foi ajustar as estacas que estavam em regiões que poderiam enfrentar problemas geotécnicos maiores, basicamente o mesmo procedimento adotado no estudo de caso 1.

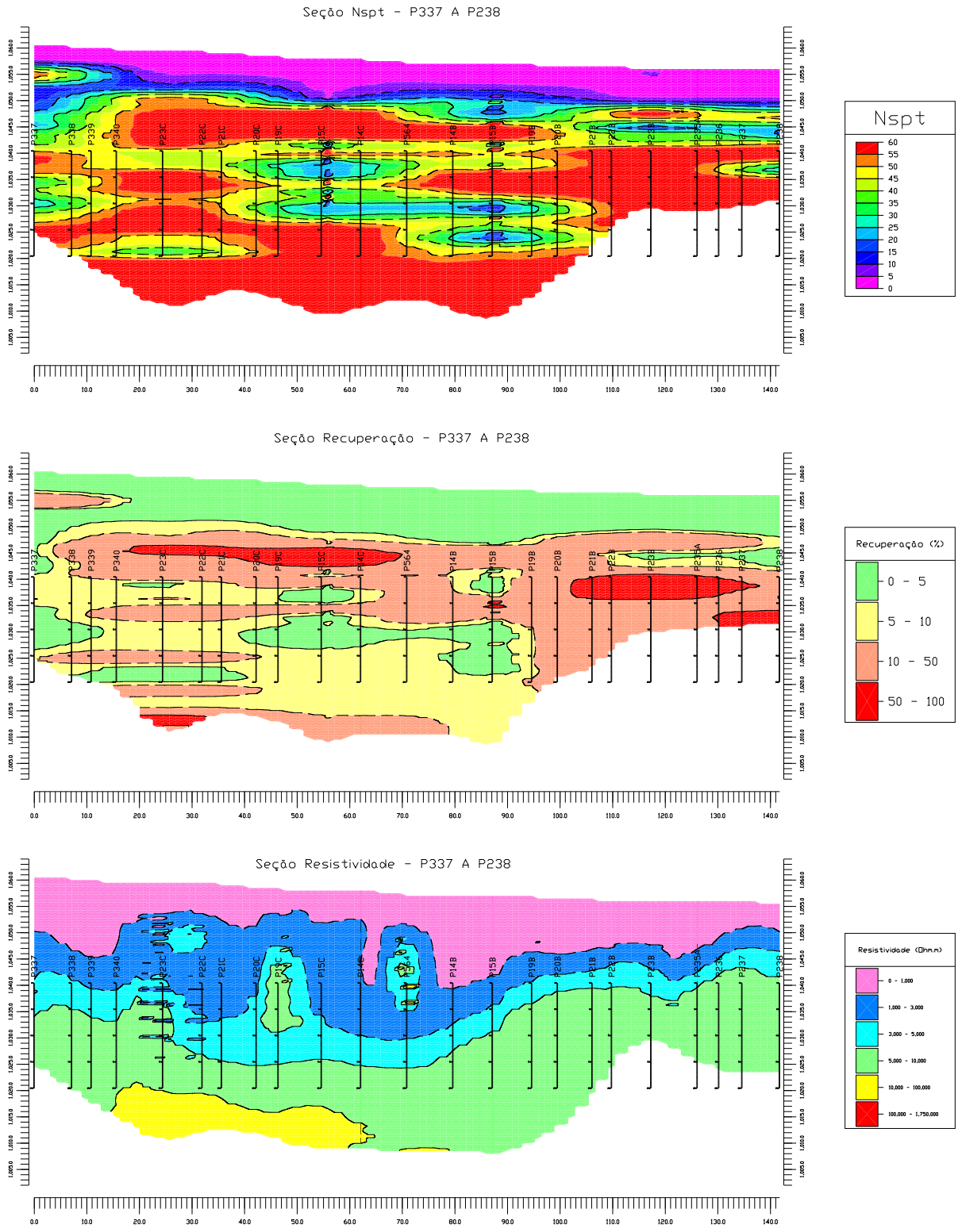


Figura 4.45 – Seções verticais de interesse com espacialização das fundações do estudo de caso "Obra SAUN".

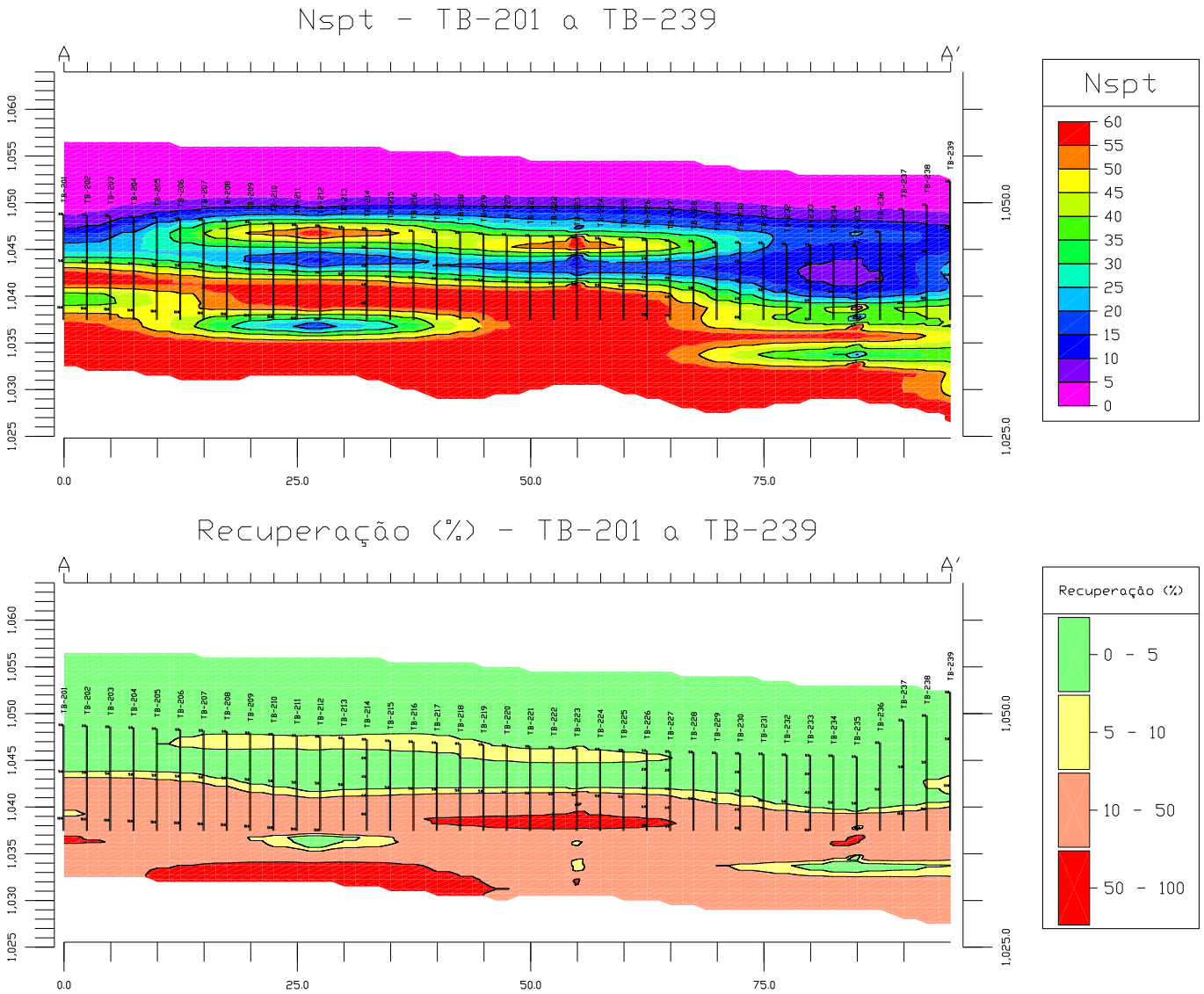


Figura 4.46 – Seções verticais de interesse com espacialização das cortinas de contenção do estudo de caso "Obra SAUN".

4.6- RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 3 – OBRA "VERANO - BLANC"

No estudo de caso 3 não houve aquisição de dados geofísicos, foram realizados apenas sondagens mecânicas tipo SPT. A justificativa para realização deste estudo de caso segue a mesma lógica dos outros estudos que é forte variabilidade do solo local, porém o estudo de caso 3 foi além da espacialização dos dados obtidos nos relatórios de sondagens e com o aproveitamento do conhecimento das empresas de fundações local e com dados de prova de carga realizados nesta obra, a pesquisa propôs um modelo tridimensional de capacidade de carga para a obra, baseado no tipo de fundação que seria realizado na mesma, que neste caso foi a estaca hélice contínua.

Segundo a empresa responsável pelo projeto de fundações, o método de calculo de fundação, que neste caso é a estaca hélice contínua, que melhor se adaptou à região é o método proposto por Decourt & Quaresma (1978). Com o acesso às planilhas de cálculo da empresa projetista, e aos resultados das provas de carga, a pesquisa realizou os modelos de prova de carga necessários para estacas com diâmetro de 50 cm e estacas com diâmetro de 60 cm.

Vale ressaltar que o objetivo da prova de carga era calibrar os resultados obtidos nos cálculos das fundações, visto que vários parâmetros de ajuste dos cálculos (como valores de α e β no método) foram adaptados pela empresa projetista, restando ao modelo apenas espacializar tais resultados. Ou seja, não foi objetivo da pesquisa revisar qualquer método de cálculo de fundação, mas mostrar que é possível realizar outros tipos de modelos tridimensionais e suas aplicabilidades em campo, da forma mais direta possível.

O primeiro resultado obtido para o estudo de caso foi a carta básica contendo as informações de locação dos furos de sondagem, a locação das obras "Verano" e obra "Blanc" que deram nome ao estudo de caso, e os valores de hipsometria do terreno. No caso desta obra, não houve compatibilização de *datum* e a obra não foi georreferenciada, ou seja, a modelagem foi realizada com base na referencia local, pois a obra optou por este tipo de referencia.

Pode-se observar na Figura 4.47 a carta básica com as informações referenciadas. Vale ressaltar que o terreno é relativamente plano, e posteriormente foi rebaixado 4 metros por meio de escavação para execução dos subsolos da obra.

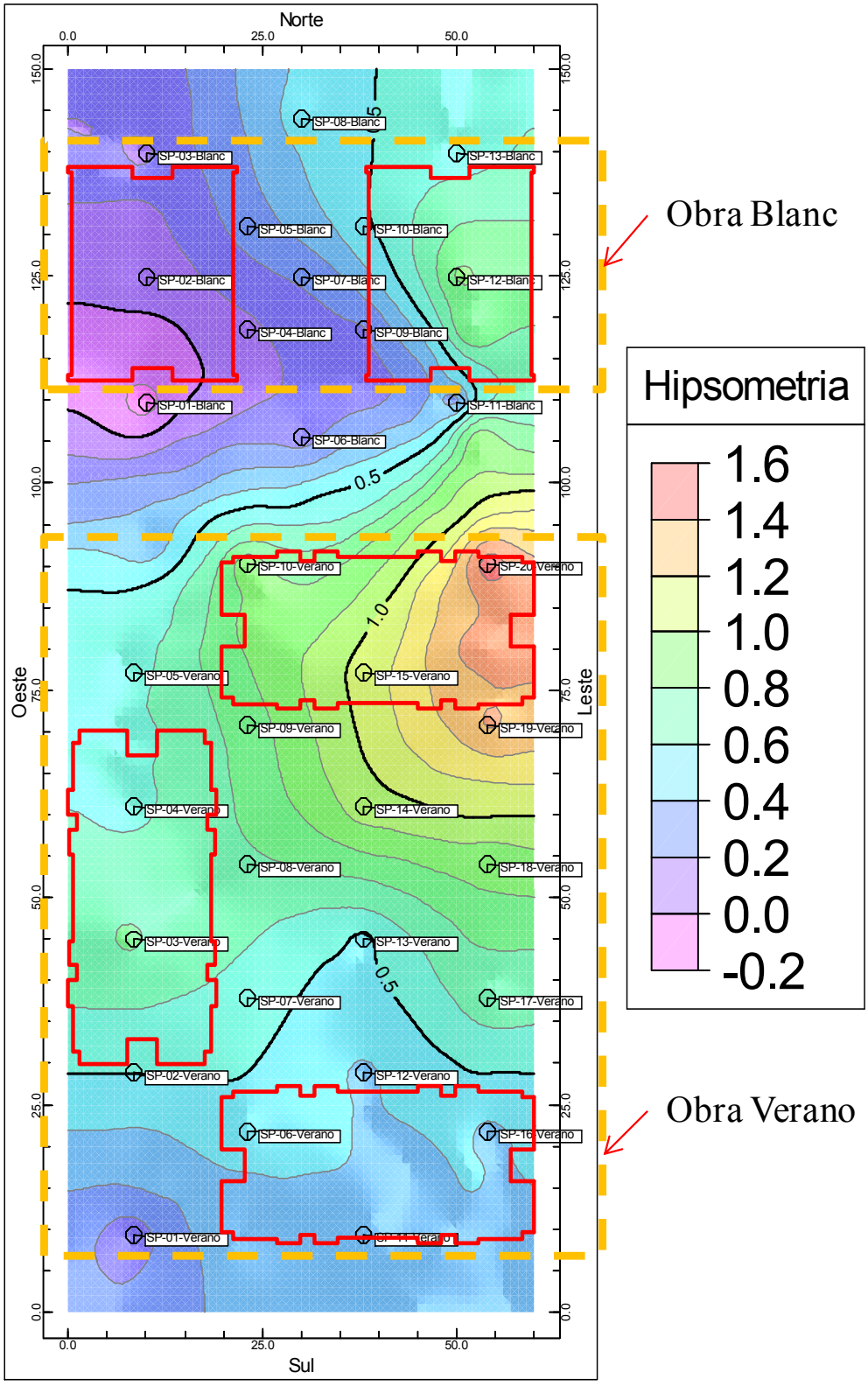


Figura 4.47 – Carta hipsométrica com a locação dos furos de sondagem SPT e locação das obras do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

4.6.1- CONTEXTO GEOLÓGICO DO ESTUDO DE CASO 3 – OBRA "VERANO - BLANC"

Com cotas topográficas em torno de 1090-1108 m esta área apresenta relevo aplanado. A Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo é o fator fundamental da evolução da paisagem local. À extensão interfluvial, entre os córregos Vicente Pires e Guará, afluentes da margem esquerda do Riacho Fundo, interessa especificamente à caracterização do presente ponto. O interflúvio entre o córrego Vicente Pires e o Guará é representado por relevo colinoso com topo de forma tabular e vertentes suavemente inclinadas para SW-W e NE-E em direção, respectivamente, aos fundos dos vales do córrego Vicente Pires e Guará (Figura 4.48). A rápida urbanização da área local implicou na construção de numerosos edifícios, promovendo a profunda alteração da paisagem.



Figura 4.48 – Localização do Córrego Vicente Pires e Córrego Guará.

No corte situado no encontro das vias de acesso ao Guará II e ao *Park Shopping*, nas proximidades do fundo do vale do córrego Vicente Pires, há uma exposição de rochas muito alteradas (Figura 4.49). No topo do relevo local o solo foi totalmente decapeado como consequência da intensa tecnogênese pela qual a área vem passando. Aí o sedimento pelítico

(siltito?) se apresenta profundamente alterado. Ainda assim mostra relictos da rocha original e também um distinto sistema de diáclases.



Figura 4.49 – Vista parcial do corte no encontra das vias que demandam o *Park Shopping* (edifício comercial) e o Guará II. Apresenta siltitos profundamente alterados (saprolito), laterizados, diaclasados.

As diaclases indicam a possibilidade de condicionamento tectônico do vale já que este parece exibir uma assimetria indistinta.

Os processos de intemperismo atuam mais intensamente ao longo dessas descontinuidades, as quais, não raro mostram um razoável grau de agregação dos materiais por óxidos e hidróxidos de ferro.

A rocha original, com baixo grau de metamorfismo, exibe apenas um brilho indistinto, provavelmente relacionado à presença de sericita.

As características litológicas, bem assim a situação geográfica desta ocorrência, sugere seu posicionamento na Fácies Ardósia (MNPpa), conforme ordem estratigráfica proposta por Faria (1995), Guimarães & Figueiredo (1997).

4.6.2- MODELO 3D DE SOLO

O modelo tridimensional de solo deste estudo de caso foi algo relativamente simples de realizar, a razão pode ser observada na Figura 4.50. Pode-se observar que a obra tem uma descrição estratigráfica simples com apenas três camadas de solo, sendo que a primeira camada de alguns centímetros é de aterro; a segunda, e que representa bem o solo local, é de argila arenosa vermelha, solo típico da região do DF; e a terceira camada, métrica, mas bastante localizada é composta de argila e pedregulhos.

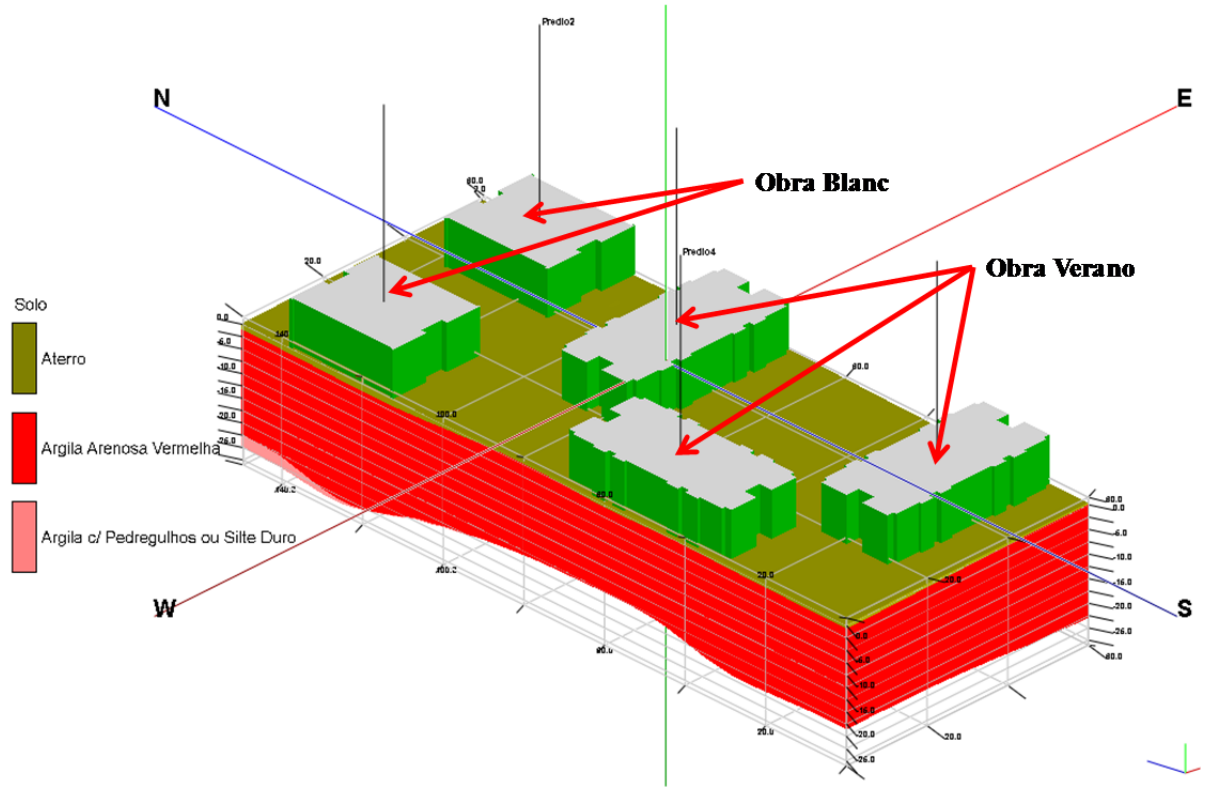


Figura 4.50 – Modelo tridimensional de solo com espacialização das edificações do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

Apesar da espessa camada de argila vermelha, o solo apresentou muita variabilidade nos valores de resistência Nspt o que justificou o desenvolvimento da modelagem para esta obra.

4.6.3- DIAGRAMA DE CERCAS 3D (*FENCE* 3D) DE Nspt

A Figura 4.51 mostra o resultado da espacialização dos valores de Nspt, já fatiados em diagrama de cercas 3D. Pode-se observar globalmente que aparentemente a transição de valores de Nspt no terreno da obra parece suave, contudo após avaliar várias seções de Nspt observou-se varias regiões da obra com valores alternados de resistência Nspt, valores localizados onde ora o solo apresentava baixa resistência Nspt ora alta resistência Nspt,

denominados neste estudo de caso como bolsões de solo mole (solo de baixa resistência Nspt), o que provocou uma série de problemas para a escavação das estacas hélice contínua, pois estes valores alternados entre solo de baixa resistência e alta resistência prejudicaram os equipamentos utilizados para a escavação das fundações, chegando-se ao extremo de trocar alguns equipamentos por falta de eficiência durante a escavação das estacas, denominado tecnicamente como "*pull down*" (força aplicada pelo equipamento durante a perfuração para vencer camadas de solo de alta resistência Nspt).

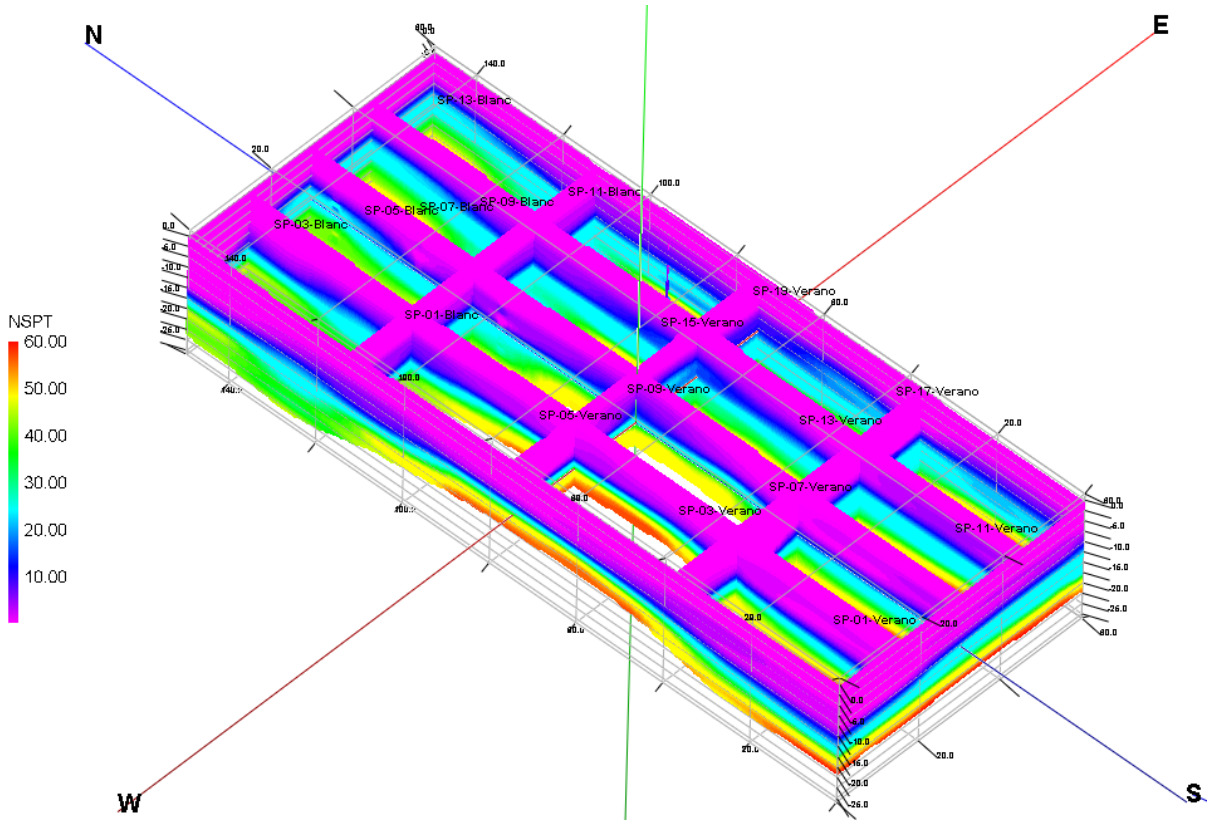


Figura 4.51 – Diagrama de cercas 3D de valores de Nspt do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

4.6.4- FATIAMENTO HORIZONTAL DE VALORES DE Nspt

Para detectar com mais precisão os locais com "bolsões de solo mole" foram realizados vários fatiamentos horizontais onde os valores em cor cinza representam valores de Nspt abaixo de 30 golpes (que não representam problemas para os equipamentos), os demais valores seguem com as cores exibidas na sequência das Figura 4.52 até Figura 4.62. O fatiamento foi feito levando em consideração que a fundação começaria 4 m abaixo do nível do terreno e que a fundação por estaca hélice contínua tem uma profundidade mínima de execução que no caso dos fatiamentos foi considerado a partir de 8 metros da escavação, ou seja, 12 metros abaixo do nível do terreno (4 metros de escavação + 8 metros mínimo para estacas hélice).

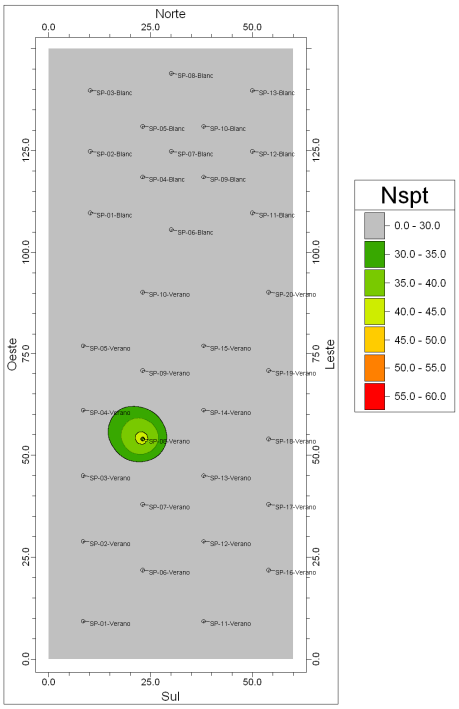


Figura 4.52 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 12 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

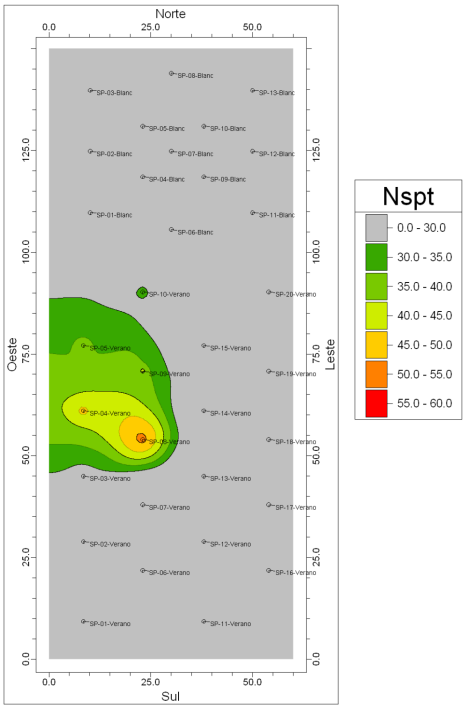


Figura 4.53 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 13 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

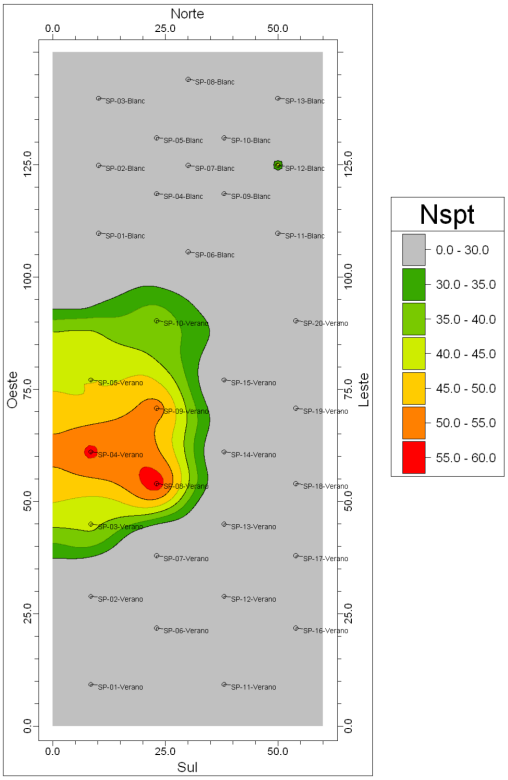


Figura 4.54 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 14 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

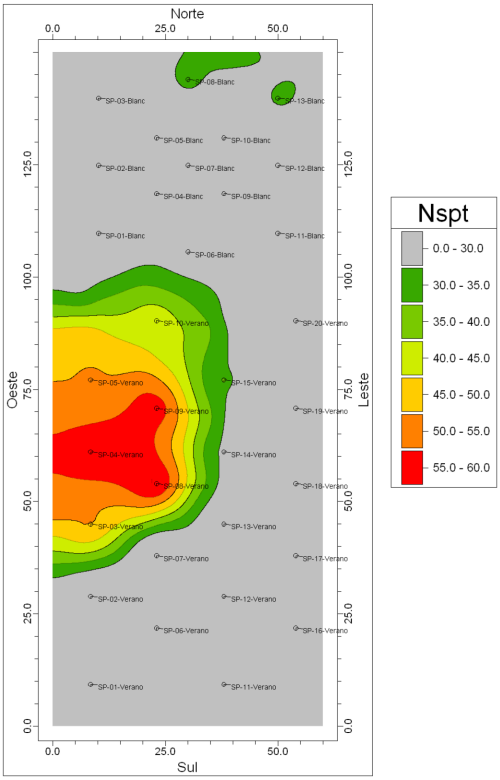


Figura 4.55 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 15 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

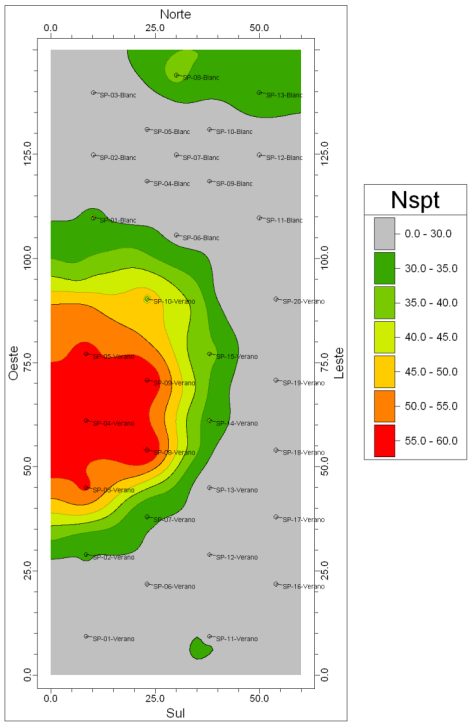


Figura 4.56 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 16 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

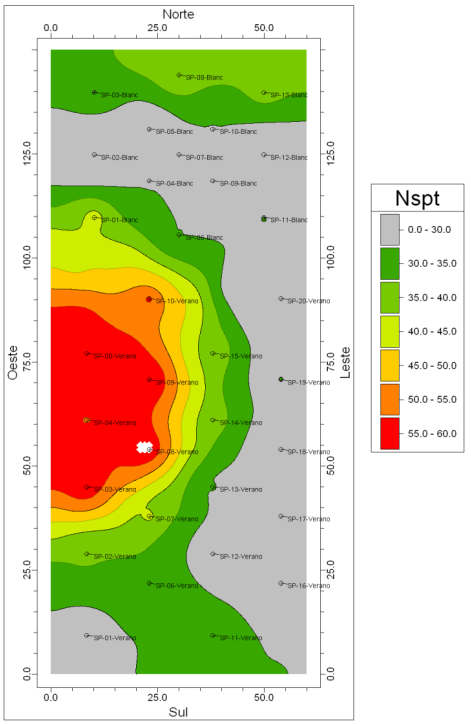


Figura 4.57 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 17 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

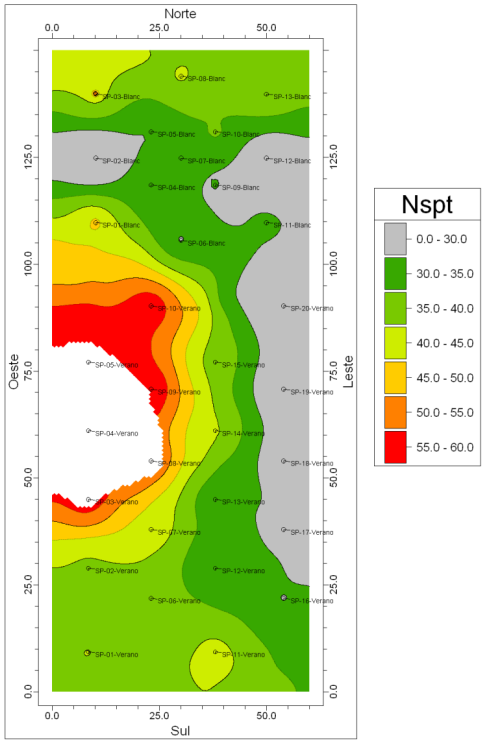


Figura 4.58 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 18 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

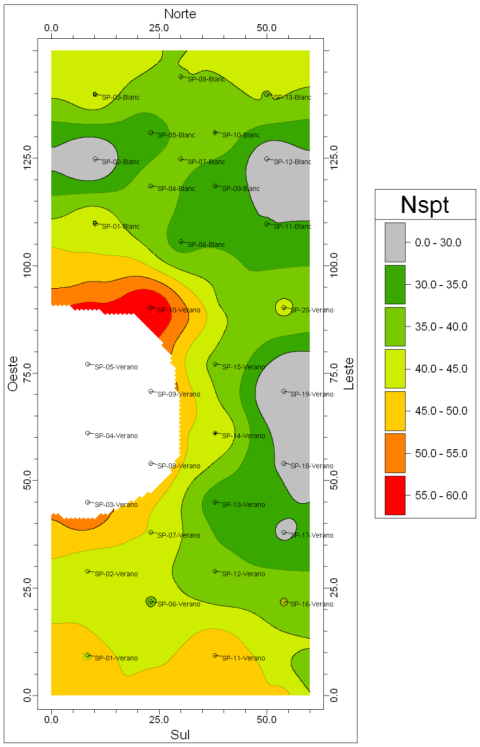


Figura 4.59 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 19 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

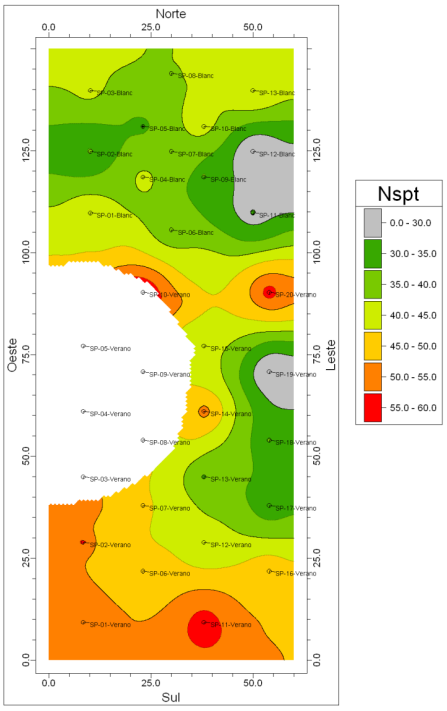


Figura 4.60 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 20 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

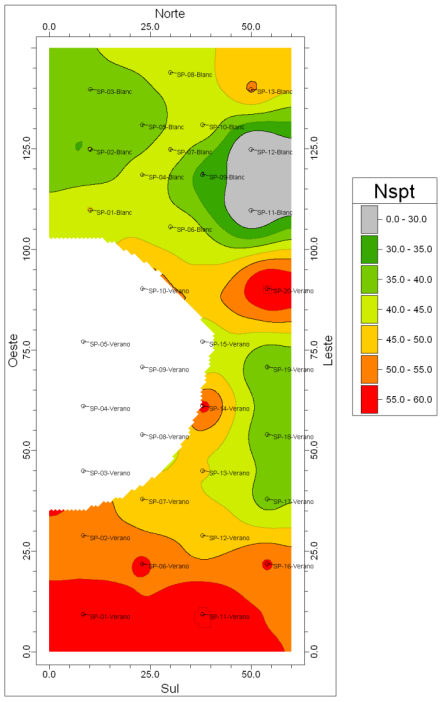


Figura 4.61 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 21 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

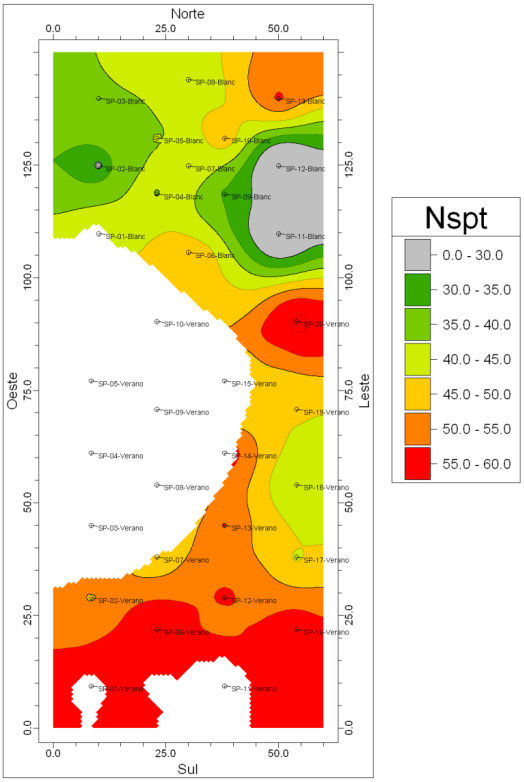


Figura 4.62 – Sequência de Fatiamento horizontal do Modelo de Nspt – Tomada de decisão para execução de estacas hélice contínua – 22 m de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

Pôde-se observar com esta sequência de fatiamentos que alguns locais da obra possuíam bolsões de solo de baixa resistência Nspt (valores em cor cinza) persistentes e que o projeto de fundações deveria contemplar tal fato. Foi partindo da análise deste problema que surgiu a ideia de construir um modelo de capacidade de carga para a obra e assim foi feito.

4.6.5- SEÇÕES BIDIMENSIONAIS (2D) DE Nspt

As seções bidimensionais de Nspt são o resultado do fatiamento bidimensional do modelo 3D de Nspt. Apesar da disponibilidade dos modelos para obra, notou-se bastante resistência com este produto, então se resolveu espacializar todas as estacas de interesse para a obra de forma a comparar os resultados obtidos com os métodos tradicionais de cálculo de fundações e o modelo. De fato o objetivo da pesquisa era mostrar, com o auxílio dos modelos, que a superfície resistiva do solo não é constante e que as estacas deveriam seguir um critério a mais, além dos tradicionais, e ajustar as profundidades obtidas nos cálculos, ou pelo menos levar esta observação em consideração durante a execução das estacas. A Figura 4.63 mostra a disposição de todas as estacas de interesse para a obra, com a locação das mesmas fez-se várias seções bidimensionais tanto de Nspt quanto de capacidade de carga que será comentado posteriormente.

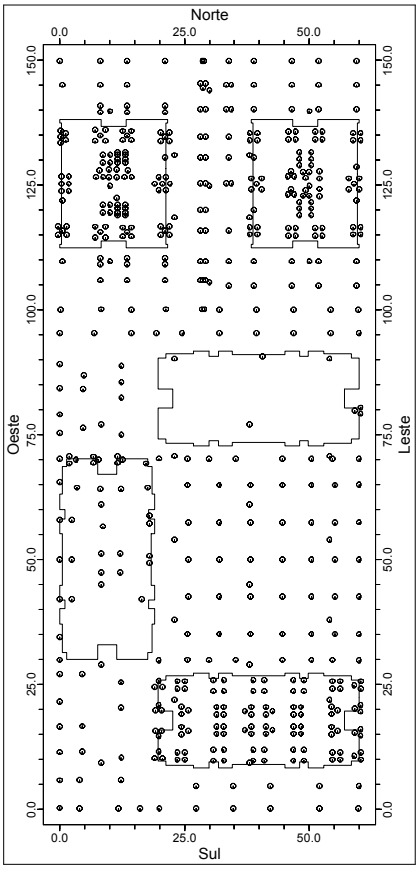


Figura 4.63 – Locação das estacas de interesse do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

Para que o projetista da obra pudesse perceber a variabilidade da superfície resistente, realizou-se várias seções bidimensionais de Nspt, inserindo em cada seção apenas a locação das sondagens mecânicas. A Figura 4.64 mostra o resultado de uma seção entre os furos SP-16 da obra Verano e o furo SP-13 da obra Blanc, pode-se notar que apenas valores acima de 30 golpes foram destacados em forma de isolinhas de valores de Nspt, isso porque valores abaixo de 30 golpes não representam problemas para os equipamentos de escavação das estacas.

Ficou bastante evidente que a superfície resistente era variável, mas para que o modelo pudesse ser mais convincente fez-se a sobreposição das estacas calculadas em projeto no modelo de Nspt e das estacas executadas também e posteriormente no modelo de capacidade de carga. A Figura 4.65 mostra o resultado deste sobreposicionamento em formato de seção vertical, neste caso foram realizadas várias seções de interesse para obra, e com isto pôde-se mostrar que várias estacas deveriam ser ajustadas, algumas não necessitavam atingir toda a profundidade de projeto e outras precisavam ir além da profundidade de projeto.

A confirmação da utilidade do modelo veio da própria obra, pode-se citar como exemplo a própria Figura 4.65 que mostra no perfil algumas estacas que foram executadas e as outras estacas do projeto que ainda seriam executadas. Com relação às estacas executadas foi confirmado que o equipamento (perfuratriz) trabalhou forçadamente após atingir 16 metros de profundidade (neste perfil), ou seja, era possível parar as estacas evidenciadas antes da profundidade projetada. E com relação às estacas a serem executadas (neste perfil) seria necessário readequar o projeto para que as estacas ficassem embutidas na profundidade correta, algumas acima do projetado outras abaixo da profundidade projetada.

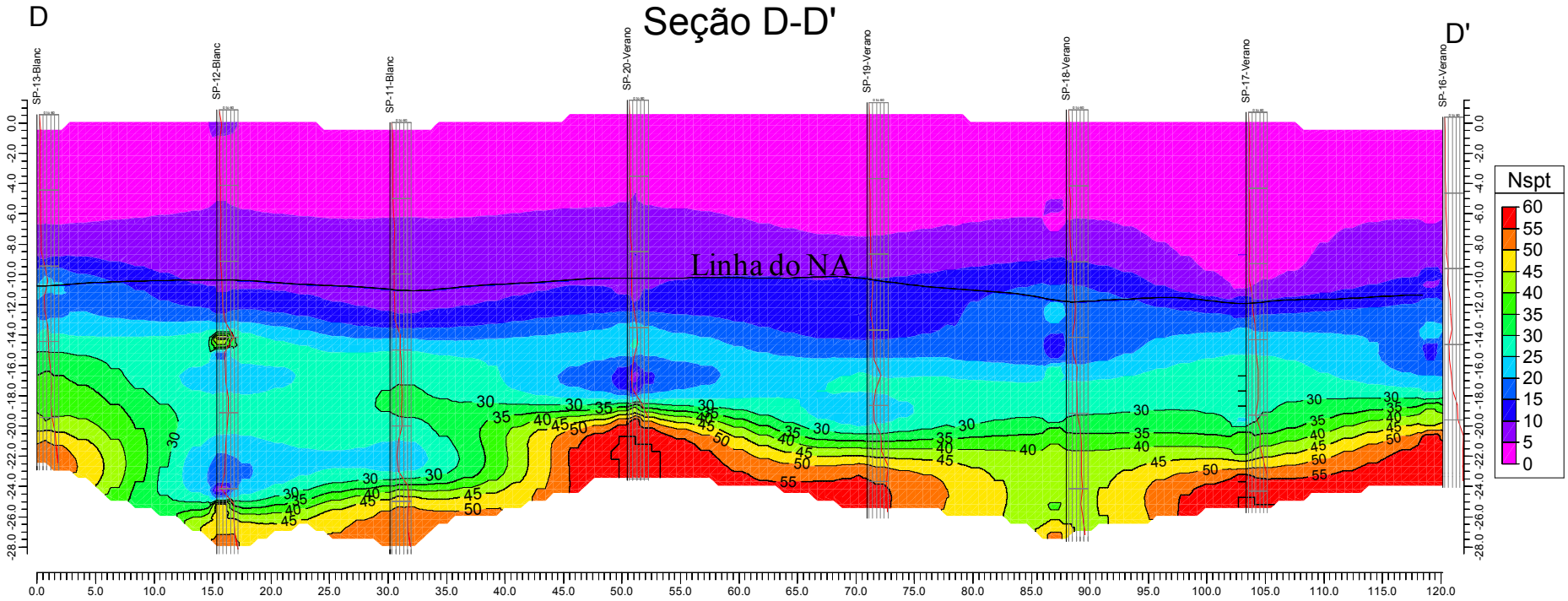


Figura 4.64 – Seções verticais de Nspt do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

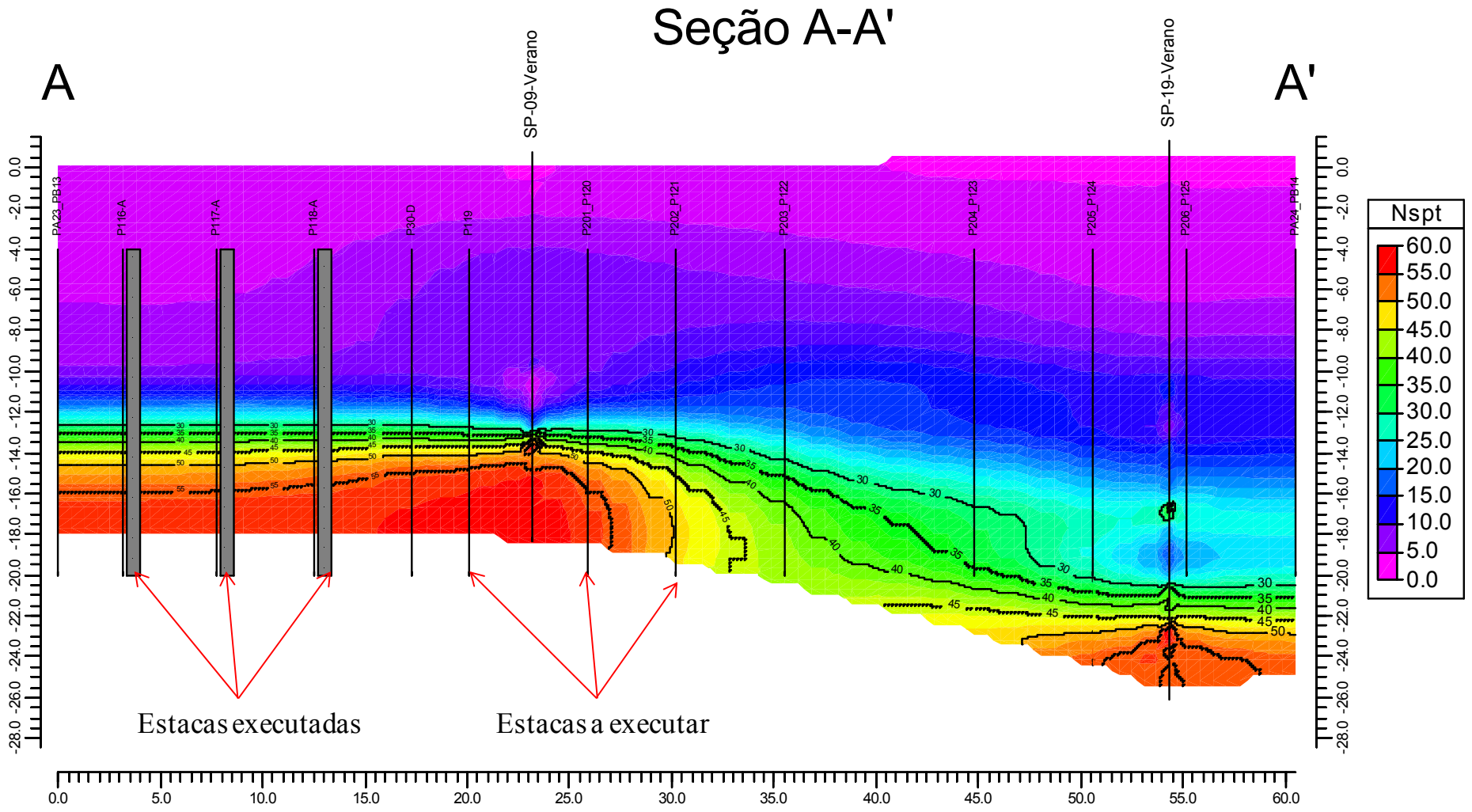


Figura 4.65 – Seções verticais de Nspt do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

4.6.6- DIAGRAMA DE CERCAS (*FENCE* 3D) DE CAPACIDADE DE CARGA

Como comentado, o modelo de capacidade de carga foi elaborado tomando como base os cálculos tradicionais de fundações, usando no caso desta obra o método de Decourt & Quaresma (1978). O modelo tridimensional de capacidade de carga, neste caso foi elaborado em duas fases, a primeira apenas espacializou os dados provenientes da planilha de cálculo, e a segunda fase foi a correção do modelo com base nos resultados de prova de carga.

Foram elaborados dois modelos de capacidade de carga em tonelada-força, um para estacas com diâmetro de 50 cm e outro para estacas com diâmetro de 60 cm. Apenas o modelo de capacidade de carga para estacas de 50 cm sofreu a correção de valores baseado nos resultados das provas de carga da obra, de forma resumida, o modelo tridimensional de capacidade de carga para estacas de 50 cm sofreu uma correção de + 20% nos valores apresentados nos cálculos.

A Figura 4.66 apresenta o diagrama de cercas 3D com os valores de prova de carga para o diâmetro de 60 cm. Para melhorar a observação do diagrama foi utilizada uma técnica que aplica um valor de deslocamento vertical que permite melhor visualização de cada seção (*vertical offset*). Como o programa computacional utilizado para a modelagem não tem muitas opções de cores (paleta de cores) o modelo de capacidade de carga fica muito parecido visualmente com o modelo de Nspt, de maneira que o mais prático para a obra foi a realização de várias seções verticais nas estacas de interesse para a obra.

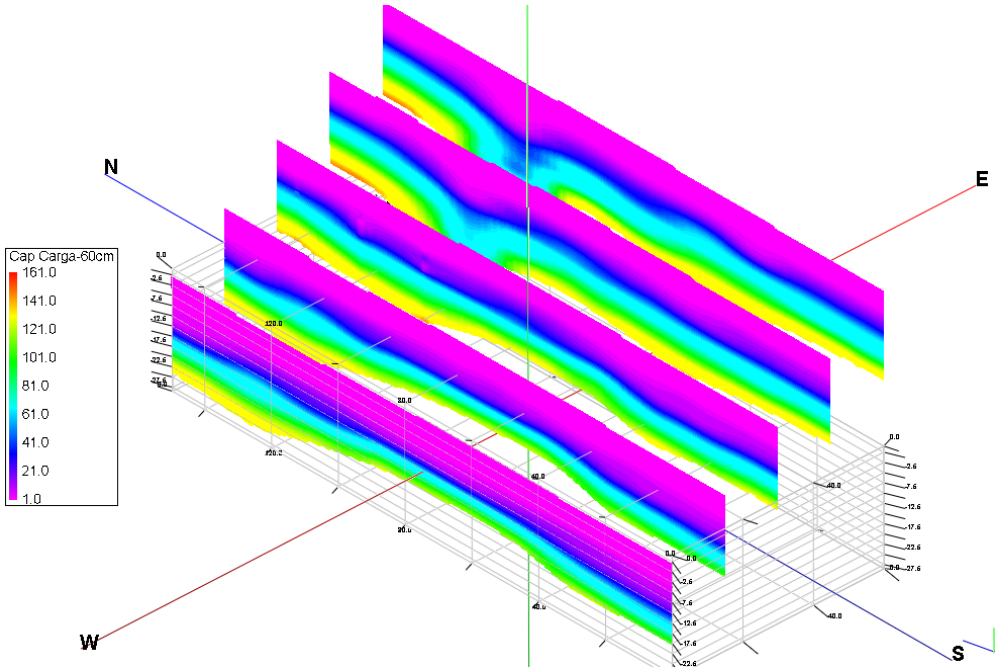


Figura 4.66 – Diagrama de cercas 3D de Nspt do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

4.6.7- SEÇÕES 2D DE CAPACIDADE DE CARGA (tf)

Em razão das condições de execução da obra em que duas empresas ficaram responsáveis por executar as fundações, evidentemente que houve resistência quanto ao uso dos resultados obtidos pelos modelos de capacidade de carga. Então, para facilitar as análises da obra, foram espacializadas todas as estacas de interesse para a obra, tanto as que foram executadas como as que estavam por executar. As maiorias das estacas de interesse que estavam por executar na obra tinham profundidade de 20 m (comprimento) e o diâmetro predominante de 50 cm para a maioria delas, cada estaca de 50 cm deveria atingir 100 tf de capacidade de carga, caso não atingissem seria necessário realizar o reforço da fundação.

O objetivo das seções 2D de capacidade de carga foi a priori apenas realizar o controle de profundidade alcançada pela execução à pedido da empresa projetista da fundação, mas tomou novos rumos quando várias estacas começaram a apresentar problemas durante a escavação. A Figura 4.67 mostra uma seção de interesse para a obra em que algumas estacas apresentaram problemas de execução.

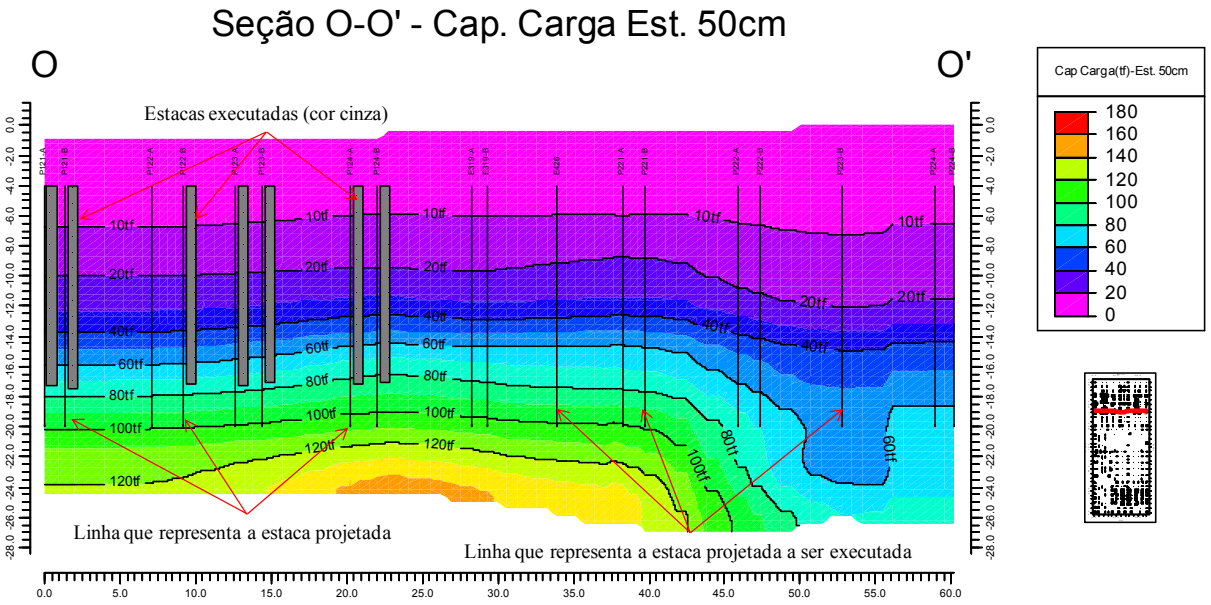


Figura 4.67 – Seção O-O' de capacidade de carga do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

Pode-perceber na Figura 4.67 que várias estacas que deveriam atingir 100 tf de capacidade de carga não atingiram o referido valor, parando bem antes do valor projetado. Estas estacas apresentaram problemas de capacidade de carga que foi confirmado com a execução do ensaio de prova de carga em algumas delas. De fato o modelo foi confirmado com a execução dessas provas de carga nas estacas problemáticas que retornaram resultados muito próximos aos resultados obtidos diretamente no modelo de capacidade de carga.

Além disso, a Figura 4.67 mostrou que a superfície resistente não é plana, mas sim variável e que na região do DF pode apresentar variabilidade grande em um curto espaço, como pôde-se perceber na referida figura que o perfil de capacidade de carga muda bruscamente num curto intervalo de aproximadamente 10 m, mostrando que em muitos casos os métodos tradicionais de cálculo devem ser readequados para atender as condições locais.

As Figura 4.68 e Figura 4.69 evidenciam mais o conceito de superfície resistente e mostra a intensidade com que o perfil de capacidade de carga muda com a variabilidade do maciço de solo e a influência dessa variabilidade no comprimento de cada estaca projetada e executada que passam por estes perfis. Evidentemente que a empresa projetista, com tais modelos em mãos projetou as estacas levando em consideração a variabilidade do perfil, mas ao contrário do que se pode pensar não foi realizada adequação de comprimento estaca por estaca, o que foi feito de fato foi a análise conjunta dos métodos tradicionais, dos modelos de capacidade de carga e a adequação de comprimento de estacas em grupo, para não inviabilizar a execução. Deve-se levar em consideração, que cada método e modelo tem seu próprio erro e que a obra deve sempre trabalhar com segurança.

Após a confirmação da qualidade do modelo, foram realizadas várias seções verticais de capacidade de carga nos modelos para que se pudesse ter o controle total da execução de cada estaca da obra. Com os ajustes de profundidade de cada grupo de estacas a obra executava cada grupo, realizava a sobreposição dos resultados obtidos em campo no modelo e posteriormente realizava a tomada de decisão que consistia basicamente em fazer algum tipo de reforço ou não em função da profundidade alcançada pela execução.

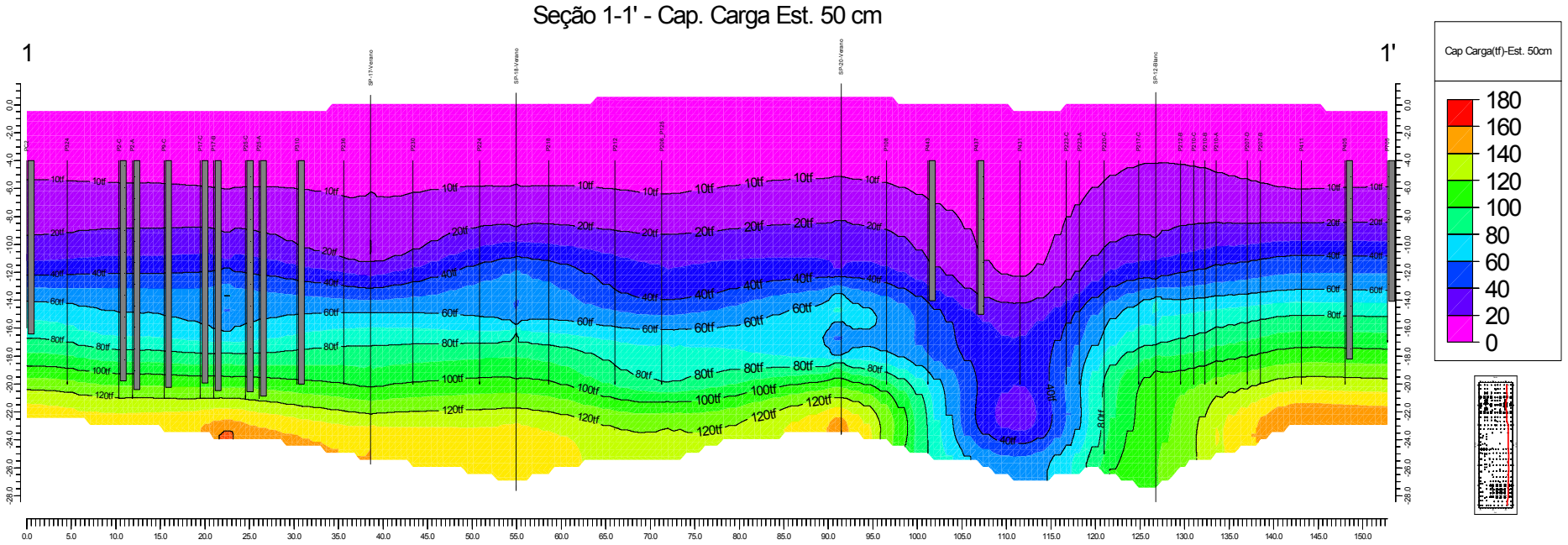


Figura 4.68 – Seção 1-1’ de capacidade de carga do estudo de caso “Obra VERANO-BLANC”.

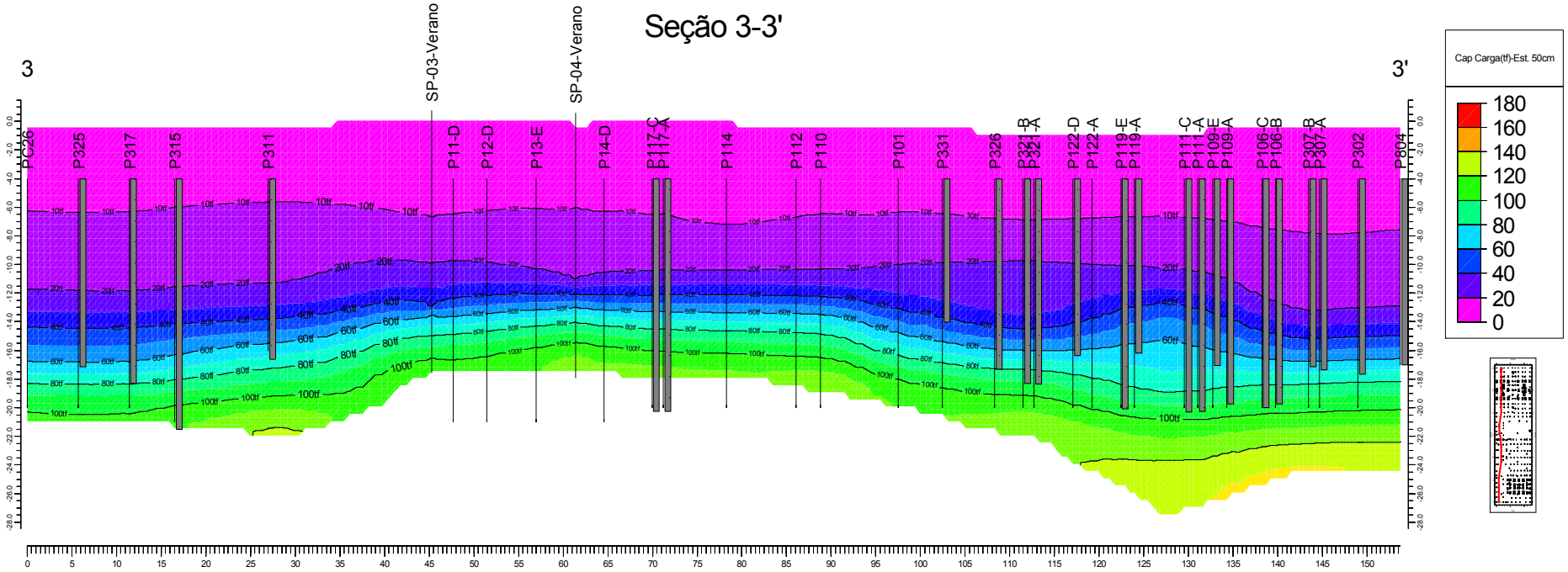


Figura 4.69 – Seção 3-3’ de capacidade de carga do estudo de caso “Obra VERANO-BLANC”.

4.6.8- SEÇÕES HORIZONTAIS 2D DE CAPACIDADE DE CARGA

As seções horizontais 2D de capacidade de carga apesar de não terem sido apreciadas pela gerência e pelas empreiteiras, em específico, são bastante úteis para visualizar os resultados de forma geral.

Para se ter noção da variabilidade da superfície resistente, serão exibidos dois resultados. A Figura 4.70 mostra a superfície de capacidade de carga (tf), para estacas de 50 cm de diâmetro a 16 metros de profundidade e a Figura 4.71 mostra a superfície de capacidade de carga a 20 metros de profundidade, estas são na realidade o que pode ser considerado como superfícies 2,5D. A escolha da profundidade de 16 metros deve-se ao fato de que várias estacas não conseguiram avançar para além dessa profundidade e a escolha por fatiar o modelo em 20 metros de profundidade deve-se ao fato de que é uma profundidade próxima ao limite de profundidade de escavação do equipamento, o que também serve para mostrar que por mais que o equipamento tenha a configuração necessária para realizar a obra nem sempre é possível realizá-la em função das outras variáveis que compõem o problema.

Pode-se observar o quanto a superfície resistente pode variar na obra e como os modelos podem ajudar na análise do problema e na busca de soluções mais eficientes para a obra.

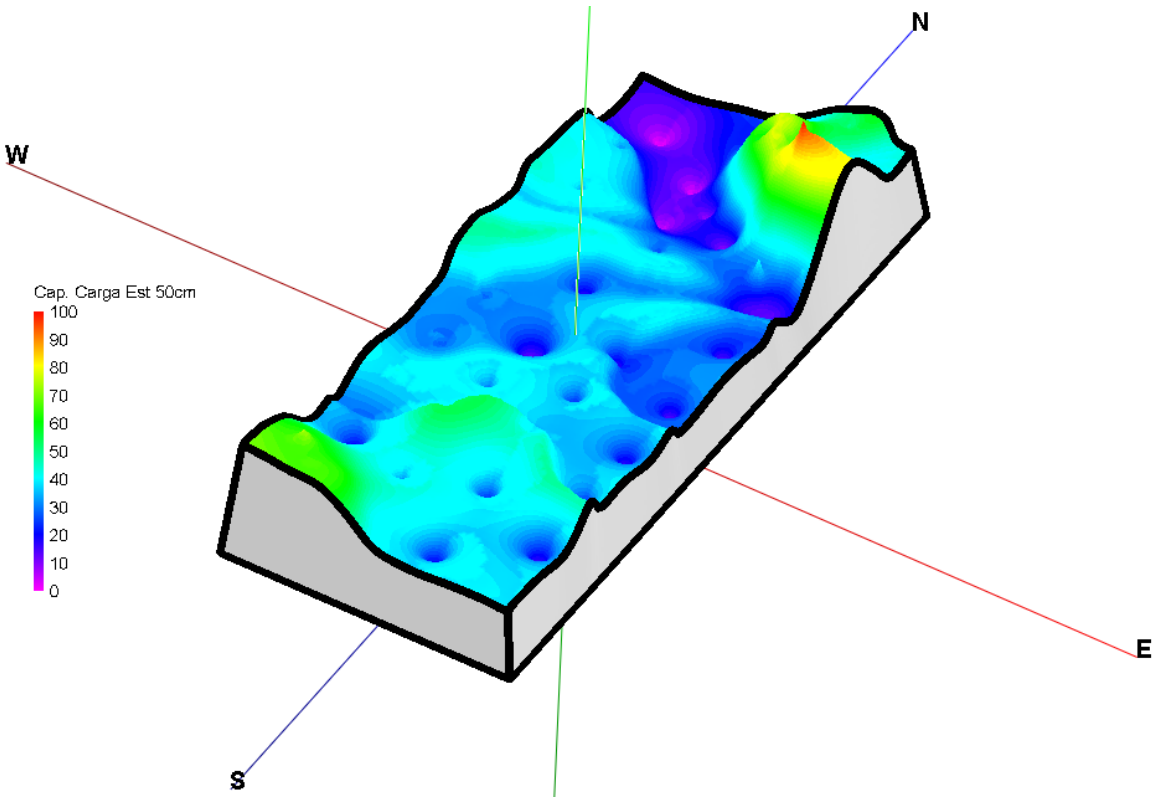


Figura 4.70 – Seção horizontal de capacidade de carga a 16 metros de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

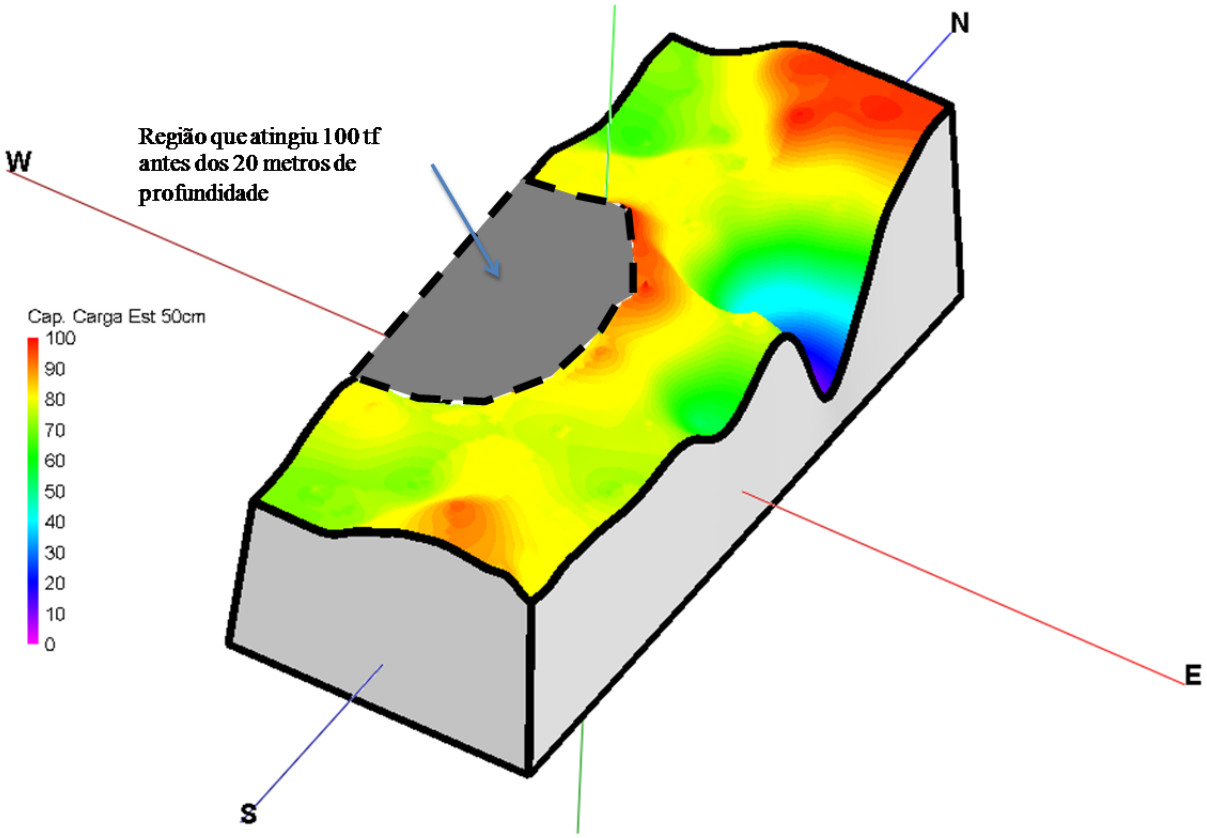


Figura 4.71 – Seção horizontal de capacidade de carga a 20 metros de profundidade do estudo de caso "Obra VERANO-BLANC".

4.7- RESULTADOS DO SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA

4.7.1- CONTEXTO GEOLÓGICO DO SETOR NOROESTE DE BRASÍLIA-DF

Nesta área foram feitas seções ao longo de alguns dos caminhos até então existentes, anteriormente ao processo de transformação urbanista ao qual a área tem sido submetida.

O relevo local é aplanado, mas se observa uma depressão suave com inclinação geral no sentido NE, conformando-se, portanto, com a inclinação da vertente direita do braço noroeste do Lago Paranoá (Lago Norte). Essa depressão insinua a forma de um colo suave, forma comum nas chapadas da Região Centro Oeste.

Ocupada desde longa data, a vegetação local da área apresenta notável grau de antropisação. Vários resquícios de antigas residências são encontrados, aos quais se associam uma vegetação exótica. Além da alteração provocada pela ação humana devem ser destacadas algumas clareiras colonizadas por ciperáceas. Outros pontos da área exibem tufos de formações florestais, os quais merecem investigação detalhada, visando correlacionar os solos com o conteúdo litológico. A forma de implantação da ocupação urbanade Brasília, notadamente pelo Plano Piloto, induziu ao desenvolvimento de processos erosivos intensos, tomando-se aqui como paradigma aquela aqui denominada Boçoroca do Noroeste (Figura 4.72).

Trata-se de um sulco aproximadamente linear, descontínuo, medindo cerca de 1600 metros, orientado, segundo SW – NE, aproximadamente. Foi desenvolvido a partir dos fluxos pluviais provenientes do Setor Militar Urbano. Em alguns locais o sulco apresenta mais de sete metros de profundidade, porém sua largura é reduzida, não superando quinze metros. Apresenta paredes verticais já tendo atingido o freático livre nas áreas mais profundas. Os materiais produzidos nesta incisão foram depositados em direção à área já urbanizada da cidade, formando um leque que em planta lembra a forma de um cone de base estreita, apontando para NE.



Figura 4.72 – Boçoroca do Noroeste – Evolução – 2002 – 2011.

Ao longo do canal são depositados fragmentos de rochas poligênicos, assim como diversos artefatos produzidos na área urbana da Cidade. Nas fases distais dos fluxos aquosos subaéreos se formaram bacias de decantação as quais se encontram preenchidas por espessos depósitos de argila. Quando submetidos ao rotineiro processo de dessecação essas argilas exibem um conspícuo gretamento. As gretas podem ter diferentes formas e diâmetros. Não raro o espaçamento entre algumas gretas individuais pode medir 15 cm de largura (Figura 4.73).



Figura 4.73 – Leque de deposição de sedimentos da Boçoroca do Setor Noroeste.

Observa-se, portanto, uma clara diminuição granulométrica, desde as cabeceiras da boçoroca, até as bacias de decantação, onde a energia dos fluxos é dissipada.

Na área de influência desses depósitos há o desenvolvimento uma vegetação exótica, destacando-se a espécie eucalipto (ver o nome científico).

Próximo à caixa d'agua da Caesb lajedos, blocos e afloramentos de quartzito foram exumados da extensa cobertura de Latossolos da área. Os quartzitos são de cores esbranquiçadas, mas se tornam rosados, conforme o grau de intemperismo aumenta. Mostram extratos em torno de 1 m de espessura e se apresentam fraturados, cataclasados, cortados por quartzo leitoso de veio (Figura 4.74).



Figura 4.74 – Blocos de quartzitos exumados, próximo a estação de bombeamento da Caesb – Setor Noroeste de Brasília/DF.

No extremo norte do Setor, em vala escavada, de aproximadamente 6 m de profundidade, para implantação do sistema de saneamento, ocorrem os seguintes tipos de materiais inconsolidados, de baixo para cima da vala escavada: 1) um nível com mais ou menos 1,5 m de espessura, formado por filito arroxeado, com lâminas milimétricas esbranquiçadas, lenticulares, siltosas. Exibem pelo menos duas fases de deformação. A primeira coincide com a estratificação, pouco desenvolvida. A segunda corresponde a uma clivagem de crenulação mais espaçada (Figura 4.75).



Figura 4.75 – Metapelito crenulado muito alterado – Setor Noroeste de Brasília/DF.

Apresenta níveis de espessuras milimétricas de cor cinza escura a preta, sendo provavelmente ricos em óxido de manganês. 2) o segundo nível, com cerca de dois metros de espessura, é formado por siltito argiloso extremamente alterado,. Não se diferencia qualquer estrutura.. 3) Latossolo Vermelho Escuro, profundo, textura argilo-arenosa.

Além desses materiais inconsolidados ocorrem blocos centimétricos a métricos de quartzito branco, fino a médio, maciço, friável, com presença ocasional de minerais pesados. Blocos centimétricos a decimétricos de quartzo leitoso de veio mostram-se às vezes impregnados por óxido de manganês (Figura 4.76).



Figura 4.76 – Nível centimétrico de óxido de manganês nos metapelitos crenulados – Setor Noroeste de Brasília/DF.

É possível que exista algum acidente tectônico passando por este ponto. Os filitos crenulados e os quartzitos da caixa d'água da Caesb constituem ponto de apoio a esta ilação. Os filitos encontrados na região têm sido atribuídos, frequentemente ao Grupo Canastra. Desta forma, aparecerem aqui, somente alçados por cinemática de empurrão.

4.7.2- CARTAS BÁSICAS – (CARTA-IMAGEM, HIPSOMETRIA, ORIENTAÇÃO DAS VERTENTES E DECLIVIDADE)

Os primeiros resultados obtidos são básicos para maioria dos projetos de mapeamento cartográfico. Sendo os dois primeiros resultados (Figura 4.77 e Figura 4.78) referentes a duas

cartas-imagens produzidas com duas imagens distintas, onde a primeira reflete a situação do Setor Noroeste de Brasília até aproximadamente o fim ano de 2009, sem alterações significativas desde a data de aquisição da imagem (2004) até o ano de 2009, quando começaram as obras no bairro, e a segunda imagem é de 30 de agosto de 2011, que mostra o bairro bastante modificado em função das obras no bairro.

Pode-se perceber na imagem do ano de 2011 que a marcação do bairro foi realizada, porém nem toda a área do projeto foi desocupada, como pode-se perceber mais ao centro da imagem, onde até Outubro de 2011 algumas dessas áreas estão sob litígio, como é o caso do auto intitulado "Santuário dos Pajés" ocupada pelos índios que vivem no bairro.

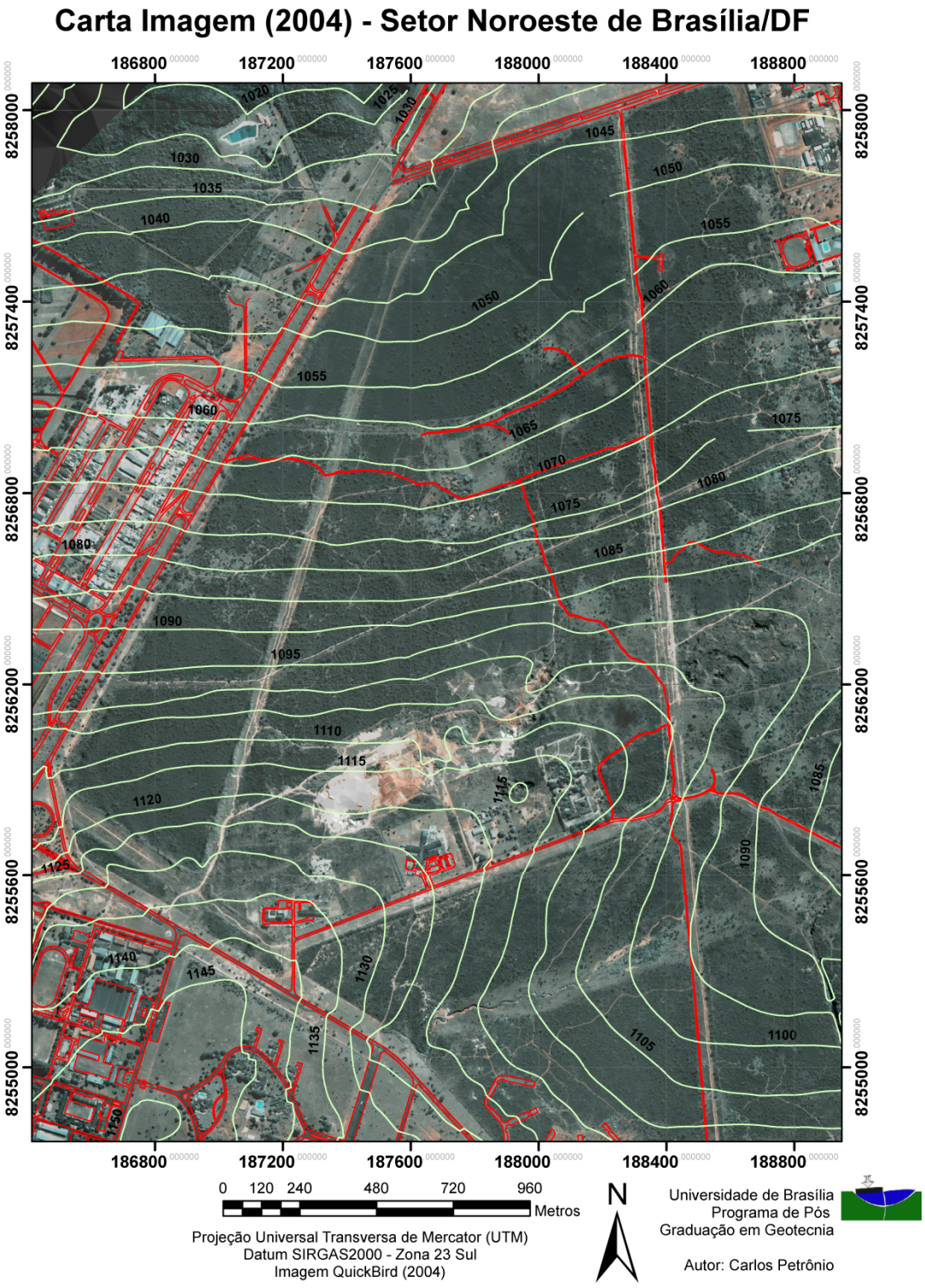


Figura 4.77 – Carta-Imagem (Ano 2004) – Setor Noroeste de Brasília/DF.

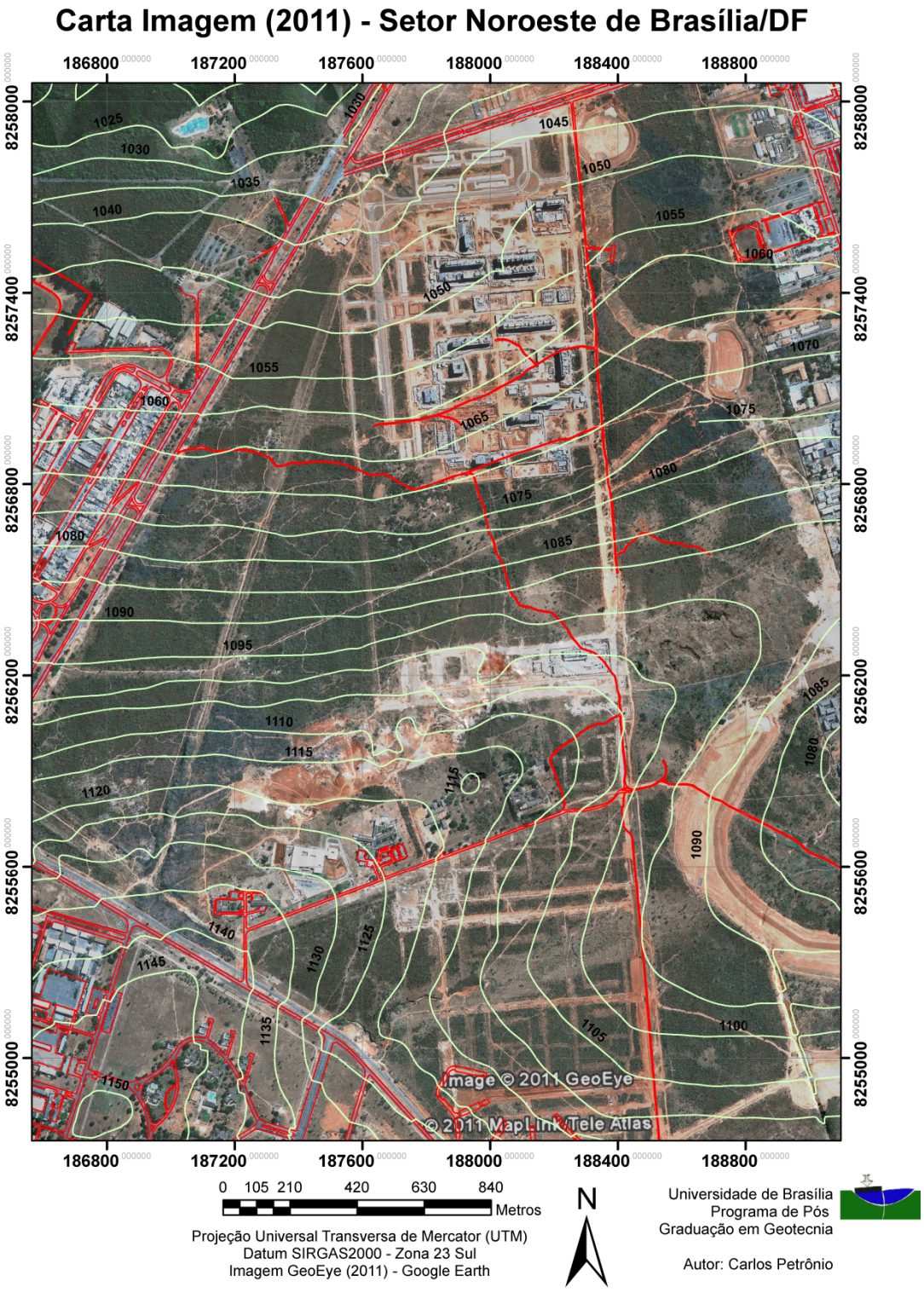


Figura 4.78 – Carta-Imagem (30 de Agosto de 2011) – Setor Noroeste de Brasília/DF.

Outro produto derivado das curvas de nível de metro em metro, é a carta hipsométrica, onde pode-se perceber que as cotas mais elevadas começam no centro do bairro seguindo no sentido NE-SW começando com a cota 1105 m de altitude e terminando na cota 1160 m de altitude, já fora do bairro. A maior ocorrência da rocha quartzito está exatamente entre as

cotas referidas. Na área existe em sua parte central uma porção mais elevada que representa um divisor d'água separando o bairro em uma vertente plana para N-NW e outra levemente côncava com eixo da drenagem com caimento na direção NE.

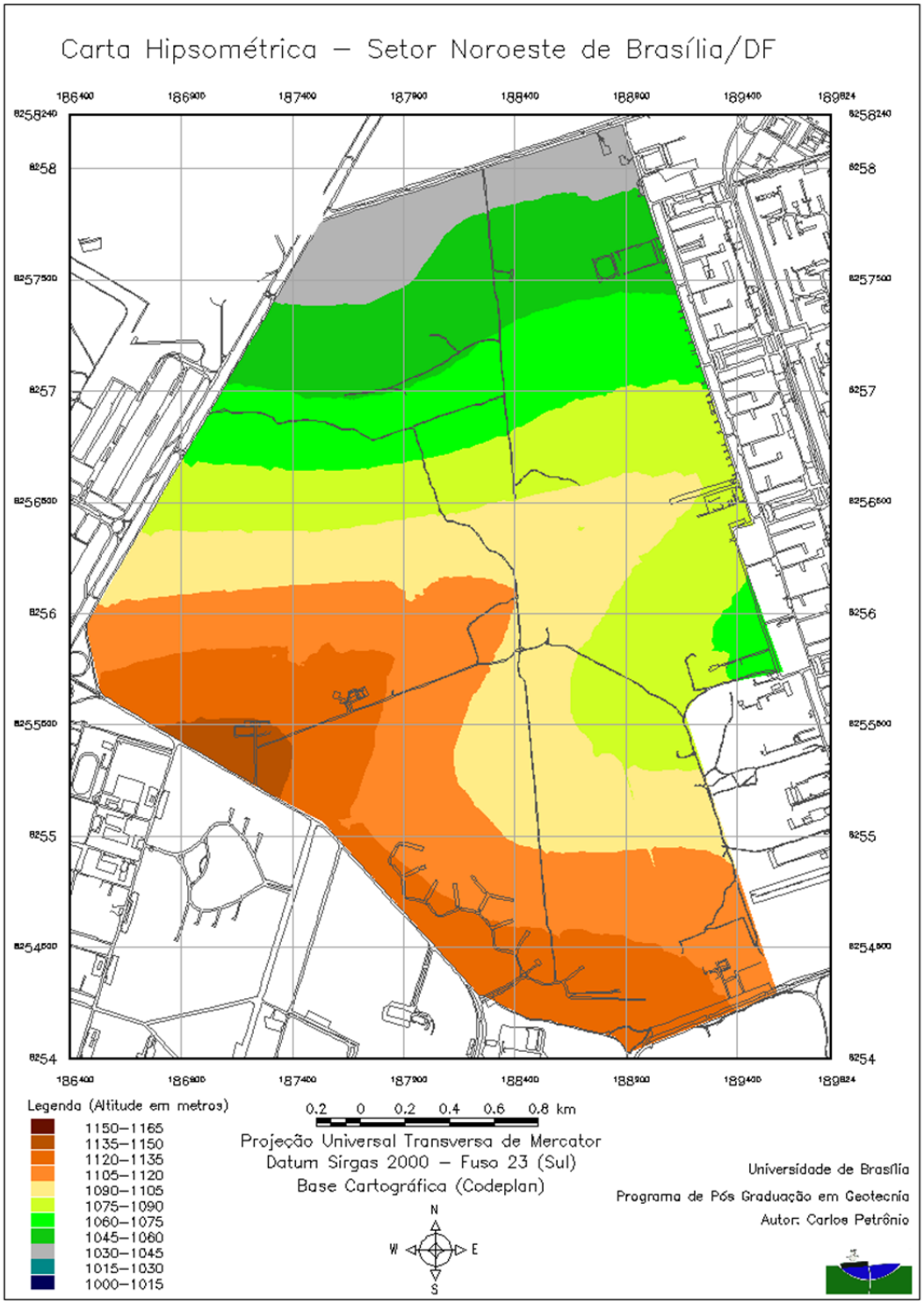


Figura 4.79 – Carta Hipsométrica – Setor Noroeste de Brasília/DF.

Apesar de o bairro ter diferença entre cotas hipsométricas na ordem de 45 m de altitude, o bairro tem um relevo suave ondulado. A Figura 4.80 mostra um resumo das classes hipsométricas em área (km²), em que pode-se notar que a maior parte da área está concentrada entre as cotas 1075 m e 1120 m.

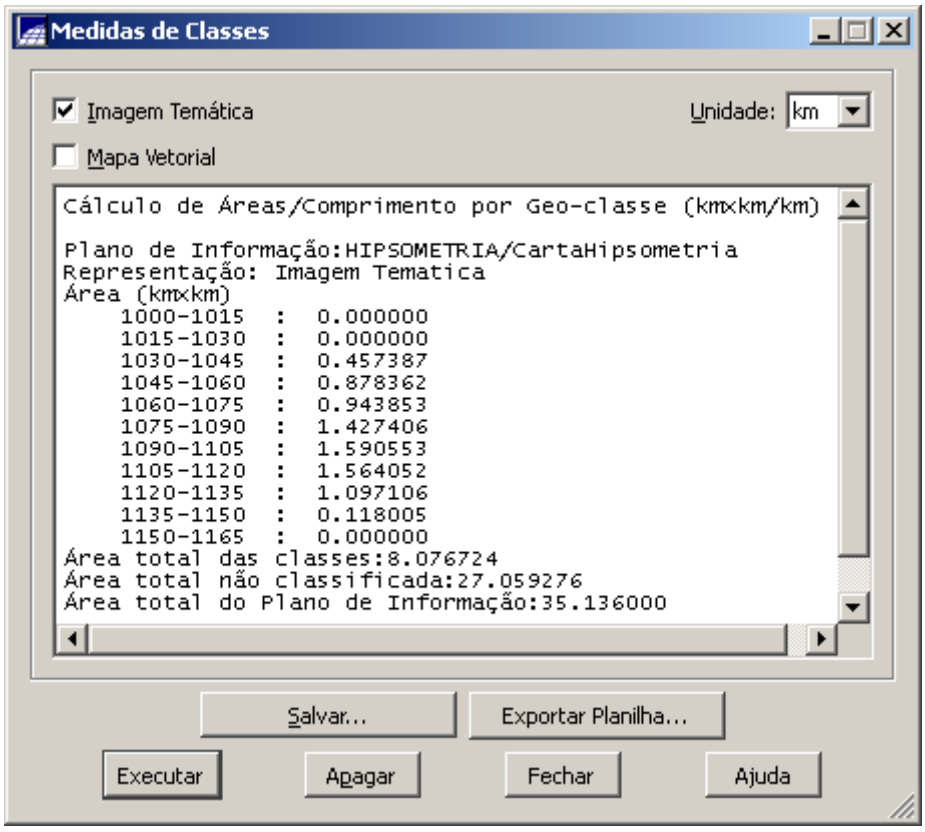


Figura 4.80 – Resumo das classes hipsométricas – Setor Noroeste de Brasília/DF.

A carta de orientação de vertentes ou carta de exposição mostra a direção dos declives das vertentes. Percebe-se na Figura 4.81 que na porção norte do bairro os declives são predominantemente na direção norte e parte em direção noroeste. Na porção mais central ao bairro o domínio é na direção sul e sudeste, de forma que se consegue perceber o divisor de águas do bairro, que é o contato entre a classe Norte (na carta) e as classes Sul e Sudeste (na carta) exatamente na porção central do bairro.

As classes Leste e Nordeste encontram-se com as classes Sul e Sudeste e formam uma drenagem, exatamente na porção em que se situa a área erodida e mapeada na carta de uso e cobertura do solo.

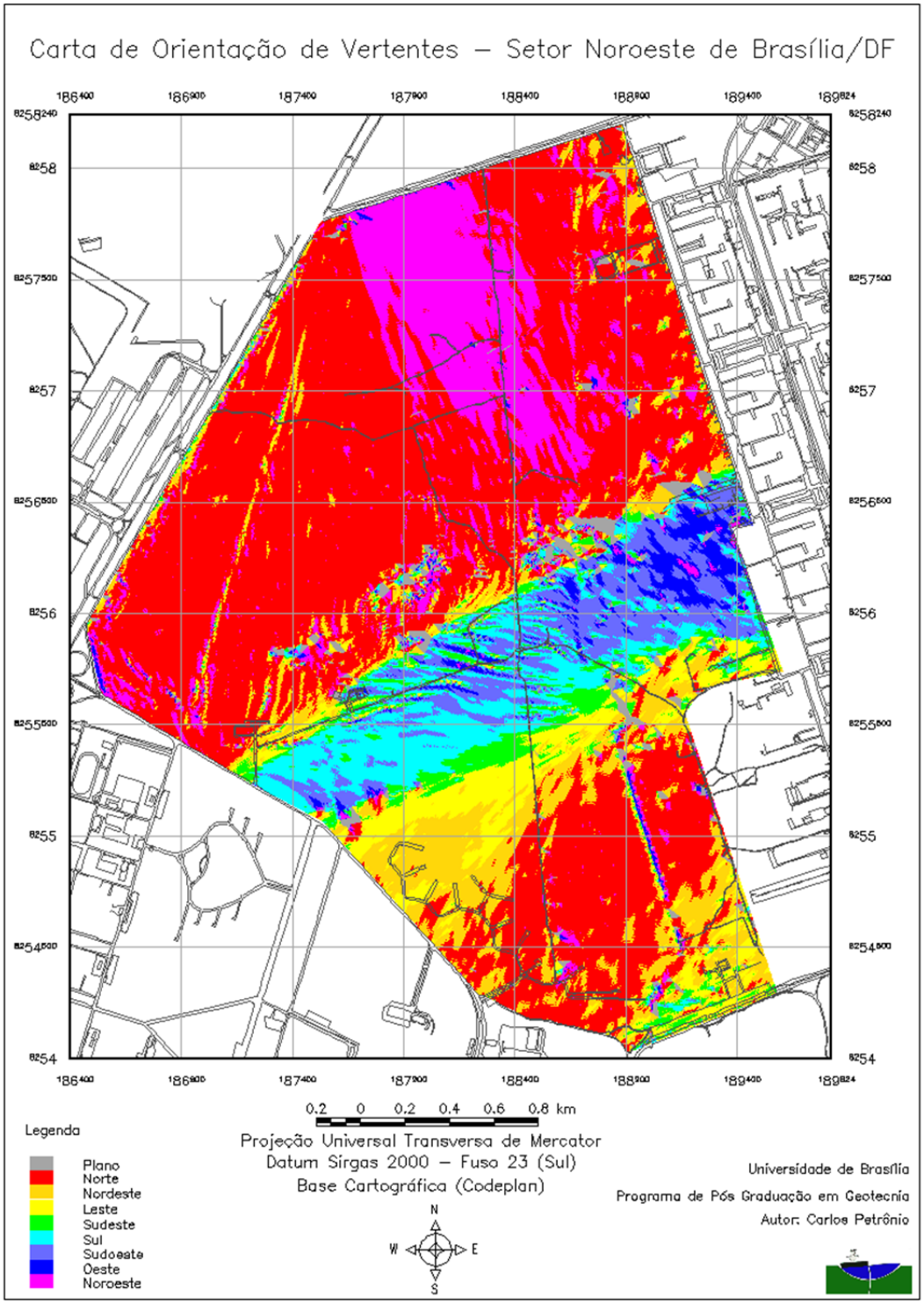


Figura 4.81 – Carta de Orientação de Vertentes – Setor Noroeste de Brasília/DF.

A Figura 4.82 mostra um resumo das áreas distribuídas em cada classe da carta de orientação de vertentes, sendo a classe Norte de maior ocorrência na referida carta.

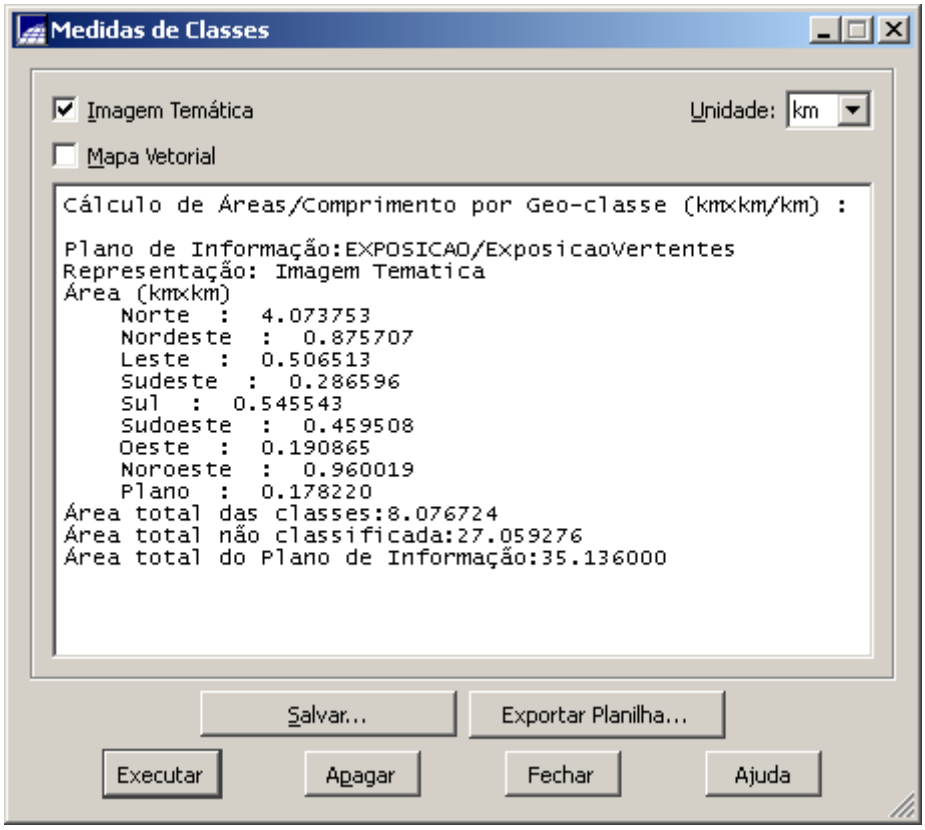


Figura 4.82 – Resumo das classes da carta de orientação de vertentes – Setor Noroeste de Brasília/DF.

A carta de declividade em porcentagem, exposta na Figura 4.83, mostra que o bairro não possui declividades acentuadas, sendo a que a média está entre 2 e 5 (%) de declividade. Pode-se dizer que as declividades não ultrapassam, de maneira geral, 10 % de declividade em toda a área.

A Figura 4.84 mostra um quadro resumo com as classes de declividade distribuídas na área de estudo.

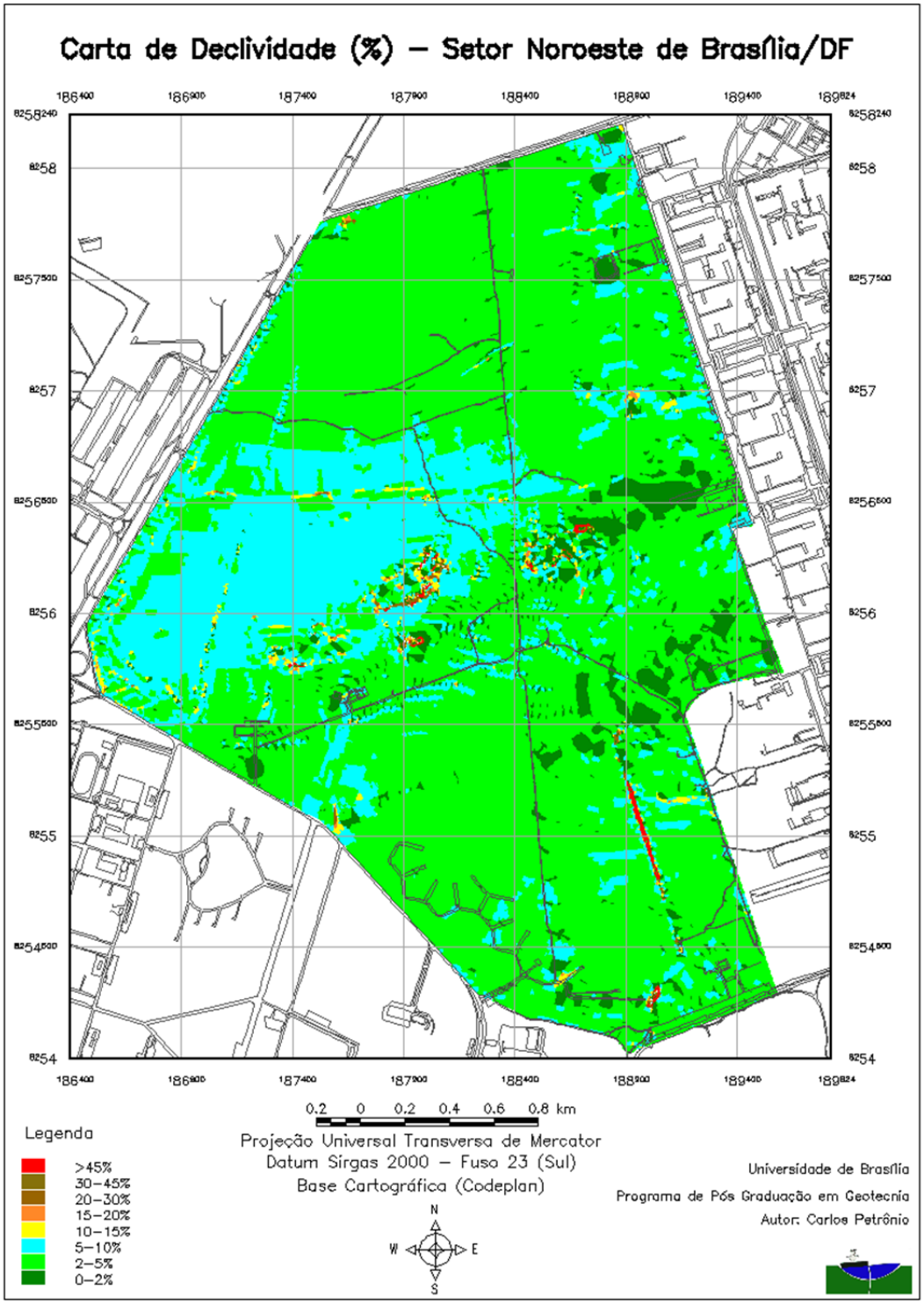


Figura 4.83 – Carta de Declividade em porcentagem– Setor Noroeste de Brasília/DF.

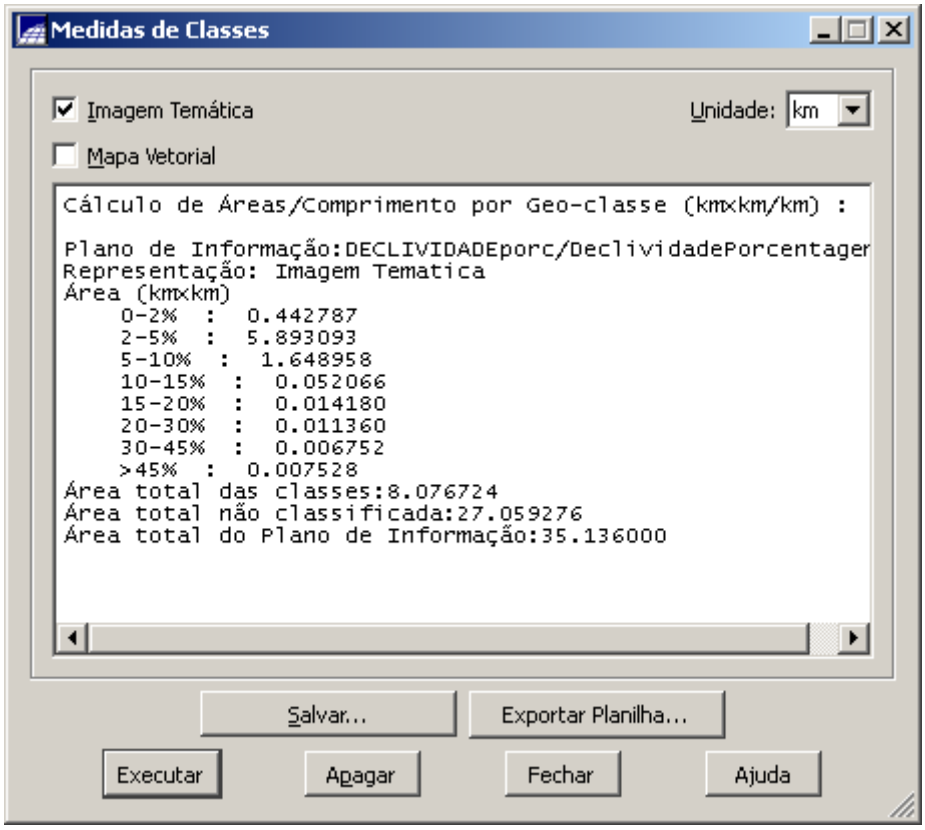


Figura 4.84 – Resumo das classes da carta de declividade em porcentagem– Setor Noroeste de Brasília/DF.

4.7.3- CARTA DE USO E COBERTURA DO SOLO

Durante a pesquisa foi interessante gerar uma carta de uso e ocupação do solo da área de estudo em razão de que seguramente com a construção do bairro a paisagem seria totalmente modificada. No caso da carta em questão, foram consideradas as classes exibidas na Figura 4.85, se somar apenas as áreas que não são cerrado nesta carta, 33% da área pode ser considerada como área alterada ou até mesmo degradada, que neste caso seriam áreas que não são mais cerrado. Infelizmente em toda a área existem vários depósitos tecnogênicos, como construções desabitadas, lixo, bota fora de obras de construção civil, entre outros. O local mais preservado da carta é exatamente no centro do bairro, local ocupado pelos índios que habitam a área.

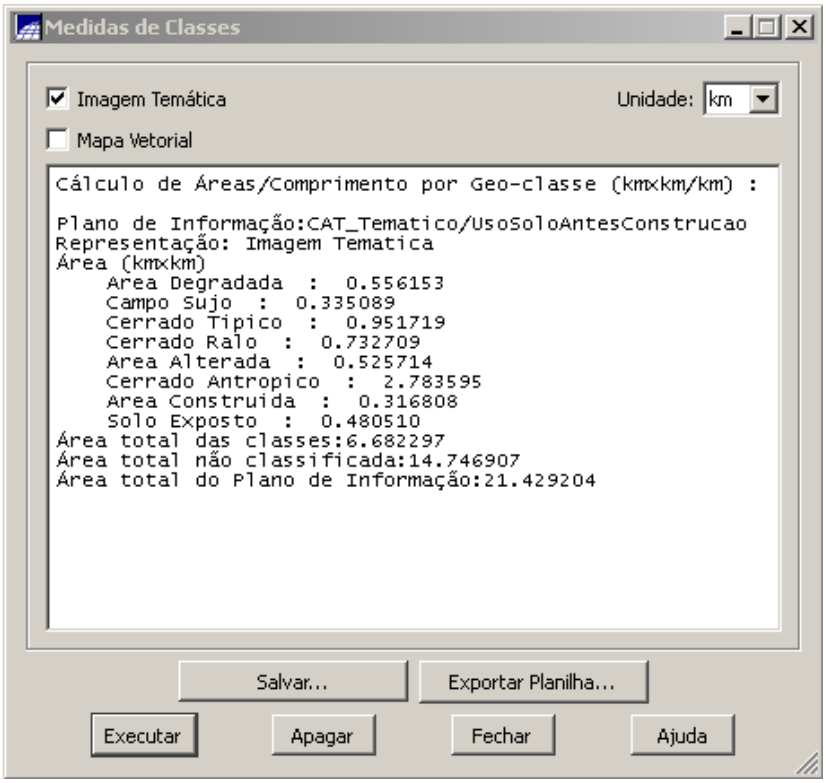


Figura 4.85 – Medida de Classes da Carta de Uso e Cobertura do Solo (Ano 2004) – Setor Noroeste de Brasília/DF.

A Figura 4.86, Figura 4.87, Figura 4.88 e Figura 4.89 mostram uma sequência de fotografias que ajudaram no mapeamento da situação do bairro até o ano de 2009, pouco antes do inicio da construção do bairro.

Na carta exibida na Figura 4.90, pode-se notar que ao contrário do que a comunidade poderia imaginar uma boa parte do bairro não era preservado (considerando o ponto de vista ambiental). Na carta ainda percebe-se que parte da classe Área Degradada faz referencia à erosão que inicia-se no Setor Militar Urbano e corta todo o bairro até chegar a Asa Norte do Plano Piloto de Brasília.



Figura 4.86 – Depósito de bota fora e pneus inservíveis próximo a estação de bombeamento da Caesb (Setembro 2009) – Setor Noroeste de Brasília/DF.



Figura 4.87 – Área degradada pela erosão (Setembro 2009) – Setor Noroeste de Brasília/DF.



Figura 4.88 – Construções abandonadas no bairro (Novembro 2009) – Setor Noroeste de Brasília/DF.



Figura 4.89 – Depósito de lixo urbano no meio da área de cerrado (Novembro 2009) – Setor Noroeste de Brasília/DF.

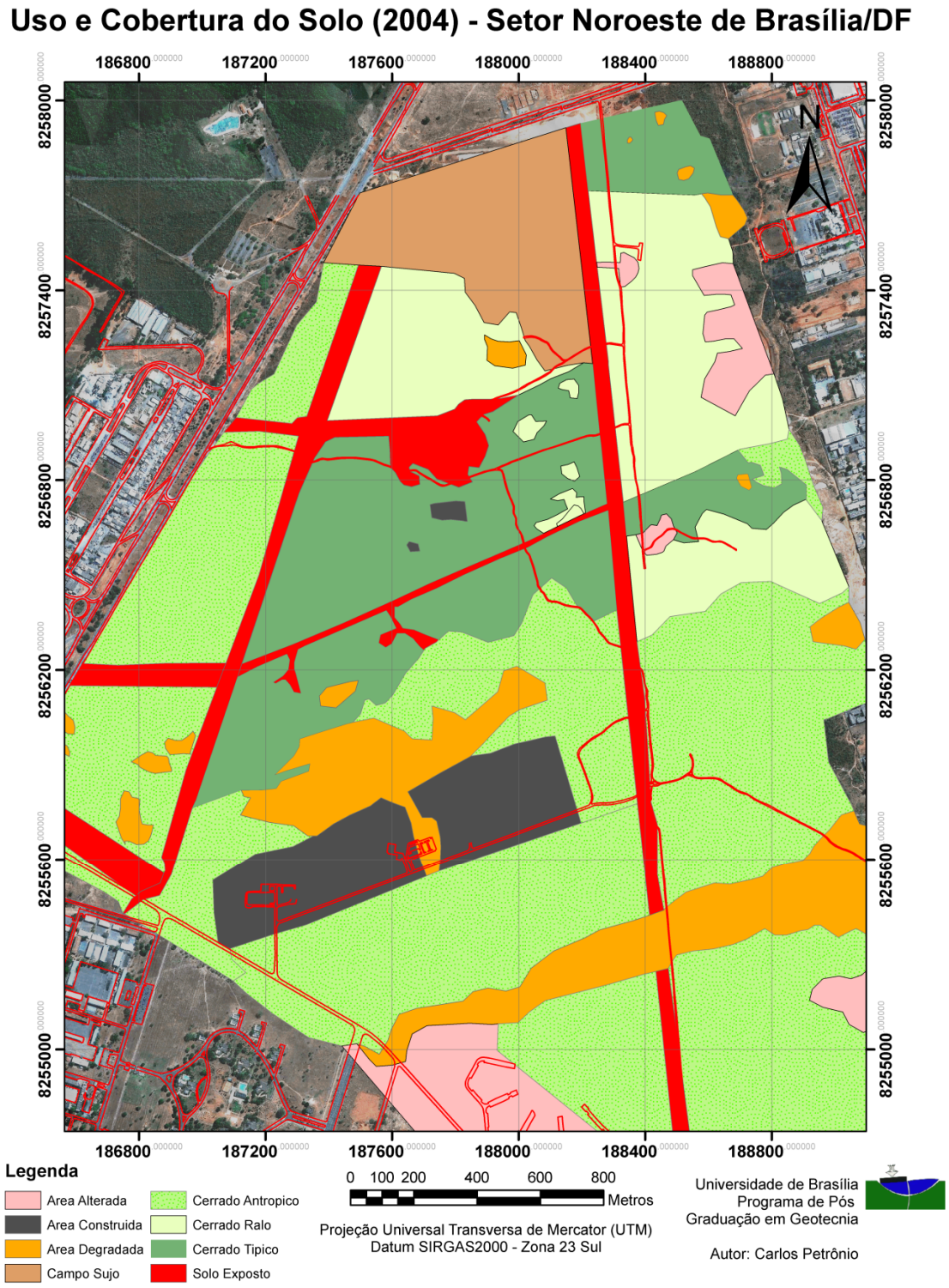


Figura 4.90 – Carta de Uso e Cobertura do Solo (Ano 2004) – Setor Noroeste de Brasília/DF.

4.7.4- LOCALIZAÇÃO DOS TRABALHOS DE CAMPO

A Figura 4.91 mostra, de forma simples, uma carta com o resultado final da localização dos trabalhos de campo no Setor Noroeste de Brasília. É o resultado da integração de 8.000 metros de linhas de sísmica de refração, 14.000 metros de linhas de eletrorresistividade e 61 furos de sondagens SPT. O fato desse mapa estar neste capítulo é em função de que apesar de a pesquisa planejar os trabalhos de campo nem sempre se conseguia cumprir o planejamento das linhas que no campo foram rearranjadas de acordo com a disponibilidade de se realizar os ensaios, por exemplo, algumas linhas de eletrorresistividade foram deslocadas em função do grande fluxo de caminhões na área que impediam a montagem da linha em alguns locais, outros levantamentos foram cancelados em função dos problemas sociais que impediram a passagem dos ensaios em certos locais. Enfim, esse mapa é o resumo de tudo o que foi feito na área de estudo escolhida para a modelagem tridimensional em escala de bairro.

A área utilizada para as modelagens tridimensionais está destacada, tem forma trapezoidal e as coordenadas do retângulo envolvente estão destacadas no mapa. A imagem é atual, disponível no *Google Earth*, datada de 30 de Agosto de 2011, e mostra o bairro em construção.

Outra carta a ser destacada nos resultados é a carta que localiza as linhas geofísicas de sísmica e eletrorresistividade (Figura 4.92) que literalmente cortam o bairro no sentido Norte-Sul, alcunhadas na pesquisa de "Linhão Geofísico". Pode-se notar que a carta nada mais é que uma imagem do *Google Earth*, rotacionada cujo Norte não está apontando para cima da carta (contra as convenções cartográficas atuais). O artifício foi proposital para destacar a extensão alcançada pelas linhas geofísicas dentro do bairro, a topografia do terreno (importante para entender a relação que o relevo apresentado na referida figura tem com os resultados obtidos com geofísica) e a medida dessa extensão que é de aproximadamente 3.500 metros.



Figura 4.91 – Resultado final da localização dos ensaios de campo no Setor Noroeste de Brasília



Figura 4.92 – Localização da linha Norte-Sul de eletrorresistividade e sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF.

4.7.5- RESULTADO DO PROCESSAMENTO DA LINHA GEOFÍSICA NORTE-SUL "LINHÃO GEOFÍSICO"

Os resultados do processamento dos dados obtidos em campo para a linha norte-sul é referente à integração de 23 linhas de sísmica de refração e 6 linhas de eletrorresistividade. Os resultados estão expostos na Figura 4.93. A interpretação dos resultados foi feita seguindo o seguinte critério:

Para sísmica de refração os valores de velocidade longitudinal ou onda P foram expressos seguindo o critério de Vp (km/s):

- De 0 a 1,20 km/s – Solo (escavável com ferramentas leves ou escavável a trépano de acordo com a NBR 6484);
- De 1,20 a 1,50 km/s – Zona de transição entre solo e saprolíto (pode estar próximo ao valor impenetrável do SPT);
- De 1,50 a 1,70 km/s – Saprólito (valor considerado impenetrável em várias sondagens SPT);
- De 1,70 a 2,0 km/s – Rocha pouco alterada;
- Maior que 2,0 km/s – Rocha sã.

Para que se entenda, a autonomia para definir estas classes foi possível após a leitura da sobreposição dos dados de sondagens SPT aos dados interpretados de sísmica de refração, apesar de a literatura apresentar valores próximos aos valores propostos por este critério estabelecido.

Para eletrorresistividade os valores de resistividade elétrica (Ohm.m) seguiram o seguinte critério:

- De 0 a 1.000 Ohm.m – Solo (escavável com ferramentas leves ou escavável a trépano de acordo com a NBR 6484);
- De 1.000 a 3.000 Ohm.m – Zona de transição entre solo e saprolíto (pode está próximo ao valor impenetrável do SPT);
- De 3.000 a 5.000 Ohm.m – Saprólito (valor considerado impenetrável em várias sondagens SPT);
- De 5.000 a 10.000 Ohm.m – Rocha pouco alterada;
- Maior que 10.000 Ohm.m – Rocha sã.

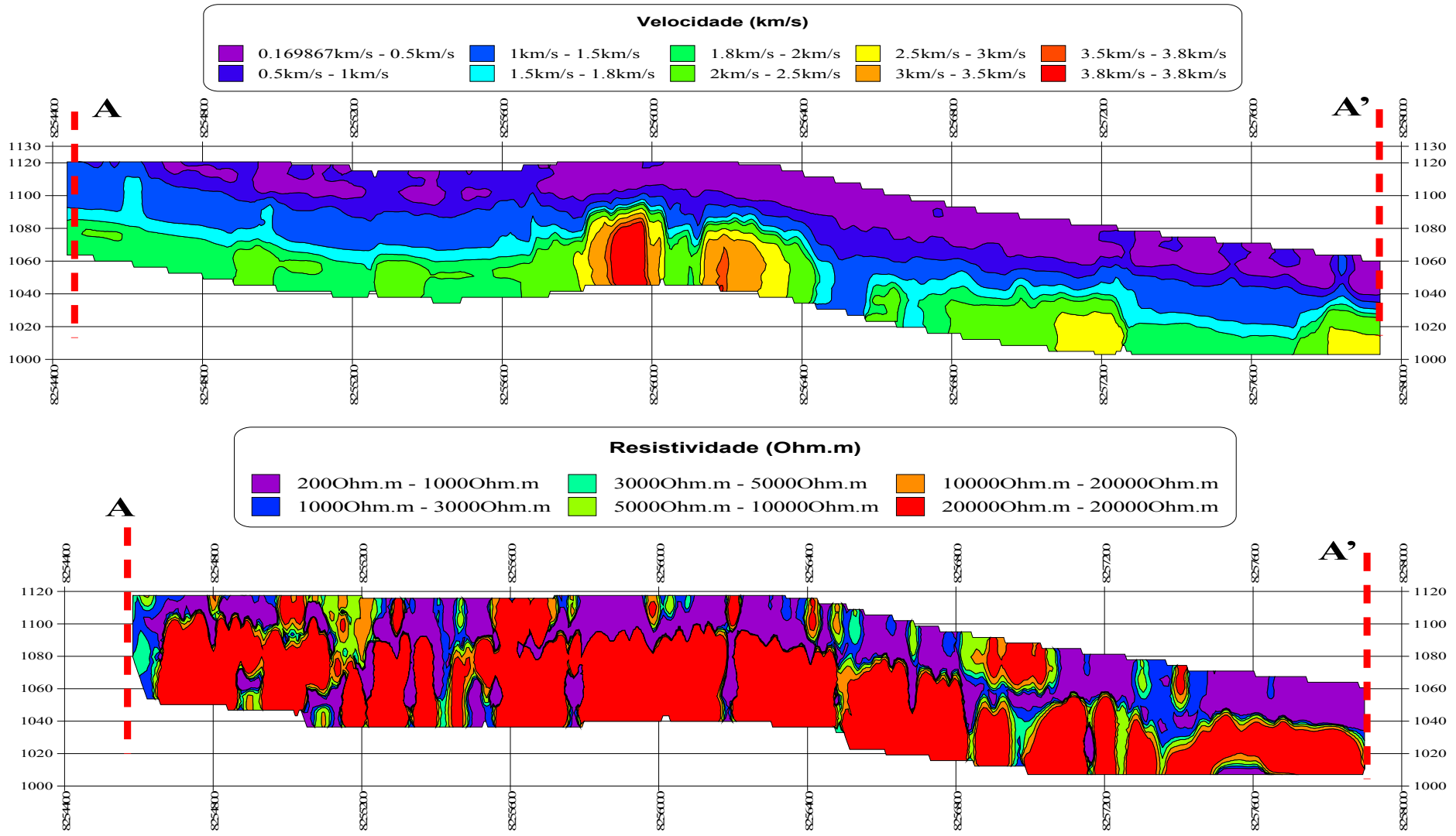


Figura 4.93 – Resultado do processamento da linha principal de eletrorresistividade e sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF.

No geral, ambos os modelos refletem o mesmo resultado, entretanto algumas observações devem ser feitas a fim de evitar erros de interpretação nos modelos.

Pode-se observar que a camada de solo (material facilmente escavável com ferramentas leves ou escavável ao trepano segundo a NBR 6484) está entre 10 e 20 m de espessura, sofrendo variações ao logo da seção. Este resultado pode ser obtido ou interpretado em ambos os modelos. Na área escolhida para a modelagem tridimensional (ao norte do bairro) o perfil segue o mesmo critério, como pode-se observar nas duas seções, onde a camada de solo começa com aproximadamente 10 m de profundidade e vai até 20 m de profundidade, no caso desta observação, os resultados foram aferidos com os dados obtidos de sondagens SPT que sofreram variações de profundidade do furo na mesma ordem de grandeza.

Pode-se observar ainda que em alguns locais do modelo de eletrorresistividade os resultados não são totalmente compatíveis com o modelo sísmico. Como é o caso observado entre o terceiro e o quarto eixo vertical de coordenadas (da direita para a esquerda da figura entre as coordenadas 8257200 e 8256800) em que aparece um material bastante resistente (rocha alterada e/ou rocha sã), mas que no modelo sísmico o mesmo não apareceu e nos resultados de sondagem também não foi constatado este material resistente. Esta é sem dúvida uma área interessante para uma investigação mais criteriosa, pelo menos com eletrorresistividade. Contudo na mesma seção de eletrorresistividade, entre os eixos verticais dois e três (coordenadas verticais 8257600 e 8257200 respectivamente), pode-se observar valores médios de 1.500 Ohm.m de resistividade elétrica, indicando que o local poderia ter nível d'água presente, fato confirmado nos furos de sondagem SPT.

Em ambos os modelos pode-se perceber que a rocha local tem vários falhamentos, sugerindo que nos dois modelos a rocha até a profundidade investigada (aproximadamente 50 m de profundidade alcançada em ambos os modelos) está fraturada em vários locais. A confirmação desta afirmação veio com laudos de sondagem mista que mostraram que a rocha extraída nos furos de sondagem possuía muitas fraturas, e com grau de recuperação baixo em vários furos. A seção geotécnica interpretada a partir dos dados geofísicos pode ser visualizada na Figura 4.94.

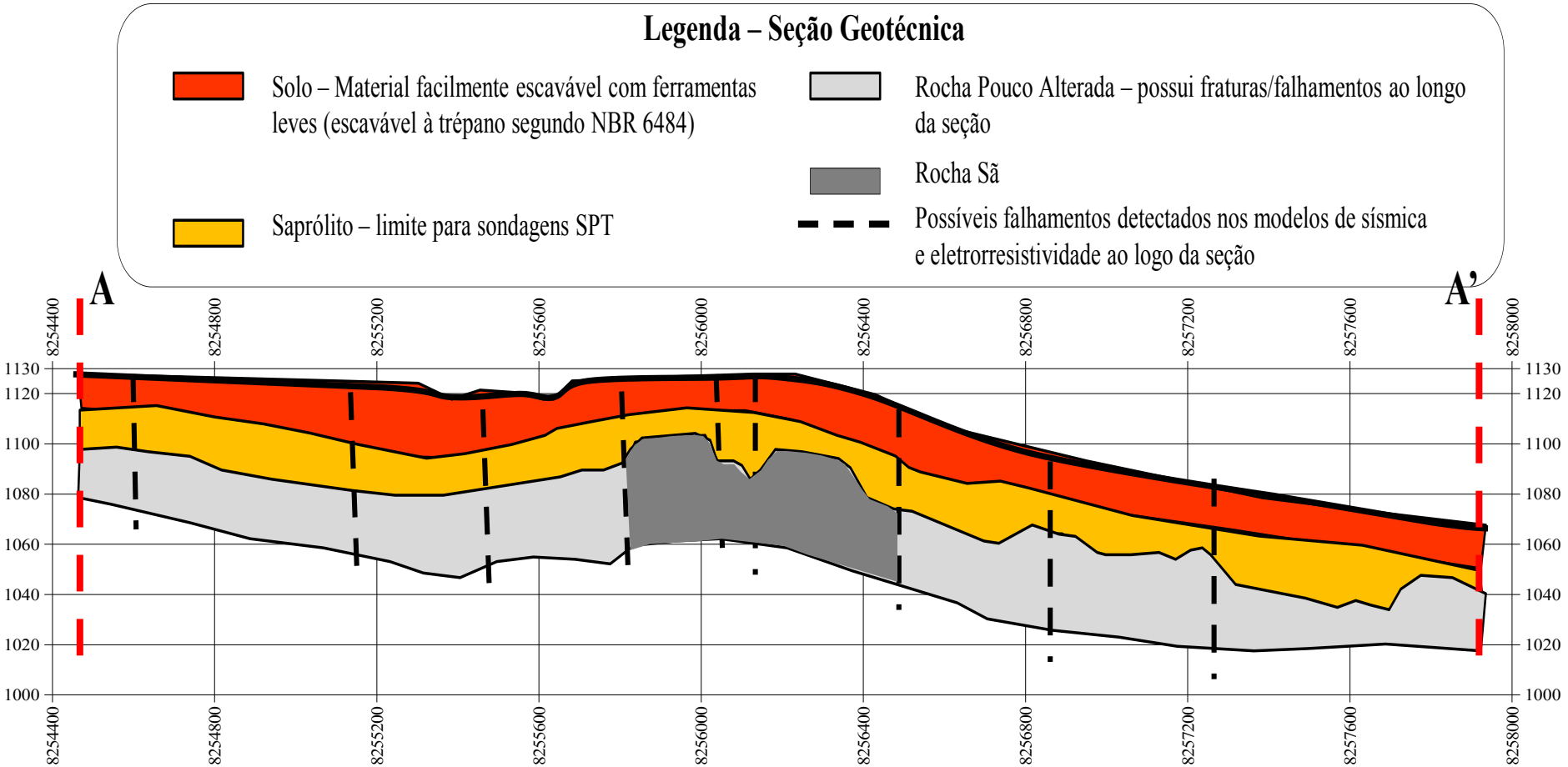


Figura 4.94 – Resultado da interpretação geotécnica a partir dos resultados geofísicos de eletrorresistividade e sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF

4.8- MODELO TRIDIMENSIONAL DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

O modelo tridimensional de resistividade elétrica é o resultado da integração de aproximadamente 3.200 pontos de sondagem elétrica, distribuídos em aproximadamente 6.000 m de linhas geofísicas de eletrorresistividade, de acordo com a carta exibida anteriormente.

Deve-se analisar este modelo levando em consideração o fator de escala que no caso do Setor Noroeste é bem menor que na escala de detalhe de uma obra, apesar da quantidade de pontos amostrados no levantamento geofísico.

A Figura 4.95 mostra o modelo em questão ainda não fatiado, e não classificado de acordo com a proposta da pesquisa, contudo o modelo destaca a área observada ainda na seção de eletrorresistividade, apresentada anteriormente, com valores altos de resistividade elétrica, que indicam a presença de rocha, mas que não ficou evidente nos outros resultados, o que sugere que este seria um local a ser mais bem investigado ou detalhado, pelo menos pelo método elétrico.

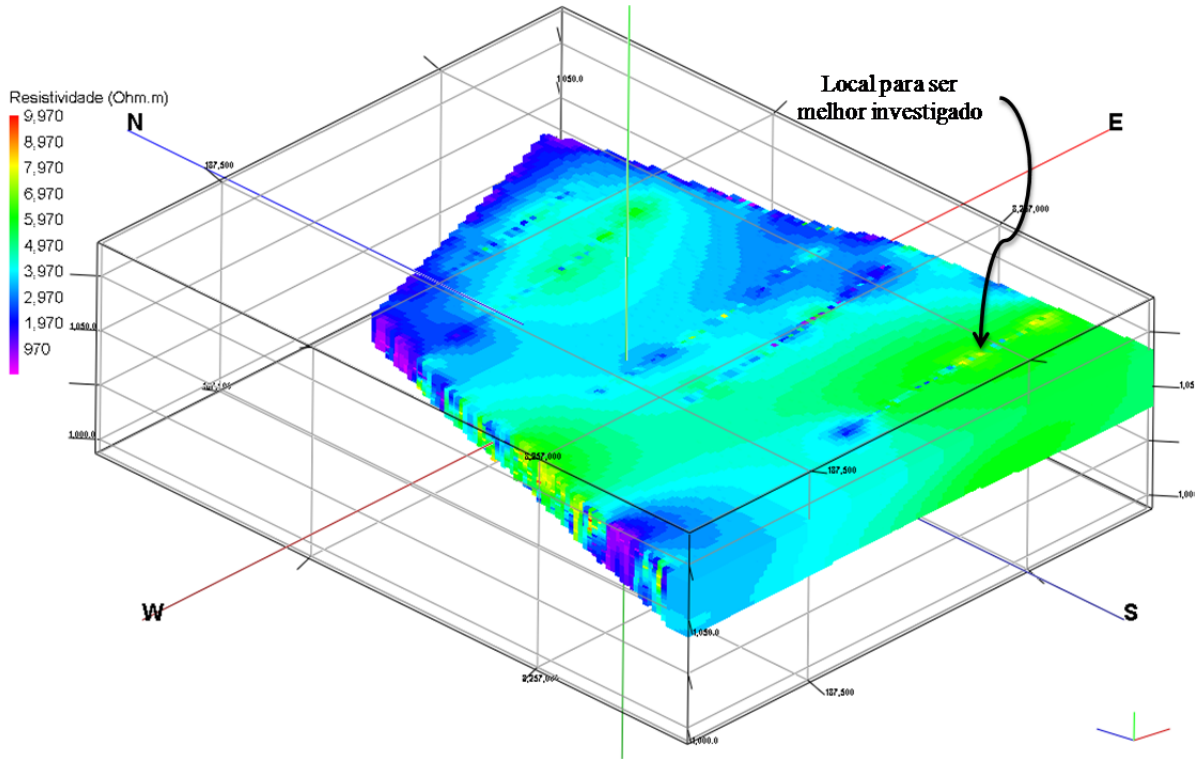


Figura 4.95 – Modelo 3D de resistividade elétrica (Ohm.m) – Setor Noroeste de Brasília/DF.

4.8.1- DIAGRAMA *FENCE* 3D DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

No diagrama de cercas tridimensionais é que se pode notar com mais clareza o resultado da espacialização dos valores de resistividade elétrica. Pode-se dizer que este modelo, apesar de bastante simulado ou estudado várias vezes no *software* de modelagem 3D, não ficou satisfatório, ou seja, a integração dos resultados não se mostrou mais eficiente que a análise seção a seção de eletrorresistividade.

A Figura 4.96 destaca o resultado obtido do fatiamento do modelo 3D de resistividade elétrica. Para melhor compreensão do estudo da área afetada e destacada na Figura 4.95, adicionou-se ao modelo os furos de sondagem SPT, representados por discos coloridos que aumentam ou diminuem conforme aumenta ou diminuem o número Nspt e a cor vermelha no furo de sondagem significa Nspt maior ou igual a 60 golpes. Observa-se com isso que na área a ser melhor investigada os furos de sondagem são profundos e indicam a presença de uma camada espessa de solo pouco resistente (em valores de Nspt), totalmente oposto ao resultado obtido na geofísica.

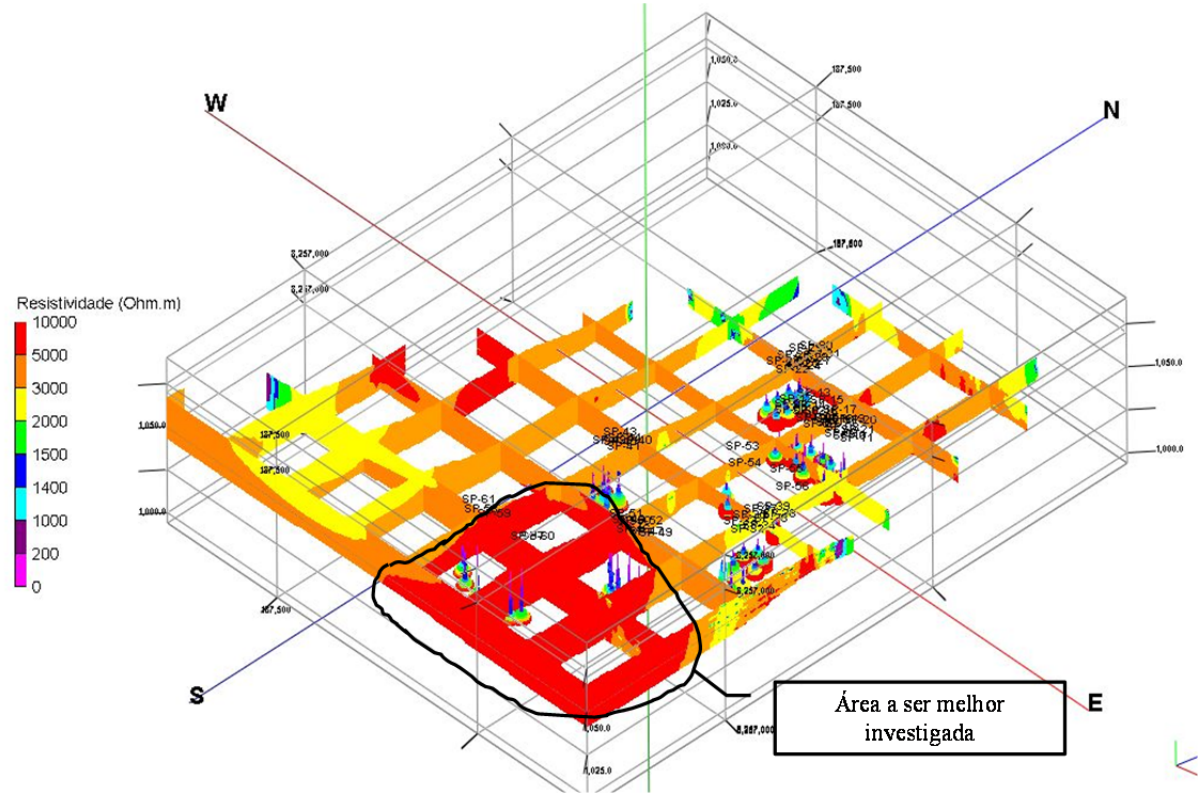


Figura 4.96 – Diagrama de cercas 3D de resistividade elétrica (Ohm.m) – Setor Noroeste de Brasília/DF.

Na realidade, ao observar os furos de sondagem, sobrepostos ao modelo, é como se os valores estivessem invertidos, ou seja, os valores entre 5.000 e 10.000 Ohm.m na realidade podem

estar entre 200 e 1.500 Ohm.m, suposição esta que só pode ser confirmada com outras campanhas geofísicas no local. Apesar de a maior parte do solo no Setor Noroeste ser classificado como argila arenosa e que a literatura afirma que os solos argilo-arenosos tem maior resistividade que os solos argilo-siltosos e os solos argilosos, pela experiência adquirida nos estudos de caso, observou-se que valores acima de 5000 Ohm.m são valores interpretados como rocha.

4.8.2- SEÇÕES 2D DE ELETRORRESISTIVIDADE

Como são várias seções, resolveu-se apresentar, seis seções na direção Norte-Sul, dispostas no sentido Leste-Oeste de acordo com a Figura 4.97, resultantes do processo de inversão no programa computacional RES2DINV.

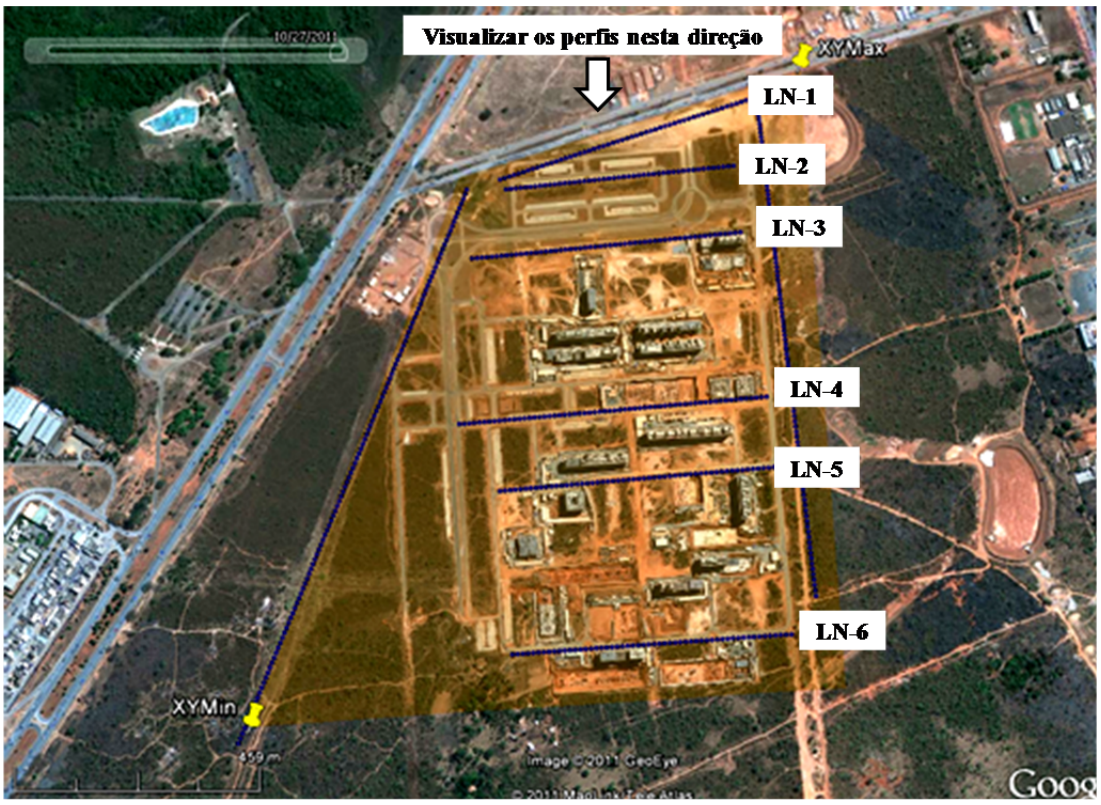


Figura 4.97 – Disposição das linhas de eletrorresistividade no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF.

A Figura 4.98 destaca resultado do processo de inversão de dados para a linha LN-1. Nesta figura estão contidos duas pseudo-seções e o resultado final da inversão com a correção topográfica do terreno.

Pode-se observar na figura porção de valores elevados de resistividade elétrica acima de 5.000 Ohm.m próximos a superfície do terreno. Esta seção foi confirmada em função da abertura de

uma trincheira exatamente em cima da linha, poucos após a execução do ensaio de campo. A Figura 4.99 mostra o registro fotográfico identificado na seção LN-1, mostrando a transição entre o solo e o saprólito próximo a superfície do terreno.

Os valores em torno de 1.500 Ohm.m são indicativos da presença do nível d'água, pois trata-se do valor de resistividade elétrica característico da presença do nível d'água no solo. Neste caso o topo do nível d'água deve está próximo da cota 1025 m neste local.

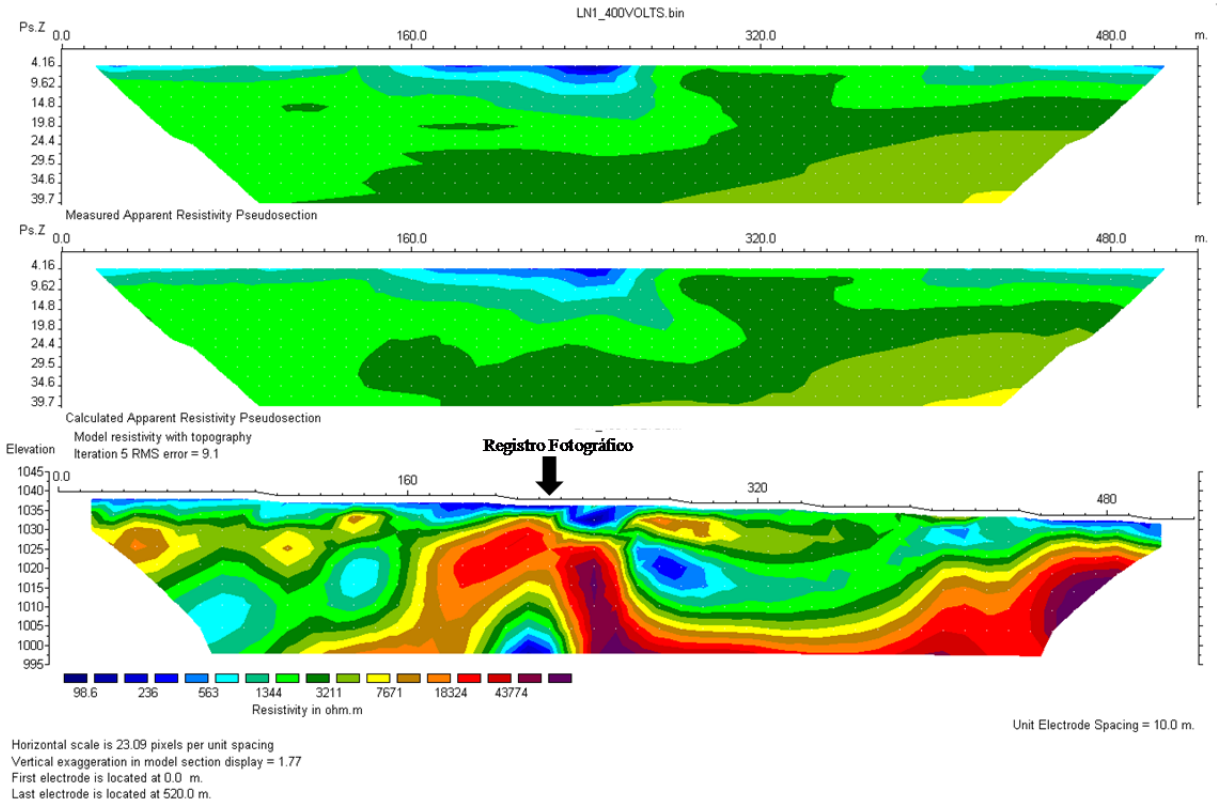


Figura 4.98 – Seção LN-1 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF.

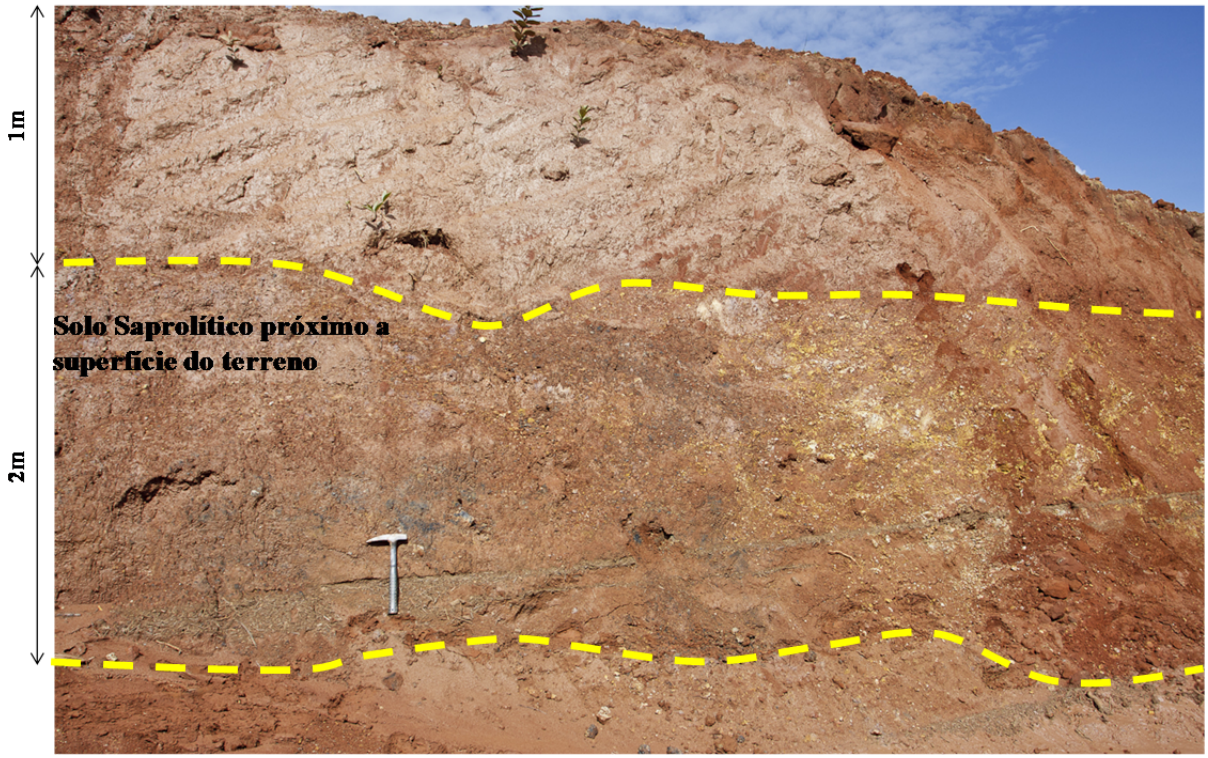


Figura 4.99 – Registro fotográfico em trincheira aberta após a execução do ensaio geofísico na Seção LN-1 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF.

A linha LN-2 evidencia a presença do nível d'água nas seções mais ao norte do bairro, com valores baixos de eletrorresistividade. É interessante notar a variabilidade do solo no local, onde próximo à superfície verificam-se valores elevados de resistividade elétrica dispostos em camadas achatadas de espessura métrica e valores baixos de resistividade elétrica logo após essas camadas, o que pode ser interpretado na Geotecnia como solos lateríticos, que apresentam valores elevados de Nspt ao longo dessas camadas achatadas e decaem quanto ultrapassam tais camadas, porém este estudo requer um trabalho ainda mais minucioso, de preferencia com coleta de amostras por meio de ensaios de campo para verificar tal afirmação, que está baseada na experiência adquirida com os estudos de caso. O topo da rocha, provavelmente alterada, está a aproximadamente 30 m de profundidade neste local.

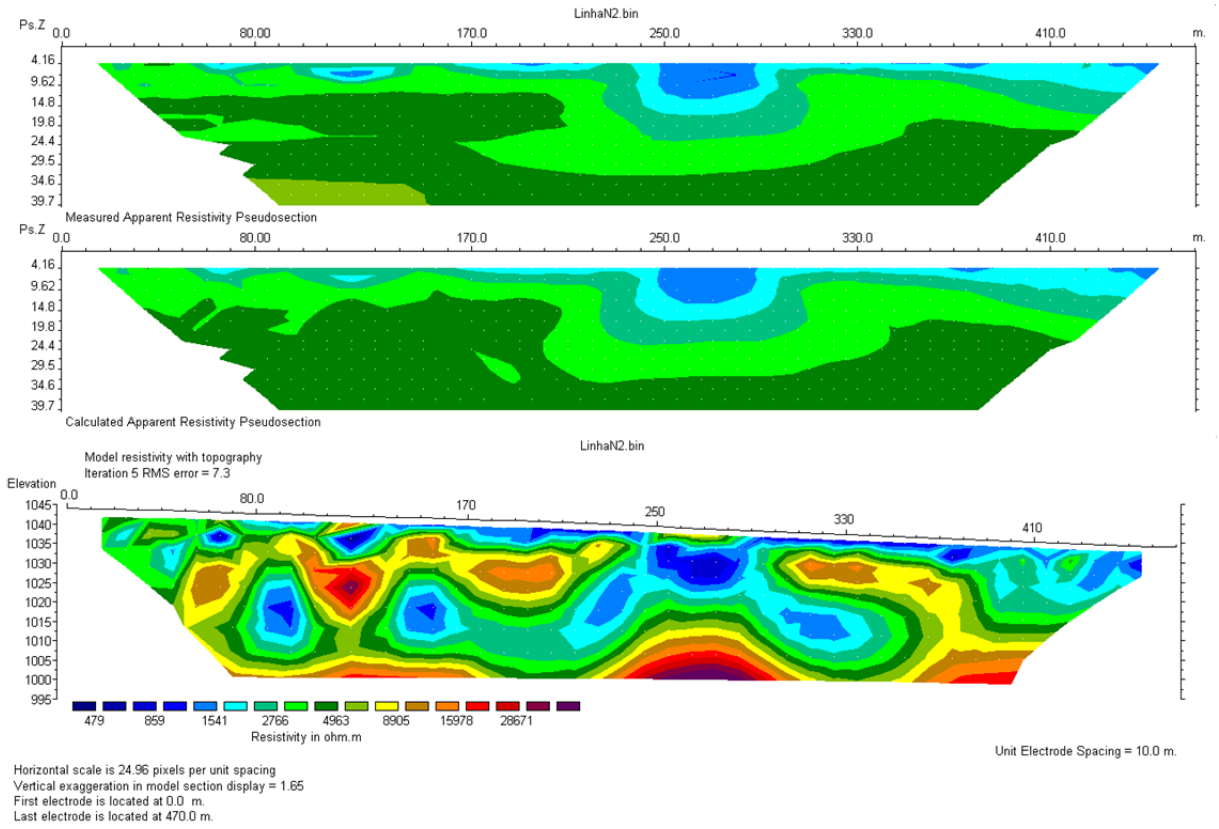


Figura 4.100 – Seção LN-2 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF.

A Figura 4.101 destaca a linha LN-3, esta linha possui características similares à linha LN-2, esta linha está próxima aos furos de sondagem SPT do banco de dados o que facilitou a análise do resultado.

É interessante avaliar duas condições na LN-3, a primeira é a camada métrica de material muito resistivo, e a segunda é a presença de dois níveis d'água. O primeiro nível d'água é bem localizado e está próximo à superfície do terreno, este nível d'água foi confirmado com furos de sondagem mista realizadas próximas à linha. O segundo nível d'água apresenta-se logo após a camada de material muito resistivo, sendo que a média do topo do nível d'água está a 8,0 m abaixo da superfície do terreno.

É evidente que o primeiro nível d'água é resultado do acumulo da água, no período de chuvas na região, em cima de tal camada de material muito resistivo que dificulta a infiltração da água para as camadas sobrejacentes.

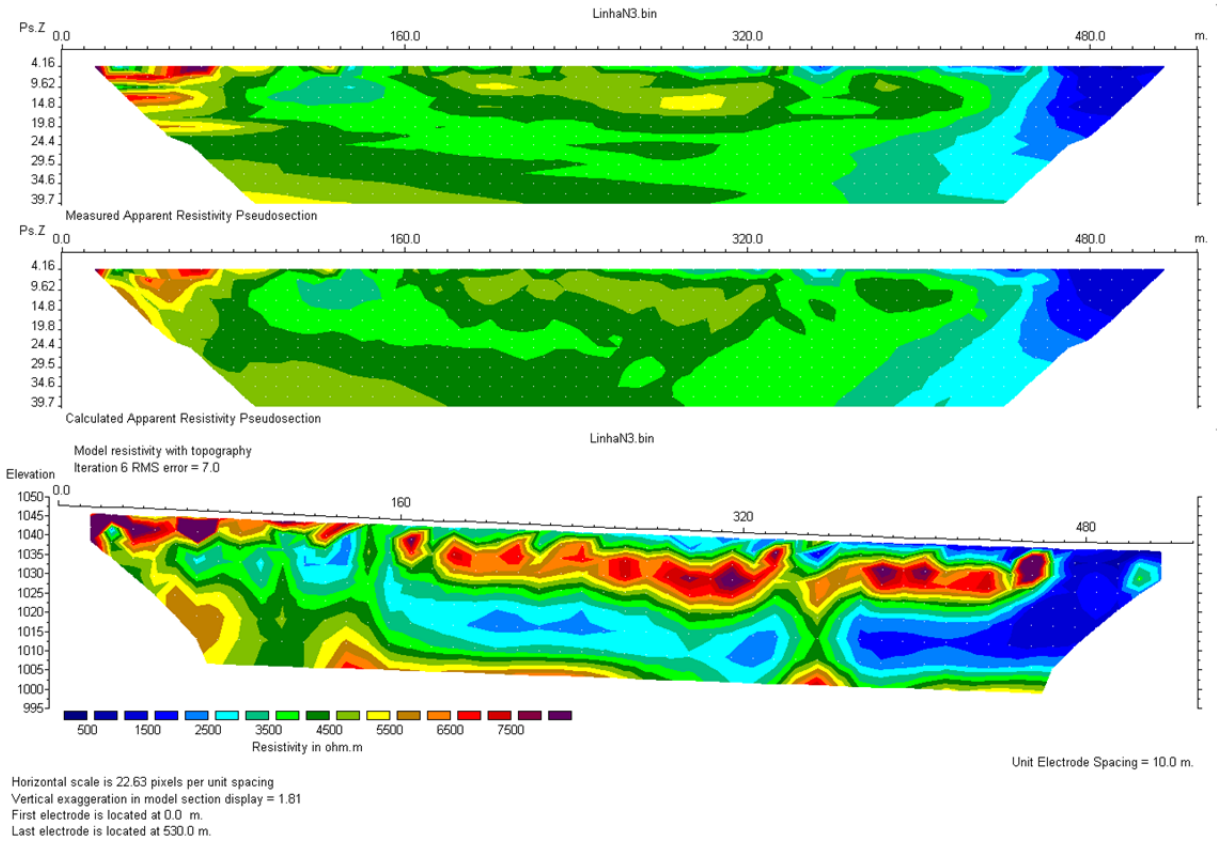


Figura 4.101 – Seção LN-3 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF.

A Figura 4.102 destaca a Linha LN-4, com valores localizados de material mais resistivo, sendo que a maior parte do perfil é de solo. Neste local pode-se confirmar parte do perfil com trincheiras abertas próximas ao local da execução da linha geofísica, conforme mostra a Figura 4.103, a profundidade média desta trincheira é de 6 m de profundidade.

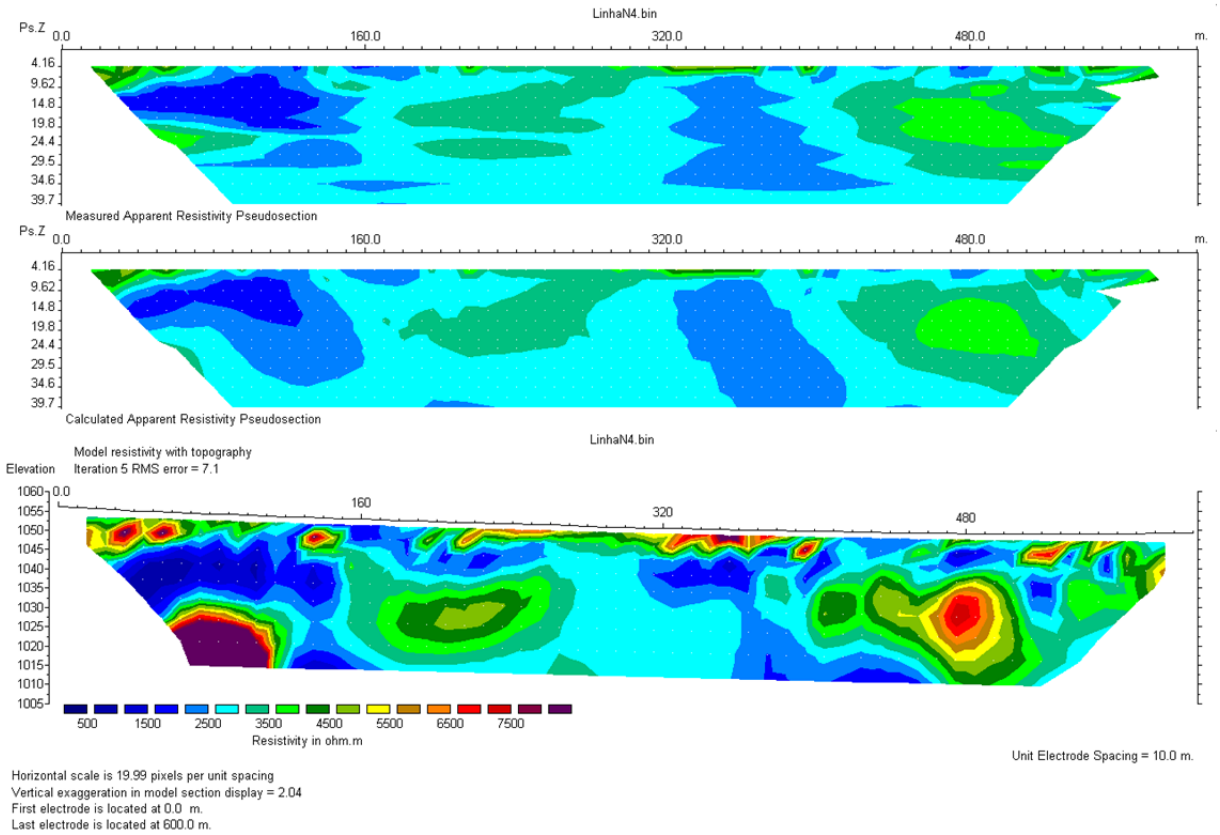


Figura 4.102 – Seção LN-4 de resistividade elétrica – Setor Noroeste de Brasília/DF.



Figura 4.103 – Registro fotográfico de trincheira aberta próximo a Seção LN-4 de resistividade elétrica – Setor Noroeste de Brasília/DF.

A Figura 4.104 destaca a LN-5, onde nesta seção surge material bastante resistivo (acima de 3000 Ohm.m) próximo à superfície do terreno. Com o registro fotográfico (Figura 4.105) de trincheira próximo ao local de execução da linha, percebe-se que esse material mais em

superfície é o saprólito propriamente dito, contudo, com a experiência dos estudos de caso, sabe-se que pode haver blocos de quartzito embutidos neste material saprolítico, o que provavelmente aumentou os valores de resistividade pontualmente em vários locais desta seção.

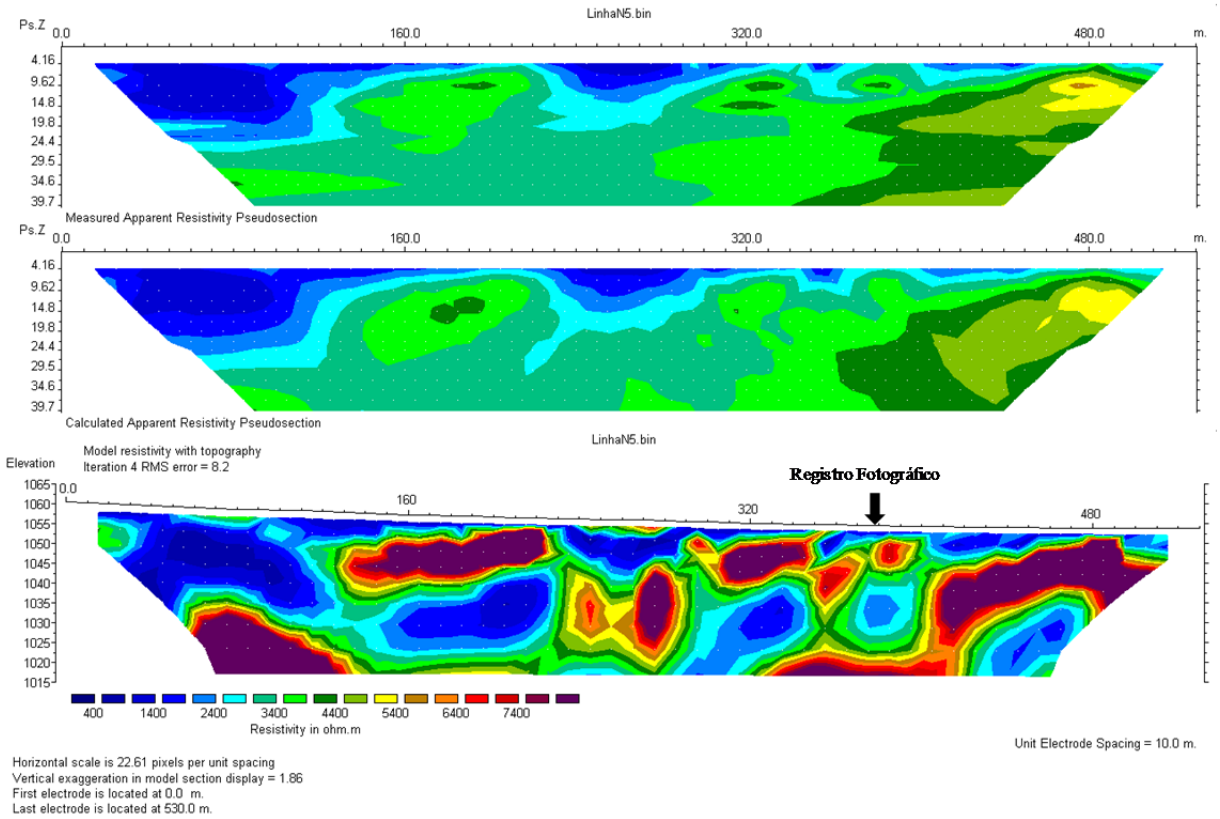


Figura 4.104 – Seção LN-5 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF.

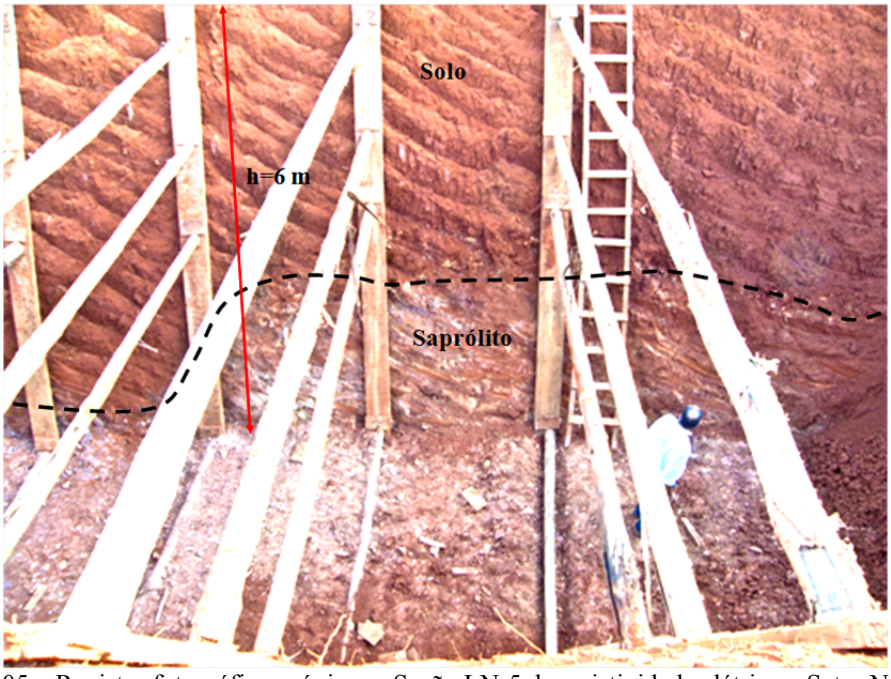


Figura 4.105 – Registro fotográfico próximo a Seção LN-5 de resistividade elétrica – Setor Noroeste de Brasília/DF.

Por último destaca-se na Figura 4.106 a linha LN-6. Esta linha, em função dos outros resultados obtidos, não foi confirmada como resultado satisfatório, os locais observados em campo com a abertura das trincheiras próximas e o resultado proveniente das sondagens SPT próximas à linha, não confirmaram os resultados exibidos nesta seção. Contudo, para que houvesse uma nova aquisição dos dados, algumas premissas deveriam ser atendidas, dentre elas: a disponibilidade dos equipamentos geofísicos nas datas programadas; que não houvesse transito de veículos pesados nos locais amostrados (difícil de conseguir em função das obras iniciadas no ano de 2010); compatibilizar o período de aquisição, neste caso o período da primeira aquisição foi entre novembro e dezembro de 2010 (época de chuvas) e para compatibilizar os períodos a pesquisa deveria esperar até novembro/dezembro de 2011, inviabilizando o levantamento de campo em função do prazo da pesquisa; entre outros.

A seção mostra valores de resistividade elétrica elevada próxima à superfície do terreno, contudo, as sondagens realizadas no local mostram um perfil de solo profundo, em torno de 20 m de profundidade, sem nenhuma interferência de material resistente (o termo "material resistente" faz referencia ao valor elevado de Nspt e que seria teoricamente um termo compatível com valor elevado de resistividade elétrica) ao longo do perfil, conforme mostra a sondagem destacada na Figura 4.107.

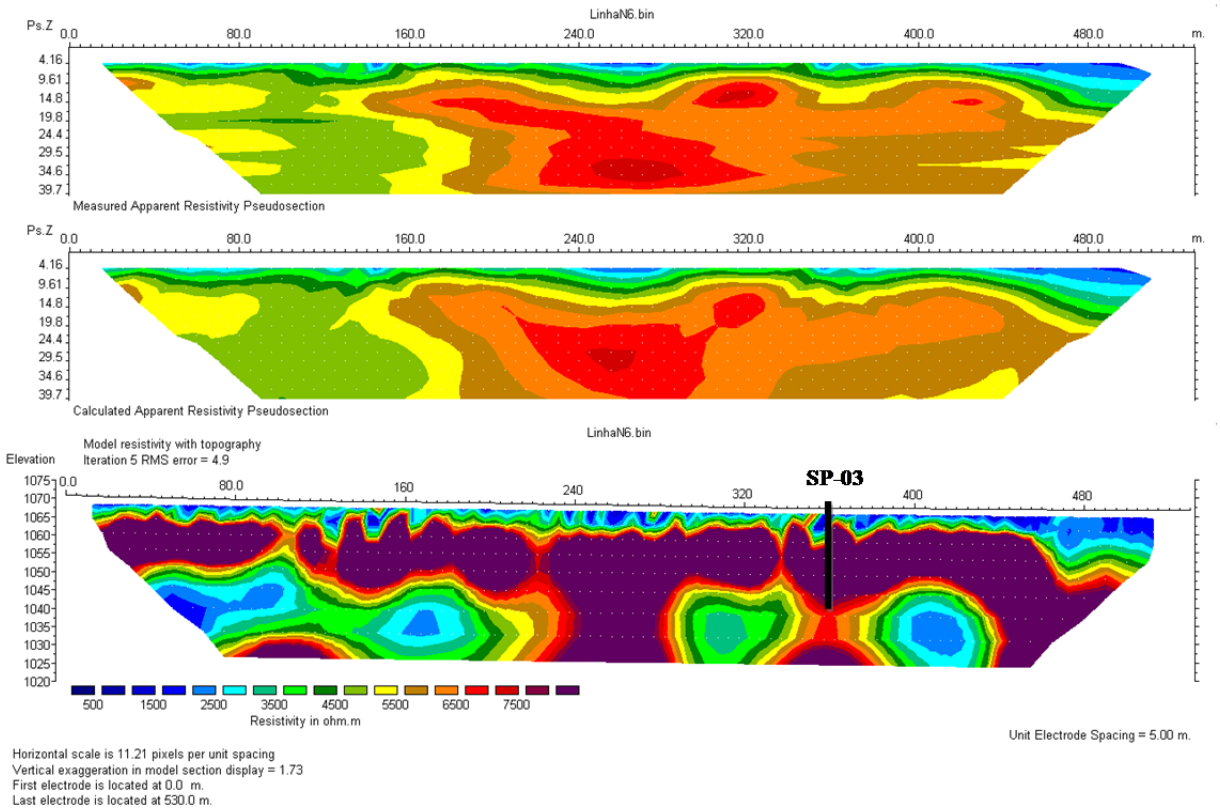


Figura 4.106 – Seção LN-6 de resistividade elétrica no sentido Norte-Sul – Setor Noroeste de Brasília/DF.

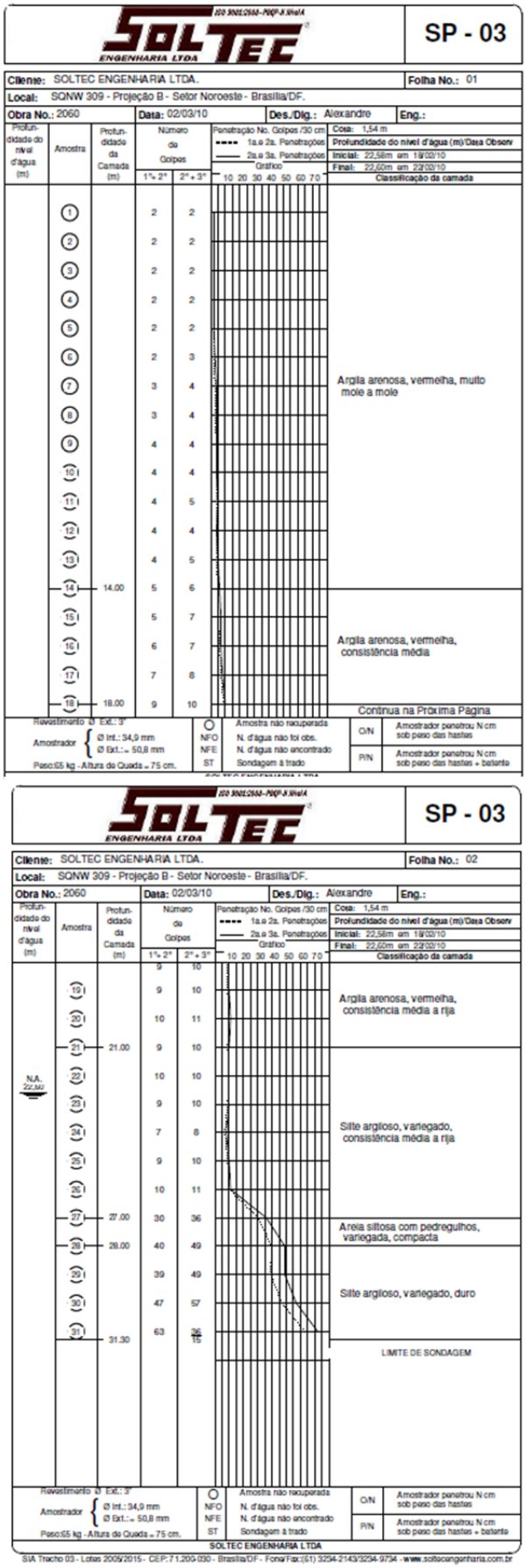


Figura 4.107 – Sondagem SPT próximo a Seção LN-6 de resistividade elétrica – Setor Noroeste de Brasília/DF.

4.9- DIAGRAMA *FENCE* 3D DE SÍSMICA DE REFRAÇÃO

Sabe-se que o diagrama de cercas 3D (*fence* 3D) é realizado a partir do modelo 3D. De maneira que elaborou-se o modelo 3D de sísmica e em seguida fez-se o fatiamento do modelo em várias seções verticais.

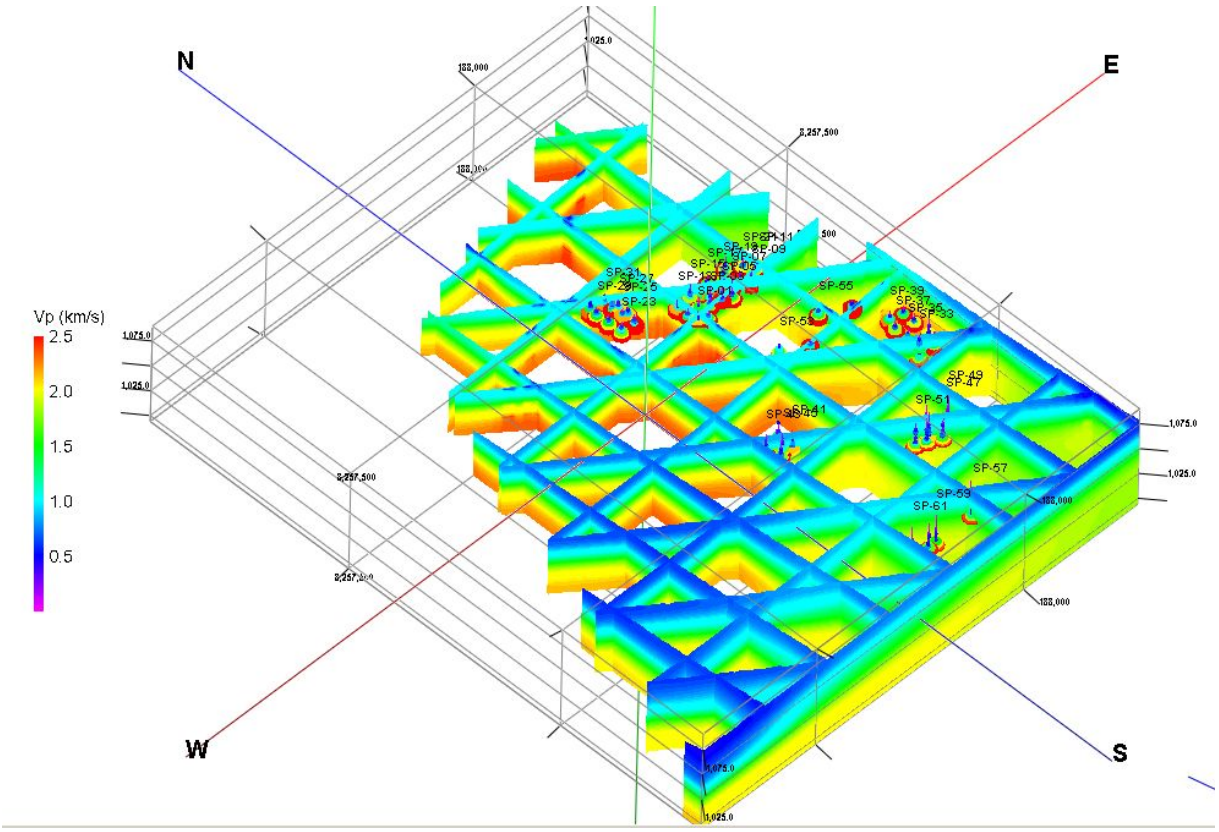


Figura 4.108 – Diagrama *fence* 3D de sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF.

A Figura 4.108 mostra o resultado desta operação, onde os valores da onda P estão classificados no modelo de 0 a 2,5 km/s. Neste modelo utilizou-se o mesmo artifício de adicionar os furos de sondagem SPT para que se pudesse avaliar algum tipo de relação entre os valores de onda P e os valores de Nspt.

A Figura 4.109 mostra o detalhe desta sobreposição, em que os furos de SPT estão destacados em forma de discos sobrepostos, onde tamanho e cor do disco servem para representar tais variações de valores Nspt.

Pode-se o observar uma excelente aderência dos valores de Nspt com os valores de velocidade da onda P. Apesar de que não se conseguir notar pequenas nuances de variação da onda P quando se observa os furos de sondagem SPT, pode-se dizer que este fato foi algo esperado

em razão do tipo de levantamento geofísico empregado que não permite a detecção dessas pequenas variações nas subsuperfícies.

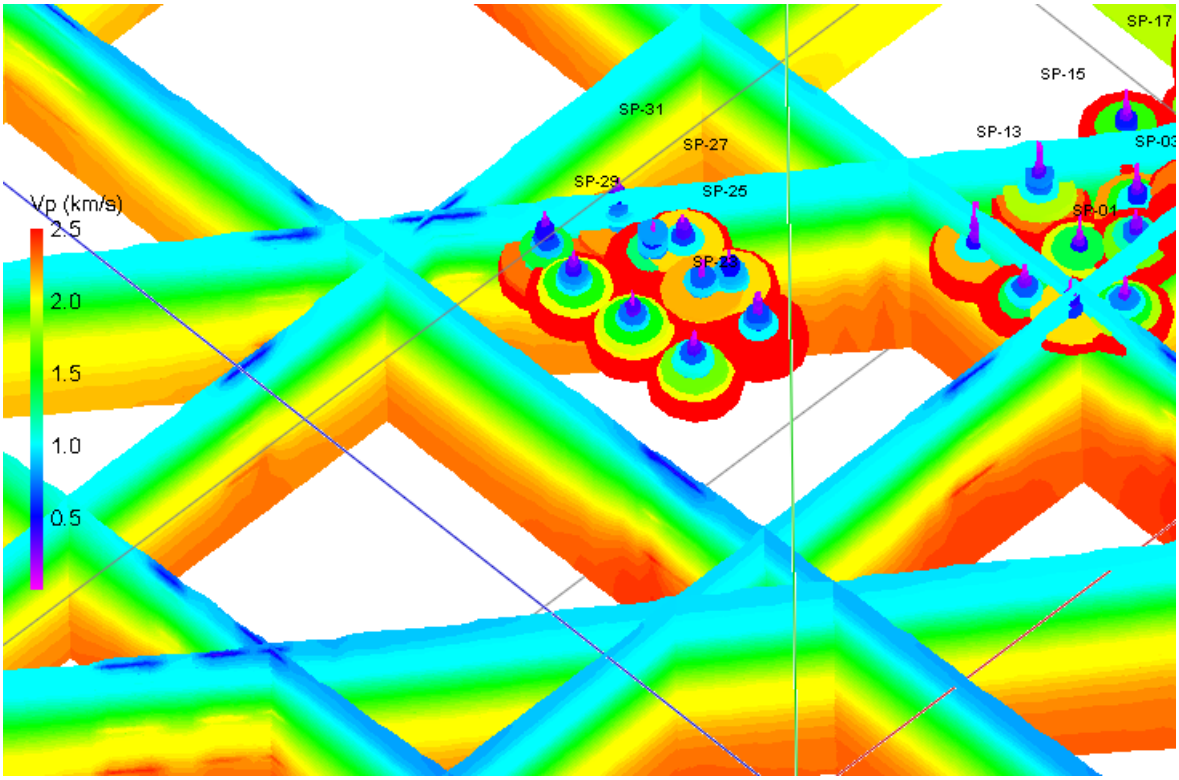


Figura 4.109 – Sondagem SPT inseridas no modelo de sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF.

4.10- DIAGRAMA FENCE 3D DE NSPT

Tal qual o resultado anterior, o diagrama de cercas tridimensionais de Nspt foi realizado a partir do modelo 3D de Nspt. A Figura 4.110 mostra o resultado desta operação. Tanto no modelo de sísmica de refração quanto no modelo de Nspt, pode-se observar uma espessa camada de solo de baixa resistência Nspt mais a sudeste do modelo, diferentemente do resultado apresentado pela eletrorresistividade.

Para melhorar as análises, inseriu-se neste modelo o resultado da interpolação dos dados de nível d'água. A Figura 4.111 mostra o topo do nível d'água inserido no modelo de Nspt, a maior parte das sondagens do banco de dados foram realizadas entre o mês de agosto e o mês de outubro de 2009, que pode-se dizer que está dentro da época de estiagem na região. O modelo de nível d'água utilizou uma técnica conhecida como *cut-off* que limitou a extrapolação dos dados para até o máximo de 5% do valor do raio de busca utilizado pelo interpolador IDW, como pode-se observar em tal figura em que o modelo de nível d'água não foi extrapolado para toda a área coberta pelo modelo.

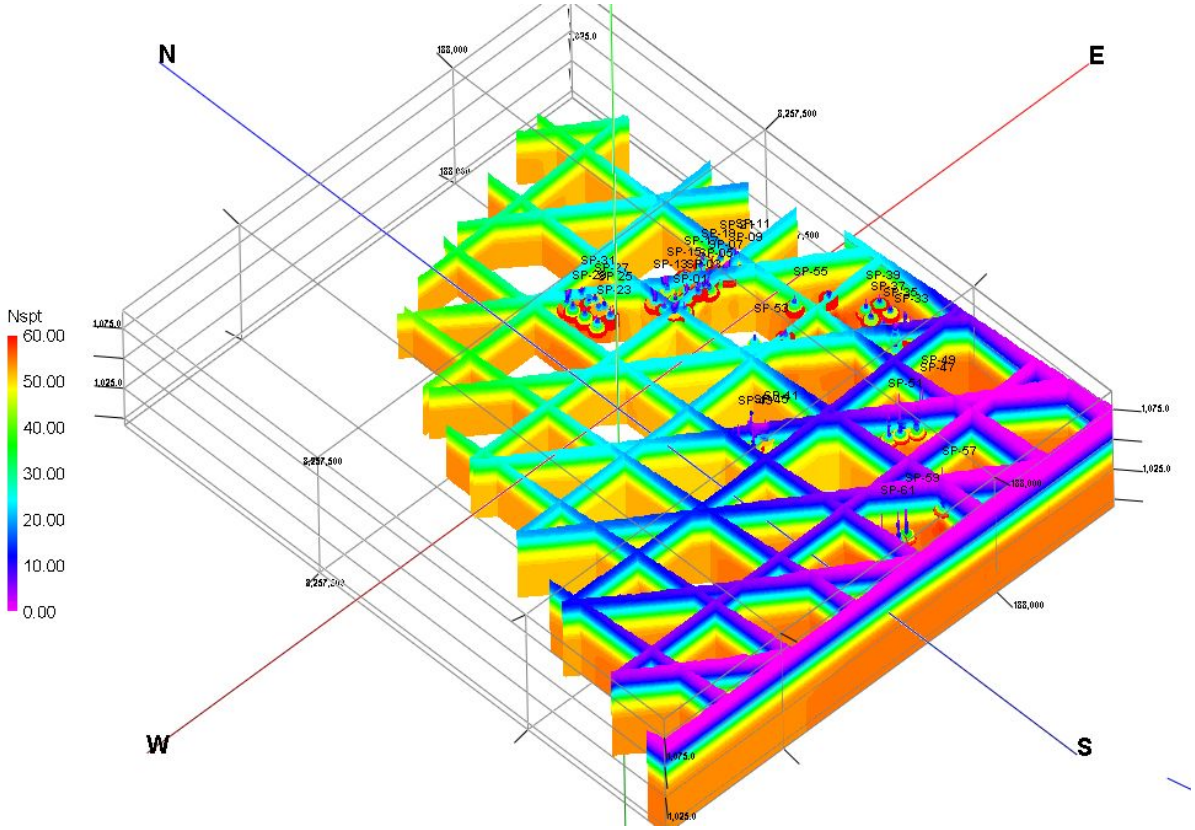


Figura 4.110 – Diagrama *fence* 3D de Nspt – Setor Noroeste de Brasília/DF.

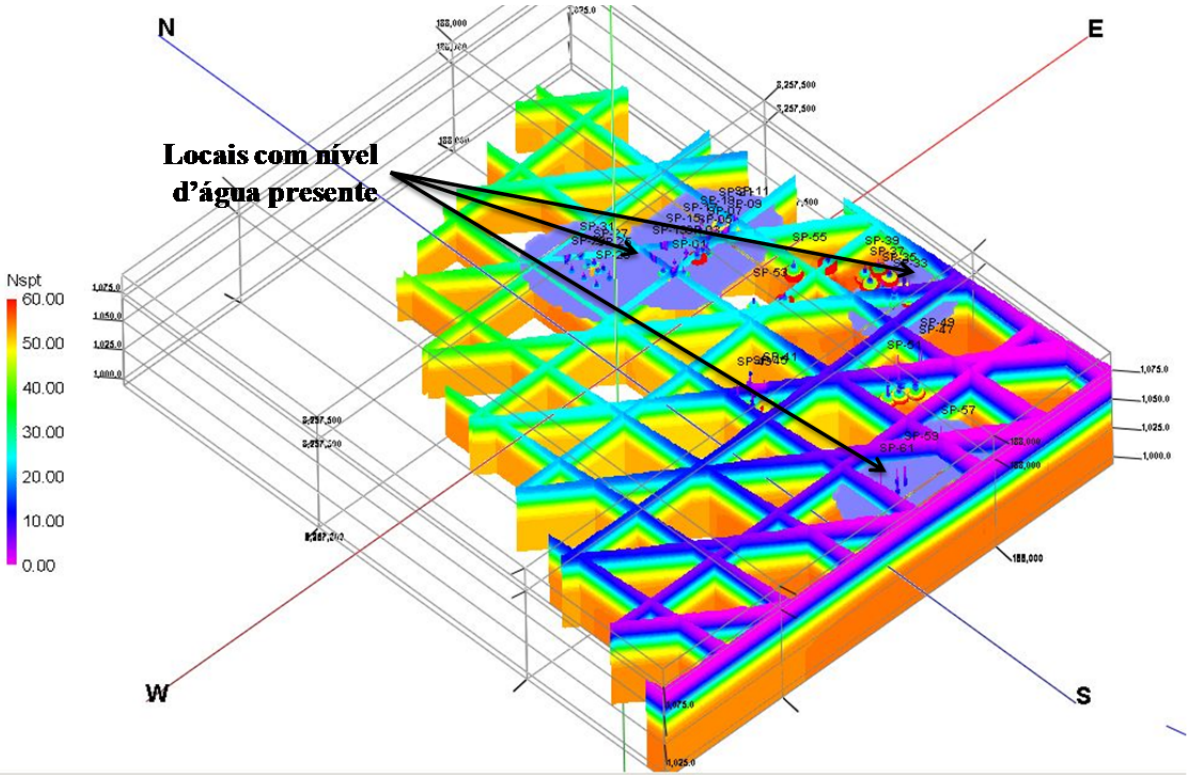


Figura 4.111 – Diagrama *fence* 3D de Nspt com sobreposição do nível d'água – Setor Noroeste de Brasília/DF.

4.11- SEÇÕES 2D DE NSPT E SÍSMICA DE REFRAÇÃO

Escolheram-se três seções no sentido Norte-Sul dentro da área de estudo, em função da topografia do terreno, para gerar resultados de Nspt e sísmica, a fim de comparar os resultados obtidos em ambos dentro da área. Para facilitar as análises, todas as seções passam por furos de sondagem SPT. A Figura 4.112 mostra os locais das seções escolhidas.



Figura 4.112 – Localização de três seções para modelagem de valores de Nspt e sísmica de refração – Setor Noroeste de Brasília/DF.

A Figura 4.113 mostra o resultado obtido para a Seção A-A'. Pode-se notar, pequenas deformações na seção de Nspt, próximas aos furos de sondagem, em razão do peso escolhido para a distância horizontal e do peso escolhido para distância vertical, visto que o interpolador escolhido para modelagem (IDW) leva em consideração estas duas distâncias para o cálculo do peso. Por maior que tenha sido o controle do peso aplicado no sentido vertical, a distância horizontal entre as amostra é relativamente grande, o que provocam estas pequenas deformações no modelo em função dos pesos aplicados. Contudo deve-se levar em consideração o fator escala nos modelos e desconsiderar estas pequenas "falhas de modelagem".

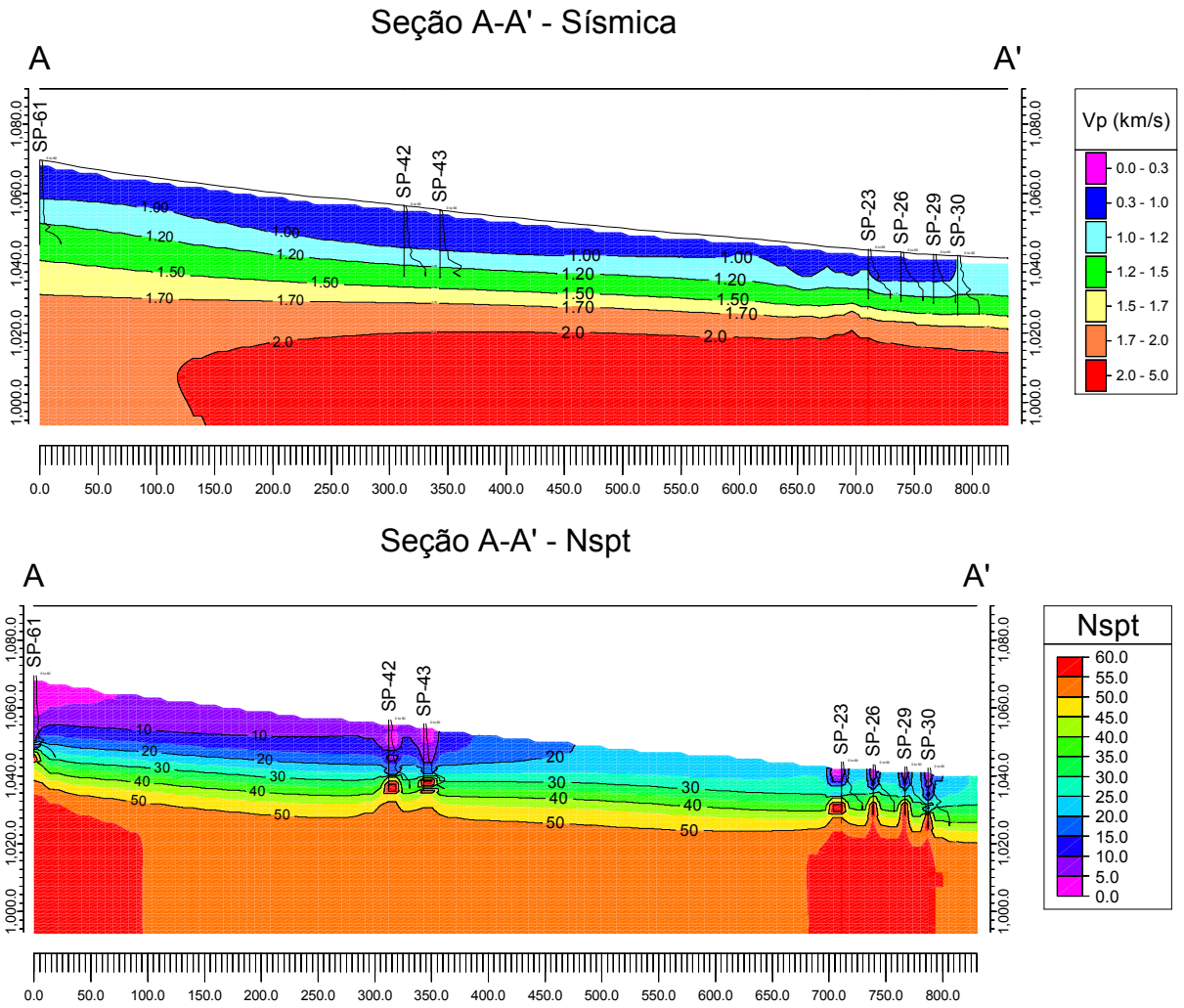


Figura 4.113 – Seção A-A’ de valores de sísmica de refração e Nspt– Setor Noroeste de Brasília/DF.

Pode-se notar na Seção A-A’ que as sondagens SPT atingiram o valor considerado impenetrável (Nspt acima de 50 golpes) entre os intervalos de 1,20 e 1,50 km/s de velocidade de onda P, consideradas à priori como velocidades correspondentes ao saprólito, ou seja, alcançou-se um resultado bastante satisfatório, dentro das expectativas para os modelos. Percebe-se ainda que na parte de cotas topográficas mais baixas o perfil de solo é menor e está entre 10 e 15 metros de profundidade, e nas cotas mais elevadas o perfil de solo aumenta passando para profundidades em torno de 20 metros. Vale lembrar, que esta observação vale apenas para esta seção em específico e que este resultado não deve ser extrapolado para além dos limites da modelagem.

A Figura 4.114 mostra Seção B-B’, nela pode-se perceber a semelhança entre os resultados obtidos com os modelos de sísmica e Nspt, sendo que as pequenas variações entre as camadas não são detectáveis no modelo sísmico.

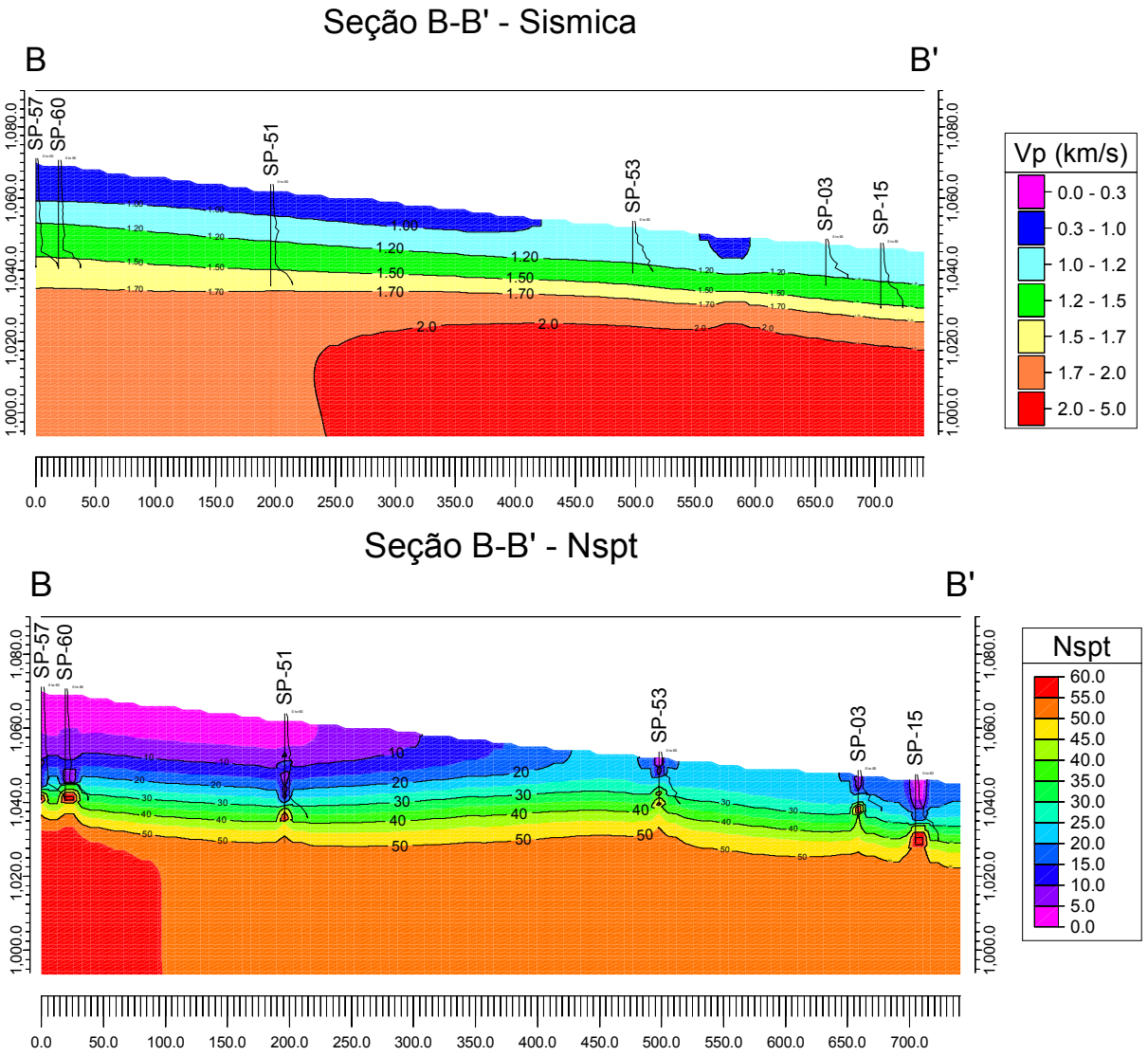


Figura 4.114 – Seção B-B' de valores de sísmica de refração e Nspt– Setor Noroeste de Brasília/DF.

Para finalizar, a Figura 4.115 mostra a Seção C-C' que confirma que boa parte das sondagens SPT atingiram o valor impenetrável próximos a velocidade de onda P de 1,50 km/s.

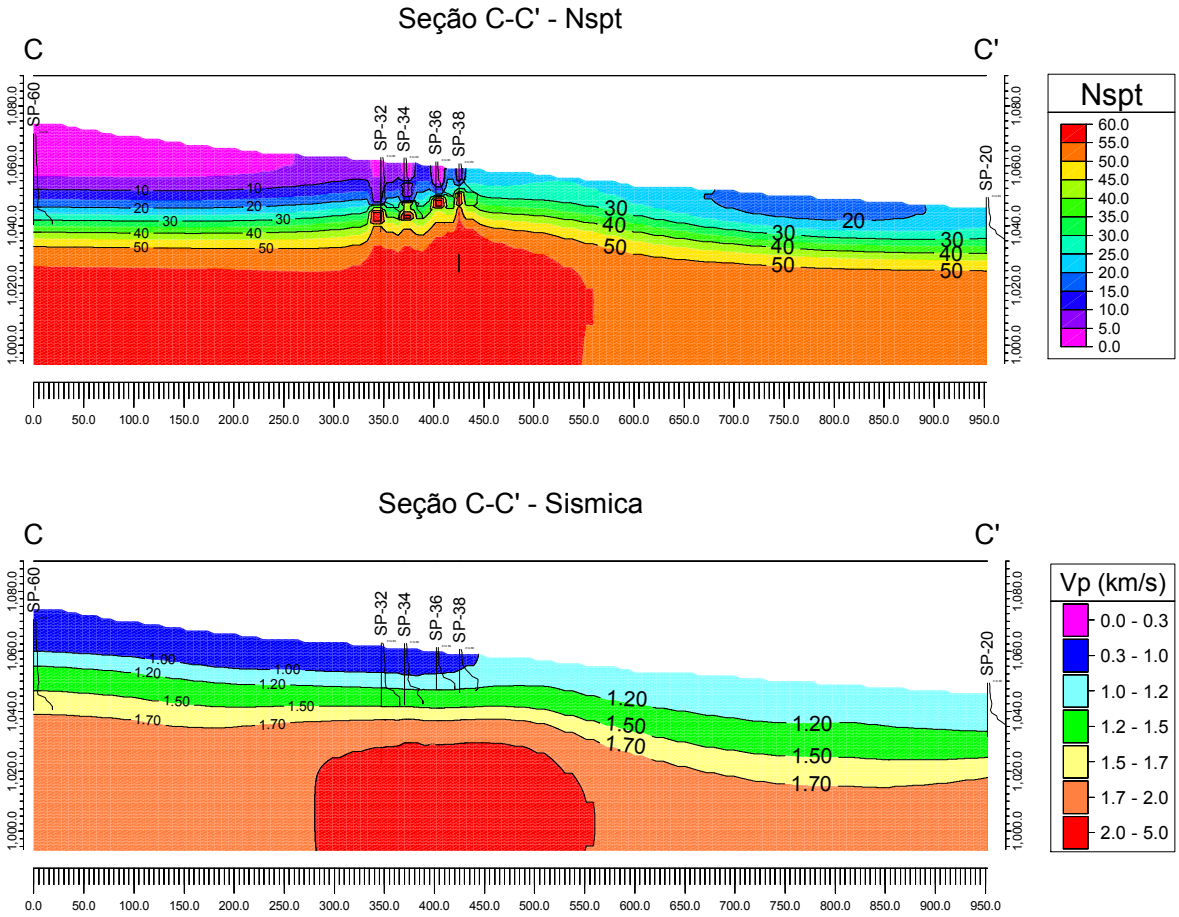


Figura 4.115 – Seção C-C' de valores de sísmica de refração e Nspt – Setor Noroeste de Brasília/DF.

Eventualmente outras seções podem ser propostas, contudo, o critério de escolha dos produtos derivados dos modelos sempre recai na necessidade de cada usuário.

4.12- CARTA DE NÍVEL D'ÁGUA

A carta de nível d'água serve para mostrar além da profundidade do freático os locais onde foram detectados estes valores. A Figura 4.116 mostra o resultado obtido da interpolação dos valores de NA provenientes das sondagens SPT.

Na parte mais ao norte da área esperava-se a existência do nível d'água, em função da marca da drenagem em várias imagens de satélite, entretanto, como se pode perceber, o nível d'água não foi detectado em todas as sondagens, e surgiu mais na porção sul da área em profundidade em torno de 22 m, o que sugere a existência de paleocanais no local.

Como já comentado, a carta de nível d'água foi modelada levando em consideração o raio de alcance do interpolador IDW, com um valor de *cutoff* (corte) de 5% do valor do raio.

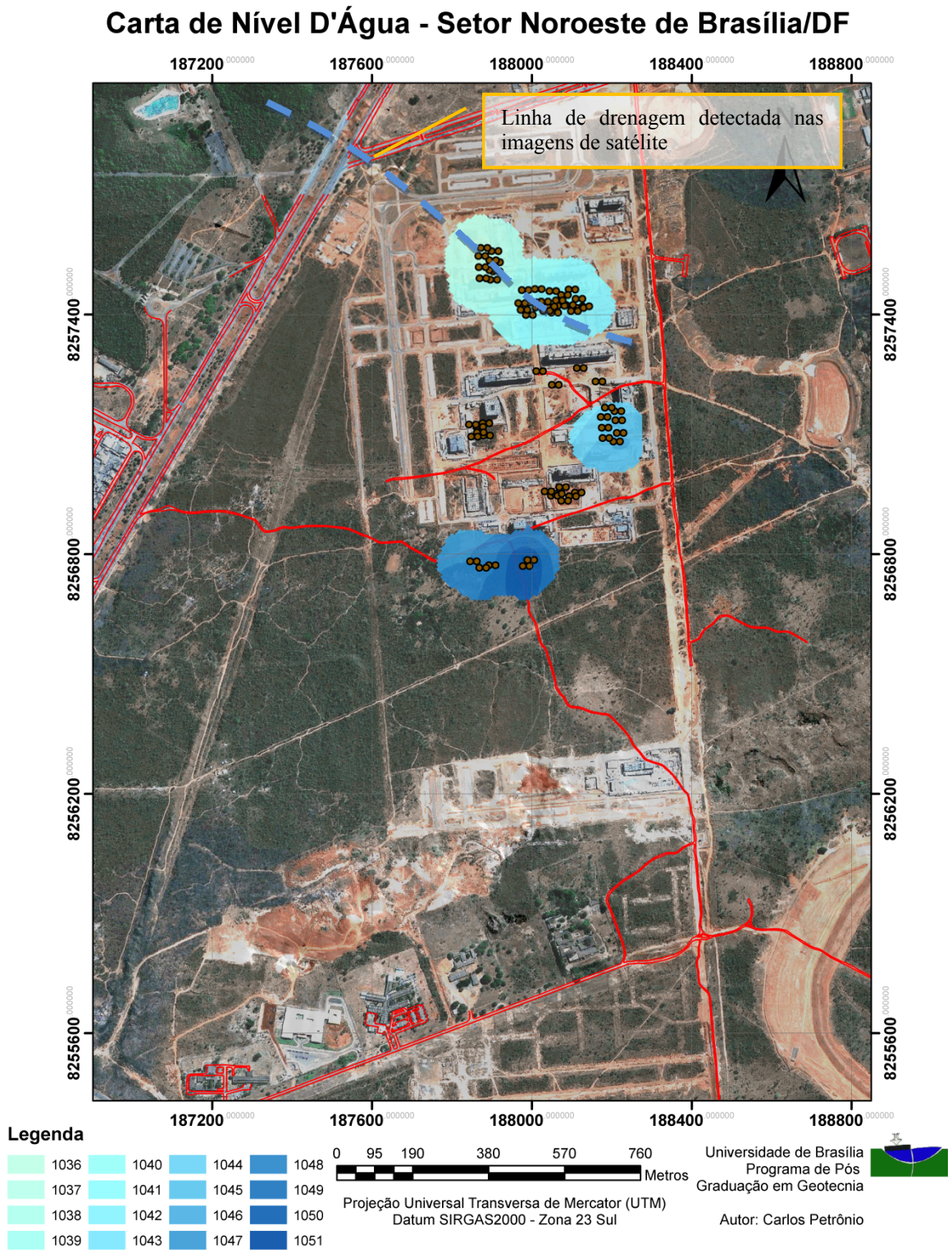


Figura 4.116 – Carta de nível d'água – Setor Noroeste de Brasília/DF.

5- CONCLUSÕES

O mapeamento tridimensional do solo tem por intuito obter o máximo de conhecimento das condições geotécnicas do local da obra para facilitar as análises dos engenheiros. Ao contrário de métodos tradicionais, a interpolação de dados durante o processo de modelagem 3D diminui as incertezas provenientes da variabilidade natural do solo.

Saber o contexto geológico do local a ser modelado é de fundamental importância para o sucesso dos modelos tridimensionais. É importante evitar erros de classificação de solos e rochas, quando os mesmos podem ser obtidos em cartas geológicas/geotécnicas disponíveis na região investigada. Para exemplificar, em algumas sondagens mistas obtidas pela pesquisa, foi classificado como "arenito" rochas que pela geologia local devem ser classificadas como "quartzitos", em função de vários fatores para a formação dessa rocha, explicados pela geologia. O uso de termos inadequados pode acarretar em erros grosseiros nos modelos.

Os modelos tridimensionais propostos pela pesquisa, mesmo que considerados como estudos pontuais ou localizados, podem contribuir com o conhecimento geológico/geotécnico da região, pois são locais considerados bem investigados e que posteriormente podem fornecer informações que ajudem no processo de atualização das cartas geológico/geotécnicas da região.

É primordial para o sucesso de qualquer modelagem o conhecimento regional e local da geologia e geotecnia. De maneira que se pode sugerir que a modelagem não seja realizada por pessoa única e sim por uma equipe multidisciplinar que tenha bastante conhecimento da região e do local a ser modelado. Um exemplo prático disso foi discutido no modelo realizado para a obra "SAUN" em que a descrição da rocha recuperada nas sondagens mista indicava a rocha do tipo "arenito" e com o conhecimento da geologia regional, reclassificou-se esta rocha para "quartzito", obedecendo a classificação realizada pelos geólogos que estudam a região. Erros como este exemplificado podem por em risco a qualidade da modelagem.

Nos casos analisados, observou-se que a modelagem 3D e seus derivados, mostrou ser uma ferramenta eficaz, pois auxilia na localização dos pacotes de solo de baixa resistência e no outro extremo localizar a rocha e sua variação de resistividade, permitindo assim fazer uma compartimentação do maciço de solo e rocha na região de interesse da obra. Além disso,

auxiliam a fixar os comprimentos aproximados das fundações e tomada de decisão no projeto das contenções e escavações.

Contudo, a modelagem 3D foi feita para ser interativa, o que dificulta a análise dos usuários quando foge do ambiente computacional interativo. Neste caso, tanto as seções verticais, os fatiamentos em cerca (*fence*) e as seções horizontais, tornam-se muito mais atrativas em função da melhor trabalhabilidade para o usuário, que dentre outras opções pode imprimir estes produtos derivados em papel, ou optar por deixa-los em formato eletrônico.

Os estudos de caso foram primordiais para a avaliação dos modelos realizados no Setor Noroeste de Brasília. Foi com os estudos de caso que se percebeu a importância do fator de escala nos modelos. A título de comparação, enquanto um estudo de caso apresentou 40 furos de sondagem em área reduzida, os modelos realizados para o Setor Noroeste, com área bem maior, apresentaram apenas 60 furos de sondagem. O que se pode concluir que os modelos realizados para o bairro devem ser analisados muito mais do ponto de vista qualitativo do que do ponto de vista quantitativo, ou seja, percebeu-se o ambiente geotécnico/geológico do bairro de acordo com a escala empregada, de forma que os produtos foram bastante satisfatórios, contudo não se pode exigir a mesma precisão e qualidade que estudos de caso apresentados atingiram.

O uso de resultados de ensaios geofísicos enriqueceram substancialmente os modelos geotécnicos realizados. Tal fato foi confirmado no estudo de caso “Brisas do Lago” em que se conseguiu identificar os locais mais resistentes ou impenetráveis ao SPT fora dos furos de sondagem, além do fato que uma única linha geofísica é capaz de produzir muitos pontos de análise. No Setor Noroeste o uso de sísmica de refração serviu muito bem para identificar o topo rochoso e os locais considerados como impenetrável para o ensaio SPT, complementando muito bem os locais não amostrados por sondagens SPT.

O levantamento geofísico com eletrorresistividade feito no estudo de caso “SAUN”, obteve menor contraste entre os materiais, como aquele apresentado para o estudo “Brisas do Lago”, um forte motivo para isso foi a ausência de nível d’água na obra “SAUN”. A literatura confirma que a presença de água ajuda bastante o levantamento feito com eletrorresistividade.

O modelo 3D de eletrorresistividade feito para o Setor Noroeste não se mostrou mais eficaz do que a análise seção a seção realizada na área. O motivo é simples, uma das seções não

estava coerente e interferiu fortemente nos resultados. Em termos de modelagem de dados, uma solução seria excluir tal seção do modelo, contudo a área a ser avaliada iria reduzir e no caso desta pesquisa a primeira premissa era de manter a mesma área de avaliação até o fim das modelagens, independente dos resultados alcançados em campo.

A integração dos dados de eletrorresistividade e de sísmica de refração para a produção da grande linha norte-sul (linhão geofísico) foi primordial para o entendimento do perfil geotécnico/geológico do bairro, mostrando que as partes com cotas topográficas mais elevadas têm perfil de solo raso e rocha quase aflorante em vários trechos da seção. Os furos de sondagem SPT ajudaram a interpretar os resultados obtidos em campo com geofísica, além de ajudar a compreender melhor os limites de cada modelo geofísico apresentado.

Apesar do uso de parâmetros geofísicos nos modelos, não se conseguiu estabelecer nenhuma correlação direta com os valores obtidos nas sondagens SPT, além da proposta para classificação de camadas de solo/rocha. Este tipo de análise deve ser feito com muito cuidado e merece melhor investigação, esta pesquisa, em razão do planejamento para obter os dados dos levantamentos geofísicos, do tempo para conseguir os dados de sondagem SPT junto as empresas, principalmente no Setor Noroeste que só conseguiu realizar campanhas de sondagem SPT entre a metade do ano de 2009 até o fim de 2010, não alcançou condições suficientes para estabelecer algum tipo de correlação. Nas tentativas que foram feitas com os dados de eletrorresistividade e dados de SPT não se conseguiu estabelecer correlação direta em razão de que em muitas ocasiões foram identificados locais de valores elevados de resistividade elétrica, que teoricamente dariam valores elevados de resistência Nspt, contudo na prática apresentaram valores baixos de Nspt.

Tais evidências devem ser melhor investigadas, levando em consideração o grau de saturação do solo em tais camadas, o efeito da sucção do solo no momento da leitura com o equipamento de eletrorresistividade, data de aquisição dos dados, tipo de solo, presença do nível d'água ou não, saber que o ensaio SPT desestrutura tais camadas mais resistiva de solo durante o processo de cravação do amostrador, saber se o solo é laterítico ou não, entre outros parâmetros.

A proposta de produzir um modelo de capacidade de carga foi extremamente satisfatória, e de valor prático, contudo deve-se ter o cuidado de levar em consideração os métodos tradicionais e os ensaios de campo, como ensaios de provas de carga estáticas, a fim de calibrar o modelo

de capacidade de carga. Além disso, o controle da obra com a espacialização das fundações de projeto e com a espacialização das fundações executadas, no modelo de capacidade de carga, diminuem substancialmente as incertezas da obra e promovendo maior economia na execução das fundações.

Como se percebeu nos resultados alcançados, não houve um consenso do que seria o melhor "pacote" de produtos a serem oferecidos pela modelagem. Cada estudo de caso solicitou soluções específicas e, por conseguinte, produtos específicos dos modelos. O mais importante é que o modelo 3D esteja preparado para atender a demanda solicitada, e que o usuário do modelo esteja preparado para saber os limites de cada modelo realizado, principalmente no que se refere à escala empregada em cada modelo, a quantidade de dados obtidos e utilizados para confecção dos modelos, suas limitações e empregabilidade, além do conhecimento técnico para o perfeito uso destes dados.

O modelo de grau de recuperação de rocha foi bastante apreciado pelo estudo de caso "SAUN", pois foi utilizado para controlar a quantidade de rocha a ser extraída durante a escavação do subsolo da obra e para identificar locais possíveis de utilizar algum tipo de equipamento pesado para extração de rocha ou até mesmo explosivos. Segundo a obra, a quantidade de rocha a ser extraída do local, calculada pelo modelo, estavam de acordo com os valores extraídos pela escavação, com pequena discrepância, que foi definida como irrisória pela gerencia da obra.

De fato, quando algum modelo atinge certo grau de sucesso, outras ideias surgem para outras modelagens, por exemplo, a espacialização do grau de fraturamento poderia ajudar ainda mais os locais em que o valor de grau de recuperação é elevado no modelo de recuperação de rocha. A priori imagina-se que quando a sondagem recupera valores próximos a 100% de rocha que a rocha em profundidade é sã, entretanto este entendimento pode não ser verdadeiro, ou seja, recuperar valores elevados de rocha não significa necessariamente que haverá dificuldades em extrair a rocha do local, o que seria função do modelo de grau de fraturamento identificar. Por exemplo, recuperou-se valores de até 95% de rocha com grau de fraturamento F3, que seria classificado como uma rocha fraturada e que poderia significar que não haveria grandes dificuldades em extrair a rocha do local, contudo a ideia de gerar um modelo de grau de fraturamento para este estudo de caso surgiu quase ao fim da escavação do subsolo da obra.

Na análise de fator de escala de modelo a relação entre quantidade de furos e área de estudo obtida nos estudos de caso é de 1 sondagem para cada 33 m², número este que resultou em bons resultados para os estudos de caso. Para a área avaliada nas modelagens feitas para o Setor Noroeste de aproximadamente 102 hectares, se a relação de fator de escala empregada for a mesma, seria necessário realizar aproximadamente 3.400 furos de sondagem para obter, teoricamente, um grau de precisão próximo ao grau de precisão alcançado nos estudos de caso.

O processo de pós-avaliação dos modelos produzidos pelos programas computacionais sempre deve ser feito com critério. Ou seja, todo processo de modelagem tridimensional de sub-superfícies ou espaço subterrâneo, requer experiência geológica/geotécnica da região e conhecimento das limitações e potencialidades dos programas computacionais tais como a quantidade de atributos de entrada, limite da grade de trabalho, interpoladores utilizados e suas limitações.

5.1- SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Continuar a expansão do banco de dados do Setor Noroeste, de preferência, com mais sondagens SPT e se possível, outros dados de laboratório, como ângulo de atrito do solo, valores de coesão, entre outros, que possam fornecer mais subsídios à produção de modelos geomecânicos.

- Investigar a relação entre os resultados de eletrorresistividade e Nspt sob a ótica apresentada nas conclusões que sugere: levar em consideração o grau de saturação do solo em tais camadas, o efeito da sucção do solo no momento da leitura com o equipamento de eletrorresistividade, data de aquisição dos dados, tipo de solo, presença do nível d'água ou não, saber que o ensaio SPT desestrutura tais camadas mais resistentes de solo durante o processo de cravação do amostrador, saber se o solo é laterítico ou não, entre outros parâmetros.

- Produzir um modelo de capacidade de carga para o Setor Noroeste, em função de provas de carga que possam ser adquiridas no Setor Noroeste e em função das sondagems SPT.

- Estudo da onda P e onda S em laboratório a partir da extração de testemunhos de sondagem rotativa, para estimativa de módulo de Young.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE (1999). Manual de Sondagens. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, ABGE, Coordenador Wilson Shoji Iyomasada, ISBN 85-7270-003-X, Boletim n^{0}03, 4. ed., São Paulo, SP, 73 p.

ABNT (1983). Norma Técnica NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro RJ, 18 p.

ABNT (1995). Norma Técnica NBR 13441. Rochas e solos - Simbologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro, RJ. 13 p.

ABNT (2001). Norma Técnica NBR 6484. Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, ABNT, Rio de Janeiro, RJ. 12 p.

Ab'Saber, A. N. (1968). Uma revisão do quaternário paulista: do presente para o passado. Revista Brasileira de Geografia, 31 (4), 1-51 p.

Aguiar, R. L. (1997). Zoneamento Geotécnico Geral do Distrito Federal: Procedimentos metodológicos e sua inserção na gestão ambiental. São Carlos, SP, volume 1, 269 p.

Almeida, F. F. M. (1965) Geologia da Serra de Bodoquena, Mato Grosso. Ministério das Minas e Energia, DNPM, DGM, Rio de Janeiro, Bol. 215.

Almeida, F. F. M. (1967a). Origem e Evolução da Plataforma Brasileira. Divisão de Geologia e Mineralogia, Boletim 241, Rio de Janeiro, RJ, 29-36 p.

Almeida, F. F. M. (1967b). Nota Sobre o Pré-cambriano da Região Central de Goiás. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, (26)19-22.

Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Rev. Bras. Geoc*.,**7**:349-364.

Almeida, F. F. M. (1978). O cráton do São Francisco. Secretaria das Minas e Energia, Coordenação da Produção Mineral, Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo da Bahia. Anais da Reunião Preparatória para o Simpósio sobre o Craton do São Francisco e suas Faixas Marginais – agosto, 1977. Publicação Especial n^0 03, Salvador, BA, 13-15 p.

Almeida, F.F.M. (1981). O cráton do paramirim e suas relações com o do São Francisco. In: Simpósio cráton do São Francisco e faixas marginais, Salvador, 1981. Anais, SBG, Salvador, BA, 1-9 p.

Almeida, F.F.M., Hasui, Y.; Neves, B. B. B., Fuck, R. A. (1976). The Upper Precambrian of South America, Universidade de São Paulo, São Paulo, Bol. IG. (7):45-50.

Alves, P. C. (2009). Cartografia Geotécnica para Obras Subterrâneas: Condições de Construções de Garagens Subterrâneas e Metrô no Plano Piloto de Brasília. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 178/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.

American Society Of Civil Engineers (1997). *Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction, Guidelines and Practices. Geotechnical Reports of the Underground Technology Research Council*. Ed. ASCE, Virginia, USA, 51 p.

Andriotti, J. L. S. (2009). Fundamentos de Estatística e Geoestatística. Editora Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos. Coleção Manual Universitário – ISBN 85-7431-171-5, Segunda Reimpressão, verão de 2009, RS, São Leopoldo, 165 p.

Aquino, F. R. (2010). Estudo Comparativo entre a Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas de um Solo Argiloso Compactado. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-189/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 p.

ASTM (2006). D 5777 00: *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation1. American Society for Testing and Materials*, 14 p.

Barbosa, O. (1955). Guia das Excursões. IX Congresso da Sociedade Brasileira de Geologia, Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo. (3): 3-5.

Barbosa, O. (1963). Geologia Econômica e Aplicada a Uma Parte do Planalto Central Brasileiro. MME/DNPM?DGM/PROSPEC, Rio de Janeiro, inédito.

Barbosa, O. (1963).Geologia Econômica e Aplicada a Uma Parte do Planalto Central Brasileiro. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral/PROSPEC, Rio de Janeiro.

Barbosa, O.; Ramos, J. R. A.; Gomes, F. A. & Helmbold, R. (1966). Geologia Estratigráfica, Estrutural e Econômica da Área do Projeto Araguaia. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia, Rio de Janeiro, Monografia XIX.

Barton, N. (2007). *Rock quality, seismic velocity, attenuation, and anisotropy. Taylor & Francis Group,* ISBN 0-203-96445-4, *Taylor & Francis Group, London, UK*. 756 p.

Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. CMG (vol.13), ISBN 0-08-042420-1 (*Flexcover*), Pergamon, Ottawa, USA, 398 p.

Braga, A. C. O. (1988). Métodos Geoelétricos – Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico. Geofísica Aplicada à Geologia de Engenharia. Curso de Aperfeiçoamento em

Geologia de Engenharia e Mineração. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. São Paulo, SP, 70 p.

Burrough, A.P. & Mcdonnell, R.A (1998). *Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press*; 2 *edition*: 98-132.

Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas., U.M.; Garrido, J.; & II, F.M. (1996). SPRING: *integrating remote sensing and GIS by objectoriented Data modeling. National Institute for Space Research (Inpe), Brazil. J Computer & Graphics* 20 (3): 395-403.

Câmara, G. Davis, C., Monteiro, A.M.V., (1998). Conceitos básicos em Ciência da Geoinformação. Página Web: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.htm>. Acesso em: set. 2006.

Camargo, E.C.G. (1997). Desenvolvimento, Implantação e Teste de Procedimentos Geoestatísticos (krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferênciados (SPRING). Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, SP,105 p.

Campanella, R.G. & Weemees, I. (1990). *Development and use of an electrical resistivity cone of groundwater contamination studies. Canadian Geotechnical Journal*, Nº 27, p. 557-567.

Carneiro, P.J.R. (1999). Mapeamento Geotécnico e Caracterização dos Materiais Naturais de Construção do Distrito Federal: Uma Base de Dados para o Planejamento e Gestão. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-001A/99, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 209 p.

Chilès, J. P. & Delfiner, P. (1999). *Geostatistics - Modeling Spatial Uncertainty*. *Wiley series in probability and statistics - Applied probability and statistics*. ISBN 0-471-08315-1, *New York*, USA, 704 p.

Cintra, J. C. A. & Aoki, N. (2010). Fundações por Estacas: Projeto Geotécnico. Editora Oficina de Textos – ISBN 978-85-7975-004-5, São Paulo, SP, 96 p.

Codeplan (1984). O Relatório Técnico Sobre a Nova Capital da República – Relatório Belcher. 3ª Edição, Brasília, DF, 316 p.

Codeplan (1987). Relatório da Comissão Exploradora do Planalto Central: Relatório Cruls / Luiz Cruls. 5ª Edição, Brasília, DF, 396 p.

Codeplan (1998). Cartas planialtimétricas em formato vetorial, na escala 1:2000, com informações sobre sistema viário, hidrografia, hipsometria e áreas urbanas. Sistema Cartográfico do Distrito Federal, Sicad, Brasília, DF.

Costa, L.A.M. & ANGEIRAS, A.G. (1971). *Geossynclinal evolution of the epi-Baykalian plataform of Central Brazil. Geol.Runds*. 60 (3): 1024-1050.

Dardenne, M.A. (1978). Síntese Sobre a Estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXX, Anais, v. 2, p.597-61.

Dearman, W.R. (1991). *Engineering Geological Mapping. British Library Cataloguing Pubication Data. Butterworth & Heinemama, London, Uk*, 415 p.

Delatim, I. J. (2011). A Qualidade dos Serviços de Sondagens Executados no Brasil. Mesa Redonda: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) & Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS). São Paulo, SP, 25 p.

Deutsch, C.V. & Journel, A. G. (1998). GSLIB: *Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press*, ISBN 0-19-510015-8, USA, New York, 189 p.

Diggle, P. J. & Ribeiro Jr., P. J. (2007). *Model-based Geostatistics. Springer Science +Business Media*, ISBN-10: 0-387-32907-2, *New York,* USA, 242 p.

Dourado, J. C. (1984). A Utilização da Sísmica na Determinação de Parâmetros Elásticos de Maciços Rochosos e Terrosos "In Situ". Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE. São Paulo, SP, 12 p.

Elis, V. R. & Zuquette, L. V (1996). Caminhamento elétrico dipolo-dipolo- In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 8, Rio de Janeiro, RJ. Anais. Rio de Janeiro, RJ: ABGE, 1996, v-1, 10 p.

Faria, A. (1995). Estratigrafia e Sistemas Deposicionais do Grupo Paranoá nas Áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D'aliança - Alto Paraíso De Goiás. Tese de Doutorado, 4, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 199 p.

Fernandes, C. E. M (1984). Fundamentos de Prospecção Geofísica. Editora Interciência Ltda. Rio de Janeiro, RJ, 190 p.

Fukue M, Minato T, Horibe H & Taya N. 1999. *The micro-structures of clay given by resistivity measurements. Engineering Geology*,54: 43-53.

Gandolfo, O. C. B. (2011). Geofísica e Sondagens. Mesa Redonda: Sondagens, Método, Procedimentos e Qualidade. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) & Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS). São Paulo, SP, 25 p.

Hasui, Y. ; Abreu, F. A. M. & Silva, J. M. R. (1977). Estratigrafia da faixa de dobramentos Paraguai-Araguaia no centro-norte do Brasil. Boletim IG-USP, v. 8, São Paulo, SP, 107 – 118 p.

Hengl, T. (2009). *A Practical Guide to Geostatistical Mapping. Printed in Amsterdam*, ISBN 978-90-9024981-0, *European Communities*, 292 p.

Hoek, E. & Palmieri, A. (1998). *Geotechnical risks on large civil engineering projects. Keynote address for Theme I – International Association of Engineering Geologists Congress,* Vancouver, Canada, 12 p.

IAEG (1976). *Guide por la preparation des cartes géotechniques*. Paris. *Les Press de* l'Unesco. 79 p.

ICA (1966). *International Cartographic Association (British National Committee for Geography subcommittee). Glossary of Technical Terms in Cartography. London: Royal Society*, 16 p.

Joly, F. (1917). A Cartografia. Trad. Tânia Pellegrini, Editora Papirus (1990), ISBN 85-308-0115-6, – Campinas, SP, 112 p.

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *A Introduction to Geophysical Exploration. 3 edition, Blackwell Science Ltd, Uk*. 281 p.

King, L. C. (1956). A geomorfologia do Brasil Central. Revista Brasileira de Geografia. IBGE, 18 (2), Rio de Janeiro, RJ, 147-265 p.

Kolbe, T. H., Konig, G., Nagel, C. (2011). *Advances in 3D Geo-Information Sciences*. Ed.: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, ISBN 978-3-642-12669-7, *Berlin, German*, 310 p.

Krasilnikov, P., Carré, F. & Montanarella, L. (2008). *Soil geography and geostatistics - Concepts and Applications. Printed in Luxembourg*, ISBN 978-92-79-08720-2, *European Communities*, 212 p.

Landim, P.M.B. (1998). Análise Estatística de Dados Geológicos. Unesp, São Paulo, SP, 266 p.

Landim, P.M.B. (2000). Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. Unesp, São Paulo, SP, 18 p.

Lee, J., Zlatanova, S. (2009). *3D Geo-Information Sciences*. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* ISSN: 1863-2246, Ed. Springer-Verlag, *European Communit*, deblik, Berlin, 438 p.

Lillie, R. J. (1999). *Whole Earth Geophysics: An Introductory Textbook For Geologists And Geophysicists*. *Oregon State University*, Ed. Prentice-Hall Inc., ISBN – 0-13-490517-2. USA, New Jersey, 192 p.

Loke, M. H. (1999). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies*. Penang, Malaysia. 57 p.

Luiz, J.G. & Silva, L.M.C. (1995). Geofísica de Prospecção. v.1. Belém: Universidade Federal do Pará, 311 p.

Maguire, D.J., Goodchild, M.F., Rhind, D.W. (1991). *Geographical Information Systems, Principles. Longman Scientific & Techical*, Vol.1, 649 p.

Marini, O. J.; Fuck, R. A. & Danni, J. C. (1981). A Evolução Geotectônica da Faixa Brasília e seu Embasamento. SIMPÓSIO SOBRE O CRATON SÃO FRANCSCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, Sociedade Brasileira de Geologia, Anais., Salvador, BA.

Matula, M. (1979). *Regional Engineering geological mapping for planning purposes*. Boletim da Iaeg 19: 18-24.

Milititsky, J., Consoli, N. C. & Schnaid, F. (2008). Patologia das Fundações. Editora Oficina de Textos – ISBN 978-85-86238-81-9, São Paulo, SP, 207 p.

Mooney, W. D., (1998) *Crust and Lithospheric Structure – Global Crustal Structure. Treatise on Geophysics. Volume 1. Seismology and Structure of the Earth*. Ed. Elsevier. p 360 – 417.

Nogueira, R. E. (2009). Cartografia: representação, comunicação e visualização de dados espaciais. Editora da UFSC, 3. ed. revisada e ampliada. ISBN 978-85-328-0473-0, Florianópolis, SC, 327 p.

Oliveira, F. S. (2004). Estudo Experimental de Uma Área Contaminada por Lodo Biossólido no Df Via Ensaios de Cone Resistivo. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-122/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111 p.

Oliveira, M.G. (1996). Mapeamento Geotécnico da Asa Sul - Brasília-DF. Dissertação de Mestrado, Publicação G.D.M-036A/96, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.

Pastore, E. L. (2009). Riscos Geológicos em Obras Civis. Revista Engenharia, Engenho Editora Técnica Ltda, Edição n^0 592, São Paulo, SP, 6 p.

Patias, J. (2010). Zoneamento Geotécnico com Base em Krigagem Ordinária e Equações Multiquádricas: Barragem de Itaipu. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 319 p.

Pinto, M. N (1987). Superfícies de Aplainamento do Distrito Federal. Revista Brasileira de Geografia, Ano:49, número: 2. Publicação trimestral, Rio de Janeiro, RJ, 9-25 p.

Rebello, Y. C. P., (2008). Fundações – Guia Prático de Projeto, Execução e Dimensionamento. Editora: Zigurate Editora – ISBN 978-85-85570-10-1, São Paulo, SP, 239 p.

Rêgo, M.C.A. (1997). Mapeamento Geotécnico da porção Sul da área de proteção Ambiental da Bacia do Rio Descoberto. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-041A/97, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123 p.

Ribeiro, H. J. P. (2009). Introdução. Ribeiro, H. J. P. (org.). Estratigrafia de Sequências: Fundamentos e Aplicações. Editora Unisinos, MEC/CAPES, FINEP (PADCT III), São Leopoldo do Sul, Rio Grande do Sul.

Romão, P. A. (2006). Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas - região de Goiânia - GO. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-034/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 166p.

Romão, P.A. & Souza, N.M. (1996). Mapeamento geotécnico da região de Águas Claras-DF: utilização de geoprocessamento. In: 2 Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e I Encontro Regional de Geotecnia e Meio Ambiente. ABGE. São Carlos, SP: 155-163.

Schnaid, F. (2000). Ensaios de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações. Editora Oficina de Textos – ISBN 85-86238-13-9, São Paulo, SP, 189 p.

Shepard, D. (1968). *A Two-Dimensional Interpolation Function for Irregularly-Spaced Data*. *Proceedings of the 1968 ACM National Conference*. doi:10.1145/800186.810616, 517–524 p.

Silva, F.H. & Campos, J. E. (1999) Geologia do Distrito Federal, In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal, J.E.G. Campos & F.H.Freitas-Silva,(coords.), cap. 1, 45 p., CDROM, Sematec, GDF.

Silva, C. P. L. (2007). Cartografia Geotécnica de Grande Escala: Estudo de Caso Brasília - Área Tombada pela UNESCO. Dissertação de Mestrado, publicação nº G. DM-153/07. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121 p.

Silva, C. P. L. & Souza, N. M. (2009). Desenvolvimento de Modelagem Tridimensional de Subsuperfícies. Livro Comemorativo dos Vinte Anos do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. Editora FT, ISBN 978-85-60313-15-0, Brasília, DF, 441-470 p.

Silva, J. L (2004). Metodologia de Projeto de Fundações por Estaca Incluindo Probabilidade de Ruína. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 118 p.

Souza, L. A. P, Silva, R. F. & Iyomasa, W. S. (1998). Métodos de Investigação. Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, CNPq, Fapesp, ISBN – 85-7270-002-1, São Paulo, SP, (11) 163-196 p.

Souza, N. M. (2004). Cartografia Geotécnica. Apostila do Curso de Conceitos Básicos de Cartografia Geotécnica, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 43 p.

Souza, N. M. (2009). Grupo de Pesquisa Cartografia Geotécnica e Geoprocessamento. Livro Comemorativo dos Vinte Anos do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. Editora FT, ISBN 978-85-60313-15-0, Brasília, DF, 426-440 p.

Sturaro, J. R. (1994). Mapeamento Geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas em sondagens de simples reconhecimento. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 183 p.

Sturaro, J.R. & Landim, P.M.B. (1996). Mapeamento geostatístico de ensaios de penetração padronizada (SPT). Solos e Rochas- Revista Brasileira de Geotecnia, 19 (1): 3-14.

Telford, W. M., Geldart, L. P. e Sheriff, R. E., 2004, *Applied Geophysics*: EUA, Cambridge University Press, 2ª edição digitalizada.

Terracap (1998). Estudo de Impacto Ambiental – EIA - do Setor Residencial Noroeste: avaliação ambiental/Companhia Imobiliária de Brasília; Tecnologia e Consultoria Brasileira S/A. - Brasília : Terracap, TC/BR. Brasília, DF. 191 p.

Tsutsumi, M. (2000), Exploração do Subsolo. Mecânica dos Solos I, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes, UFJF, Juiz de Fora, MG, 37 p.

Valeriano, C.M.; Machado, N.; Simonetti, A.; Valladares, C.S.; Seer, H.J. & Simões, L.S.A. (2004). U-Pb *geochronology of the southern Brasília belt (SE-Brazil): sedimentary provenance, Neoproterozoic orogeny and assembly of west gondwana. Precambrian Research*, 130: 27-55.

Vilar, O. M. & Esquivel, E. R. (2009). Engenharia de Fundações: Passado Recente e Perspectivas - Homenagem ao Prof. Nelson Aoki. Suprema Gráfica e Editora Ltda, ISBN : 978-98156-46-0, São Carlos, SP, 403 p.

Weemees, I. A. 1990. *Development of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies*. M.A.Sc. Thesis. *Department of Civil Engineering, University of British Columbia*. *Vancouver*, BC, 86 p.

Zuquette, L.V. (1987). Análise Crítica sobre Cartografia Geotécnica e Proposta Metodológica para as Condições Brasileiras. Tese de doutorado, EESC/USP, São Carlos, SP, 3 vols, 673 p.