

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

INTEGRAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO DE ELETORRESISTIVIDADE E
ENSAIOS SPT NA INVESTIGAÇÃO DE PERFIS DE SUBSOLOS DA REGIÃO
METROPOLITANA DE SALVADOR (RMS)

Juliana Teles Diniz Gonçalves

Salvador

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

INTEGRAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO DE ELETORRESISTIVIDADE E
ENSAIOS SPT NA INVESTIGAÇÃO DE PERFIS DE SUBSOLOS DA REGIÃO
METROPOLITANA DE SALVADOR (RMS)

Juliana Teles Diniz Gonçalves

Dissertação apresentada ao **PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CI-
VIL** como requisito parcial à obtenção do título
de MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Barsottelli Botelho

Salvador

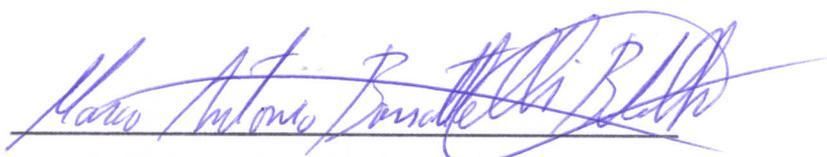
2019

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

JULIANA TELES DINIZ GONÇALVES

APRESENTADA AO MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DA BAHIA, EM 18 DE FEVEREIRO DE 2019.

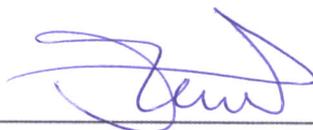
BANCA EXAMINADORA



Profº. Drº Marco Antonio Barsotelli Botelho

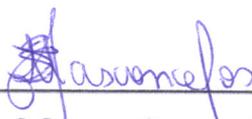
Orientador

PPEC - UFBA



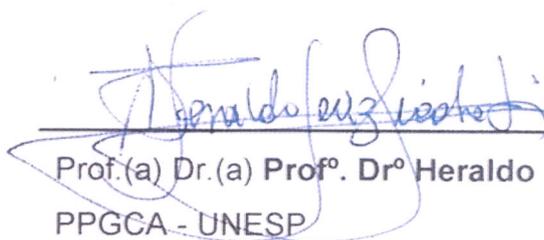
Profº. Drº Sandro Lemos Machado

PPEC - UFBA



Profª. Drª Suzan Sousa Vasconcelos

PPGeofísica - UFBA



Prof.(a) Dr.(a) Profº. Drº Heraldo Luiz Giacheti

PPGCA - UNESP

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Gonçalves, Juliana Teles Diniz

Integração do método geofísico de eletrorresistividade e ensaios SPT na investigação de perfis de solos da Região Metropolitana de Salvador (RMS) / Juliana Teles Diniz Gonçalves. Salvador, 2019. 135f.

Dissertação de Mestrado – Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Área de Geotecnia – Universidade Federal da Bahia, 2019. Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Barsottelli Botelho. Coorientador: Prof. Dr. Sandro Lemos Machado.

1. Correlação. 2. Caminhamento-Elétrico. 3. SPT. I. Universidade Federal da Bahia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GONÇALVES, Juliana Teles Diniz. **Integração do método geofísico de eletrorresistividade e ensaios SPT na investigação de perfis de solos da Região Metropolitana de Salvador (RMS)**. 2019. 135f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Juliana Teles Diniz Gonçalves

TÍTULO DO TRABALHO: Integração do método geofísico de eletrorresistividade e ensaios SPT na investigação de perfis de solos da Região Metropolitana de Salvador (RMS).

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2019

É concedida à Universidade Federal da Bahia permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização da autora.

Juliana Teles Diniz Gonçalves
R. Marquês de Caravelas, 574
40140-240 – Salvador – BA

DEDICATÓRIA

Para minha família e amigos... "May the Force
be With Us".

FORMAÇÃO DA CANDIDATA

Geofísica pela Universidade Federal da Bahia, UFBA (2017).

EPÍGRAFE

"In a dark place we find ourselves, and a little more knowledge lights our way."

— Master Yoda - Star wars Episode III: Revenge of the Sith

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a meus pais, Carlos e Vitória, por me proporcionarem todo amor, carinho e apoio ao longo desses 25 anos. Se cheguei até aqui é devido ao esforço de vocês, seja na minha educação ou na formação de meu caráter.

Agradeço também a todos os meus amigos que são extremamente orgulhosos em dizer que tem uma amiga geofísica, mestre e futura doutoranda. Obrigada por me ouvirem e me darem conselhos sempre que precisei. Em especial, Fábio e Ana Clara, os melhores amigos que eu poderia querer e com toda certeza são meu porto seguro.

Aos meus orientadores, Professor Botelho e Sandro, agradeço pelos ensinamentos ao longo desta caminhada. Tenho os dois como exemplo de excelentes educadores, cientistas e profissionais. Agradeço também a Prof. Mariana que apesar de não ser minha orientadora ou co-orientadora me ajudou e aconselhou em vários momentos dessa caminhada. Sua ajuda foi essencial para este trabalho.

Aos meus colegas do GEOAMB, agradeço por receberem de braços abertos uma geofísica que tinha muita curiosidade e desejo de se aventurar na geotecnia. Obrigada Leo, Érika, Fernando, Larissa, Zé, Ramile e Mano.

Gostaria de agradecer também as empresas EnvGEO e GeoENG por cederem relatórios de campo e apoio técnico nas aquisições geofísicas.

RESUMO

A caracterização do subsolo e a determinação da resistência das camadas do solo em profundidade são pré-requisitos para o cálculo e escolha do tipo de fundação a ser utilizada em uma obra de engenharia civil. Essas informações são geralmente adquiridas através de sondagens de simples reconhecimento com SPT, as quais não são suficientes para uma descrição dos terrenos devido ao seu caráter pontual. A pesquisa teve como objetivo a avaliação da utilização do método geofísico de eletrorresistividade, utilizando a técnica de caminhamento elétrico (CE) como ferramenta auxiliar para o diagnóstico geotécnico em investigações com o uso de ensaios SPT em três diferentes áreas da Região Metropolitana de Salvador, as quais possuem características geológicas-geotécnicas distintas. A metodologia aplicada se mostrou uma alternativa atrativa para a extrapolação das informações litológicas e geotécnicas em cada área, pois permitiu a visualização contínua em duas dimensões ($x-z$) do parâmetro de resistividade elétrica, a qual revela a estatigrafia do solo e ainda permite atingir maiores profundidades de investigação do que as sondagens convencionais. A partir dos resultados apresentados conclui-se que, em geral, existe uma correlação entre a resistência à penetração e a resistividade elétrica nas áreas I, II e III. A variação destes coeficientes demonstra a influência das características geotécnicas e litológicas, principalmente da composição mineralógica; fração granulométrica dos solos; presença de matéria orgânica e grau de saturação, em cada local. O uso integrado dessas técnicas de investigação direta e indireta pode acelerar as investigações geotécnicas, causando menor impacto ao meio ambiente, em menos tempo e com custos menores se comparados à realização de novas sondagens SPT.

Palavras-Chave: Investigação do subsolo; Ensaio de Campo; Geofísica; Correlação

ABSTRACT

The site characterisation and the determination of the resistance of the ground layers in depth are prerequisites for the calculation and choice of the type of foundation to be used in a civil engineering work. This information is usually acquired through Standard Penetration Tests (SPT), which are not sufficient for a complete description of the terrain due to its punctual character. The objective of this research was to evaluate the use of the geophysical method of electrical resistivity, using the Electrical Resistivity Tomography (ERT) as an auxiliary tool for the geotechnical diagnosis in investigations using simple reconnaissance drills (SPT) in three different areas of the Region Metropolitan of Salvador, which have different geological-geotechnical characteristics. The applied methodology was shown as an attractive alternative for the extrapolation of lithological and geotechnical information in each area, since it allowed the continuous visualization in two dimensions (xz) of the parameter of electrical resistivity, which reveals the soil stratigraphy and also allows to reach larger research depths than conventional surveys. From the results presented, it is concluded that, in general, there is an excellent correlation between penetration resistance and electrical resistivity in areas I, II and III. The variation of these coefficients shows the influence of the geotechnical and lithological characteristics, mainly of the mineralogical composition; particle size fraction of soils; presence of organic matter and saturation at each site. The integrated use of these technologies of direct and indirect investigation can bring speed to the geotechnical investigations, executing the services of less impact to the environment, in less time and with smaller costs when compared to the realization of new SPTs.

Keywords: Site Characterisation; Field Investigation; Geophysics; Correlation

SUMÁRIO

	Pág.
AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
SUMÁRIO	x
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	3
1.2 Justificativa	4
1.2.1 Econômica	4
1.2.2 Ambiental	5
1.2.3 Tecnológica	5
1.2.4 Social	5
2 Caracterização dos solos em Geotecnia	7
2.0.1 Métodos Diretos	9
2.0.2 Sondagem à percussão ou de Simples Reconhecimento (SPT)	9
3 Métodos Geométricos	18
3.1 Propriedades Elétricas das Rochas	19
3.2 Método da Eletroresistividade (ER)	24
3.2.1 Teoria Elementar	26
3.2.2 O conceito de resistividade aparente	30
3.2.3 Arranjo de Eletrodos	32
3.2.4 Técnica do Caminhamento Elétrico	33

3.3	Profundidade de Investigação	36
3.4	Inversão Geofísica	37
3.4.1	Inversão 2D de dados de eletrorresistividade	38
3.4.2	Modelo de Inversão com a utilização do <i>software RES2DINV</i>	40
3.4.3	erro RMS	44
4	Materiais e Métodos	45
4.1	Área I	45
4.1.1	Localização Geográfica	45
4.1.2	Geologia Regional	46
4.1.3	Caracterização Geotécnica	50
4.1.4	Aquisição Geofísica	51
4.2	Área II	52
4.2.1	Localização Geográfica	52
4.2.2	Geologia Regional	53
4.2.3	Geologia Local	55
4.2.4	Caracterização Geotécnica	58
4.2.5	Aquisição Geofísica	62
4.3	Área III	63
4.3.1	Localização Geográfica	63
4.3.2	Histórico de Deslizamentos	65
4.3.3	Geologia Regional	66
4.3.4	Caracterização Física do Local	69
4.3.5	Caracterização Geotécnica	71
4.3.6	Aquisição Geofísica	74
4.4	Aspectos técnicos da aquisição geofísica	75
4.5	Tratamento e Processamento dos dados	78
4.6	Análise Qualitativa e Correlação	80
4.6.1	Análise Qualitativa	80
4.6.2	Correlação	80
5	Resultados e Discussão	85
5.1	Área I	85
5.1.1	Análise Qualitativa	87
5.2	Área II	91

5.2.1	Análise Qualitativa	95
5.3	Área III	101
5.3.1	Análise Qualitativa	104
5.4	Correlação entre valores de N_{SPT} e resistividade elétrica	108
5.4.1	Área I	109
5.4.2	Área II	113
5.4.3	Área III	117
5.4.4	Análise do comportamento dos coeficientes das equações de regressão	123
6	Conclusões	128
7	REFERÊNCIAS	130

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1. Compacidade das areias em função da resistência à penetração SPT. . .	13
Tabela 2.2. Consistência das argilas em função da resistência à penetração SPT. . .	14
Tabela 2.3. Número mínimo de sondagens, segundo ABNT.	17
Tabela 5.1. Quadro-Resumo com todas as informações provenientes dos diagramas de dispersão para cada um dos solos encontrados nesta pesquisa. . . .	122

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Etapas de um programa de investigação do subsolo	8
Figura 2.2. Amostrador padrão de parede grossa (NOGUEIRA, 1995).	11
Figura 2.3. Esquema de perfuração por percussão e amostragem (PINTO, 2006).	12
Figura 2.4. Perfil associado ao subsolo (MACHADO; MACHADO, 2014).	16
Figura 2.5. Perfil individual de sondagem.	16
Figura 3.1. Fluxograma dos métodos geoeletricos no contexto dos métodos geofísicos aplicados	19
Figura 3.2. Faixa de variação na resistividade das rochas (BRAGA, 2006).	21
Figura 3.3. Cilindro condutor homogêneo em que L é seu comprimento e S é a área da sua seção transversal (BRAGA, 2006)	24
Figura 3.4. Fonte pontual de corrente na superfície de um meio homogêneo (BRAGA, 2006).	25
Figura 3.5. Diferença de Potencial na superfície de um meio homogêneo (BRAGA, 2006).	25
Figura 3.6. Configuração tetraeletródica usualmente utilizada em campo para medir a diferença de potencial em um solo ao ser injetada uma corrente (BRAGA, 2006).	26
Figura 3.7. Ilustração esquemática de um substrato rochoso heterogêneo (GALLAS, 2000).	32
Figura 3.8. Arranjo Dipolo-Dipolo (AMARANTE, 2014).	33
Figura 3.9. Técnica do Caminhamento Elétrico utilizando um arranjo dipolo-dipolo (BRAGA, 2016).	34
Figura 3.10. Forma de dados para construção da seção de resistividade aparente. N = níveis de investigação (HALLOF, 1957).	35
Figura 3.11. Exemplo de uma pseudo-seção de resistividade aparente usando o arranjo dipolo-dipolo (LOKE, 2000)	36
Figura 3.12. Arranjo de blocos utilizado no modelo, juntamente com a posição dos pontos de medida da correspondente pseudo-seção. O arranjo de eletrodos utilizado foi o Dipolo-Dipolo (GEOTOMO SOFTWARE, 2004).	42

Figura 4.1. Imagem de satélite da área de estudo e do córrego Paranamirim, em Camaçari-BA.	45
Figura 4.2. Mapa de localização, com destaque para a Bacia do Recôncavo (MILHOMEM, P.S.; DE MAMAN, E.J.; OLIVEIRA, F.M.; CARVALHO, M.S.S.; SOUZA-LIMA, 2003).	46
Figura 4.3. Seção geológica esquemática da Bacia do Recôncavo evidenciando a geometria de meio- <i>graben</i> e falhamentos normais de alto ângulo (PENTEADO, 1999).	47
Figura 4.4. Domínios Litoestatigráficos do município de Camaçari. Em destaque no mapa, a Área I (CAMAÇARI, 2015).	48
Figura 4.5. Vista do aterro com o cabo que conecta o aparelho de eletrorresistividade aos eletrodos, os quais estão alinhados no sentido longitudinal da BA-093.	52
Figura 4.6. Mapa do Subúrbio Ferroviário de Salvador com destaque para a Área II na rua Afrânio Peixoto.	53
Figura 4.7. Esquema comparativo dos domínios geológicos de Salvador segundo Barbosa e Dominguez (1996). Adaptado de SILVA (2005).	55
Figura 4.8. Localização da área em estudo no Mapa Geológico Regional, com base nos mapas temáticos do Plano Diretor de Encostas (PDE) (GEOHIDRO, 2004).	56
Figura 4.9. Local onde ocorreu o deslizamento. Em destaque, a crista da superfície de escorregamento.	58
Figura 4.10.(a) Trincheira aberta no talude evidenciando a presença de material de baixa resistência apoiado no estrato residual de folhelho, massapê. (b) Amostra de folhelho de cor esverdeada encontrado no local.	59
Figura 4.11.Pefil geotécnico na encosta, destacando a Travessa Amazonas (Área de estudo) e os estratos, bem como suas composições e profundidades. Fonte: ENVgeo	61
Figura 4.12.Croqui de localização das SPT destacando o posicionamento dos caminhamentos elétricos no talude.	62
Figura 4.13.(A) Procedimento do CE linha 1 sendo montado na crista do talude (B) Procedimento do CE linha 2 sendo montado no platô.	63
Figura 4.14.Mapa do Centro Histórico de Salvador com destaque para a Área III, situada no bairro de Santo Além do Carmo. Fonte: Google Earth.	64
Figura 4.15.Mapa do Centro Histórico de Salvador com destaque para a Área III, situada no bairro de Santo Além do Carmo. Fonte: Google Earth	64
Figura 4.16.Geologia Regional, em escala 1:250.000, mostrando que na área de estudo o Domínio Geológico Preponderante é associado à Escarpa de Falha de Salvador. Adaptado de (GEOHIDRO, 2004).	67

Figura 4.17.(a) Acessos precários e edificações estruturalmente vulneráveis (barra-cos de madeira). (b) Vista geral da encosta, mostrando as edificações em áreas de risco muito alto. Observa-se nitidamente neste local edificações fora de prumo (GEOENG, 2014).	69
Figura 4.18.Solo superficial, inconsistente e saturado, classificado como sendo um provável aterro (GEOENG, 2014).	71
Figura 4.19.(A) Aspecto do solo residual maduro abaixo da camada superficial de provável aterro. (B) Aspecto do solo residual jovem, ocorrente entre o solo residual maduro e o solo de alteração de rocha (GEOENG, 2014).	72
Figura 4.20.Aspecto da rocha muito fraturada, alterada e pouco coerente, identificada num corte subvertical realizado por moradores (GEOENG, 2014).	72
Figura 4.21.(a) Perfil geotécnico associado do terreno, baseado em sondagens próximas da Linha 01. (b) Perfil geotécnico associado do terreno, baseado nas sondagens próximas a Linha 03 (GEOENG, 2014).	73
Figura 4.22.Croqui de localização dos furos de sondagem SPT destacando o posicionamento dos caminhamentos na encosta (GEOENG, 2014).	74
Figura 4.23.(a) Colchão encontrado enterrado próximo à superfície e no local onde foi realizado a CE 01 (b) Entulho disposto na encosta, no local onde foi realizado a CE 03.	75
Figura 4.24.Materiais usados na aquisição geofísica.	76
Figura 4.25.Diagrama de dispersão de X e Y. Em a) temos uma correlação positiva (em média, quanto maior X maior será Y) e em b) temos uma correlação negativa (em média, quanto maior X menor será Y). Os diagramas em c) e d) sugerem uma regressão não linear entre as variáveis. Adaptado de BUSSAB e MORETTIN (2013).	81
Figura 5.1. Perfil levantado no sentido longitudinal do eixo da via expressa, sobre a pista. Apresentamos os ensaios SPTs projetados sobre a seção de eletrorresistividade e os designamos pela estaca de sua posição.	86
Figura 5.2. Integração de ensaio SPT com a coluna de eletrorresistividade levantada ao longo da pista A na via expressa, na posição E-56.	88
Figura 5.3. Integração de ensaio SPT com a coluna de eletrorresistividade obtida no levantamento CE ao longo da pista A da via expressa, na posição E-60.	88
Figura 5.4. Integração de ensaio SPT com a coluna de eletrorresistividade obtida no levantamento CE ao longo da pista A da via expressa, na posição E-62.	90
Figura 5.5. Integração de ensaio SPT com a coluna de eletrorresistividade obtida no levantamento CE ao longo da pista A da via expressa, na posição E-64.	91

Figura 5.6. (A) Caminhamento elétrico da linha 1 realizada na crista do talude. (B) Caminhamento elétrico da linha 2 realizado no platô da Travessa Amazonas. Em destaque, as anomalias nas duas seções.	94
Figura 5.7. Integração de ensaio SP 201 com a coluna de eletrorresistividade obtida na caminhamento elétrico- Linha 1, na crista do talude.	96
Figura 5.8. Integração de ensaio SP 202 com a coluna de eletrorresistividade obtida na caminhamento elétrico- Linha 1, na crista do talude.	97
Figura 5.9. Integração de ensaio SP 204 com a coluna de eletrorresistividade obtida na caminhamento elétrico- Linha 2, no platô. próximo do pé do talude.	99
Figura 5.10. Integração de ensaio SP 205 com a coluna de eletrorresistividade obtida na caminhamento elétrico- Linha 2, no platô, próximo do pé do talude.	100
Figura 5.11. Integração de ensaio SP 206 com a coluna de eletrorresistividade obtida na caminhamento elétrico- Linha 2, no platô, próximo do pé do talude.	100
Figura 5.12. (A) Caminhamento Elétrico (CE 01) realizado na Praça do Santo Antônio Além do Carmo. (B) Caminhamento elétrico (CE 03), realizado a partir do quintal de uma casa.	103
Figura 5.13. Integração do ensaio SPT com a coluna de resistividade elétrica obtida na CE 01, na posição da estaca SP-205.	104
Figura 5.14. Integração do ensaio SPT com a coluna de resistividade elétrica obtida no CE 01, na posição da estaca SP-10.	105
Figura 5.15. Integração do ensaio SPT com a coluna de resistividade elétrica obtida na Linha 03, na posição da estaca SP-14.	107
Figura 5.16. Integração do ensaio SPT com a coluna de resistividade elétrica obtida na Linha 03, na posição da estaca SP-13.	107
Figura 5.17. Diagrama de dispersão entre o Número de Golpes e Resistividades referente às estacas E-56 e E-60.	109
Figura 5.18. Diagrama de dispersão entre o Número de Golpes e Resistividades referente às estacas E-62 e E-64.	110
Figura 5.19. Diagrama de dispersão que agrupa os dados das sondagens da área I com relação a posição acima do nível d'água.	111
Figura 5.20. Diagrama de dispersão que agrupa os dados das sondagens da área I com relação a posição abaixo do nível d'água.	112
Figura 5.21. Diagrama de dispersão que agrupa dados das sondagens SP 201 e SP 202, além de valores de resistividades provenientes do caminhamento elétrico I realizado na crista do talude.	114
Figura 5.22. Diagrama de dispersão que agrupa dados das sondagens SP 204, SP 205 e SP 206, além de valores resistividades provenientes do caminhamento elétrico II realizado no platô do talude.	115
Figura 5.23. Diagrama de dispersão referente a camada de aterro da área II.	116

Figura 5.24.Diagrama de dispersão referente ao silte arenoso com argila e fragmentos de rocha alterada.	116
Figura 5.25.Diagrama de dispersão referente a camada de massapê e saprolito (folhelho).	117
Figura 5.26.Diagrama de dispersão que agrupa dados das sondagens SP 205 e SP 10 além dos valores de resistividade elétrica provenientes do CE 01 realizado na Praça.	118
Figura 5.27.Diagrama de dispersão que agrupa dados das sondagens SP 14 e SP 13 além de valores resistividades provenientes do CE 03 realizado no quintal da casa.	118
Figura 5.28.Diagrama de dispersão agrupando todas as sondagens da área III. . . .	119
Figura 5.29.Diagrama de dispersão referente à camada de aterro da área III. . . .	120
Figura 5.30.Diagrama de dispersão referente ao solo residual e saprolito de origem granulítica.	120
Figura 5.31.Diagrama de Dispersão entre o Coeficiente Linear e $N_{SPT_{medio}}$	123
Figura 5.32.Diagrama de Dispersão entre o Coeficiente Linear e a Resistividade Média	124
Figura 5.33.Diagrama de Dispersão entre o Coeficiente Angular e $N_{SPT_{medio}}$	125
Figura 5.34.Diagrama de Dispersão entre o Coeficiente Angular e a Resistividade Média.	125
Figura 5.35.Primeira tentativa de ajuste da curva entre o coeficiente angular e a resistividade média.	126
Figura 5.36.Segunda tentativa de ajuste da curva entre o coeficiente angular e a resistividade média.	127

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
CE	Caminhamento Elétrico
GEOAMB	Laboratório de Geotecnia Ambiental
NA	Nível d'água
NBR	Norma Técnica Brasileira
N_{SPT}	Número de Golpes
PDE	Plano Diretor de Encostas
<i>rms</i>	root mean square
RMS	Região Metropolitana de Salvador
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
SPT	Standard Penetration Test
UFBA	Universidade Federal da Bahia
VELF	Via Expressa Lauro de Freitas
%	Porcentagem
<i>a</i>	Fator Geométrico dos poros
\vec{E}	Intensidade do Campo Elétrico
<i>I</i>	Corrente Elétrica
\vec{J}	Densidade de Corrente Elétrica
<i>K</i>	Fator Geométrico
<i>m</i>	Índice de Cimentação
<i>n</i>	Índice de Saturação
<i>r</i>	Distância
<i>R</i>	Resistência
R^2	Coefficiente de Determinação
<i>S</i>	Área Transversal
SI	Sistema Internacional de Unidade
ΔV	Diferença de Potencial Elétrico
ρ	Resistividade Elétrica
ρ_a	Resistividade aparente
ρ_t	Resistividade da formação

ρ_w	Resistividade da água de saturação
σ	Condutividade Elétrica
ϕ	Porosidade
$\Omega.m$	Ohm.metro

1 INTRODUÇÃO

A interação do homem com o meio físico e as alterações antrópicas que nele provoca, conjuntamente com o conhecimento dos aspectos de natureza geológica e geotécnica se constituem como instrumentos de fundamental importância nas ações de planejamento do meio urbano. As características físicas e propriedades geológicas-geotécnicas em sub-superfície integram a base do direcionamento da ocupação do espaço físico de forma que todo projeto de engenharia civil necessita do conhecimento adequado dessas características.

Para que se escolha o tipo de fundação a ser utilizada é imprescindível que sejam realizadas investigações do subsolo com os mais variados objetivos, como por exemplo, a determinação da profundidade e espessura da camada de solo, além de sua extensão lateral; a natureza do solo; a profundidade do topo rochoso e alteração de rochas; presença de falhas e fraturas, determinação do nível freático, capacidade de carga do terreno em diversas profundidades, entre outros.

O *Standard Penetration Test* (SPT) é o método direto de investigação geotécnica mais popular no Brasil e em todo o mundo. Através dele, é possível obter a estratigrafia do terreno ao longo do furo de sondagem enquanto que a resistência à penetração do amostrador padrão fornece uma classificação do solo de acordo com a compactidade (solos grossos compostos por areia ou silte arenoso) ou consistência (solos finos compostos por argila ou silte argiloso)(PINTO, 2006).

Contudo, o SPT fornece informações pontuais que não são suficientes para descrever de forma satisfatória o subsolo, já que este é heterogêneo, o que faz com que suas características geológicas e geotécnicas variem verticalmente e lateralmente. Assim, a limitação na completa caracterização física do solo em projetos de engenharia civil conduz a uma ampliação das investigações diretas e indiretas (métodos geofísicos), que poderiam ser mais bem planejadas e otimizadas.

A Geofísica é uma ciência baseada em um conjunto de técnicas físicas e matemáticas usada na caracterização de solos e rochas através de medidas indiretas (não-invasivas e

não-destrutivas) na superfície do terreno ou diretas através da análise de testemunhos, tendo seu início e desenvolvimento relacionados à exploração de petróleo e minerais.

Os métodos geofísicos baseiam-se na determinação de propriedades físicas que caracterizam os diferentes tipos de materiais que se encontram no meio geológico e nos contrastes que essas propriedades podem apresentar. As informações obtidas pela Geofísica e Geologia servem para formular a base do modelo inicial da área estudada e, os resultados geofísicos podem ser correlacionados com parâmetros geológicos e geotécnicos permitindo obter um modelo conceitual do subsolo mais próximo do real (OGILVY *et al.*, 1980).

A partir das décadas de 70 e 80, a Geofísica Aplicada tem atuado na engenharia, hidrogeologia e meio ambiente, voltada para a investigação de alvos relativamente mais rasos. Foi necessária uma "adaptação" dos métodos e técnicas existentes visando aumentar a acurácia, precisão e diminuição dos custos e, desde então os métodos geofísicos, principalmente a sísmica de refração e o método da eletrorresistividade, vêm sendo aplicados no controle ambiental (monitoramento e identificação de plumas de contaminação, cavidades e identificação de aquíferos), na escavação de túneis, barragens e estabilidade de taludes.

Mais recentemente, Xavier (2010), Vogt (2012), Popescu *et al.* (2016) e Ling *et al.* (2016) levantaram uma característica importante dos resultados alcançados através do método da eletrorresistividade para a investigação geotécnica, que é a visualização contínua do subsolo, em duas ou três dimensões, trazendo uma visão mais ampla da área em estudo o que, se comparado a sondagens SPT seria praticamente impossível, mesmo se unidos os dados pontuais, ainda que muito próximos, o que usualmente não é possível, seja devido a custos ou a tempo de execução.

Poucos estudos têm sido realizados no intuito de correlacionar a resistividade elétrica e as características geotécnicas dos solos. O trabalho de BRAGA *et al.* (1999) foi pioneiro no estudo da relação entre as propriedades elétricas (Cargabilidade e Resistividade Elétrica) e a rigidez do solo através de Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) e perfis de N_{SPT} . Foi concluído através dessa pesquisa que: (i) Não existe correlação entre N_{SPT} e Cargabilidade; (ii) a correlação entre N_{SPT} e os valores de resistividade elétrica é fraca.

COSENZA *et al.* (2006) conduziram uma pesquisa de resistividade elétrica 2D utilizando o arranjo Wenner para analisar qualitativamente e estabelecer correlações entre valores de resistividade e valores de CPT. Foi concluído que não existe nenhuma relação clara entre esses dois parâmetros e sugeriram estudos extensivos a serem conduzidos para correlações mais precisas.

OH e SUN (2008) usaram a integração de valores de resistividade elétrica e SPT para a investigação do embasamento de uma barragem de terra e concluíram que, qualitativamente, a resistividade elétrica do solo possui uma correlação satisfatória com os valores de N_{SPT} .

SUDHA *et al.* (2009) investigaram a relação entre a resistividade elétrica e o valor do N_{SPT} usando caminhamentos elétricos em dois locais de estudo diferentes na Índia. Como resultado, foi concluído que existe uma correlação específica para cada local de estudo entre o número de golpes (N_{SPT}) e a propriedade de resistividade elétrica, mostrando ainda que os coeficientes do ajuste linear entre os dois parâmetros analisados são sensíveis ao conteúdo de argila e a litologia de cada área.

Esta pesquisa foi motivada pela necessidade de estudos mais extensos para verificar a validade e as limitações destas correlações específicas em diferentes meios geológicos, visando sua aplicação futura em investigações geotécnicas.

1.1 Objetivo

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a utilização de sondagens geofísicas não invasivas, particularmente a técnica de caminhamento com eletrorresistividade (CE), como ferramenta auxiliar na investigação geotécnica por meio de sondagens de simples reconhecimento com SPT.

Além do objetivo principal, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Procurar estabelecer correlação entre as sondagens SPT (método direto) e os caminhamentos elétricos (método indireto), no que tange à definição de litologia e, conseqüentemente, estabelecimento das propriedades geotécnicas;
- Avaliar a aplicabilidade do método geofísico de eletrorresistividade como uma alter-

nativa atrativa para a extrapolação dos dados do SPT, permitindo uma visualização contínua das características do subsolo estendidas ao longo dos perfis;

- Aplicar a metodologia em áreas com diferentes tipos de solo para avaliar as limitações do método geofísico;
- Elaborar um modelo de subsuperfície para cada área de estudo através da etapa de inversão geofísica que esteja em consonância com a realidade do subsolo, balizada por informações geológicas e geotécnicas obtidas previamente;
- Aprimorar o uso dos softwares de inversão, principalmente o RES2DINV, utilizado para processar os dados dos caminhamentos elétricos.

1.2 Justificativa

Apesar de ser o método direto de investigação geotécnica mais popular no Brasil e no mundo, o SPT se caracteriza por apresentar informações pontuais (1D) que não são suficientes para uma completa descrição do subsolo. Desta maneira, o estudo da integração do método geofísico de eletrorresistividade com as sondagens SPT é uma excelente alternativa para sanar a deficiência na completa caracterização do subsolo em projetos de engenharia civil, já que possibilita a visualização das características físicas e propriedades geológicas e geotécnicas em duas dimensões (2D).

1.2.1 Econômica

As informações sobre as características físicas do subsolo fornecidas pelo método de eletrorresistividade são obtidas de forma mais rápida e econômica e sua possível integração com dados oriundos das sondagens PT permitirá a extrapolação das informações geotécnicas para locais mais afastados dos pontos de sondagens diretas.

Além disso, os caminhamentos elétricos podem ser aplicados na área de estudo antes dos métodos diretos com o objetivo de indicar locais onde ocorrem mudanças litológicas expressivas (anomalias geofísicas). Estas anomalias podem ser causadas pela presença de falhas e fraturas ou até mesmo matações, indicando a necessidade de maior investigação nestes pontos específicos.

Espera-se que, a utilização de caminhamentos elétricos permita o planejamento e distribuição das sondagens de forma otimizada, reduzindo tempo, mão-de-obra e custos gerais.

1.2.2 Ambiental

O mapeamento do subsolo seja raso, profundo ou muito profundo através de métodos geofísicos tem um princípio em comum: são ensaios não destrutivos ou não invasivos, ou seja, sem a penetração física no meio investigado. Souza L, Silva R. *et al.* (1998) e Souza (2006) apresentam vários exemplos que confirmam a importância da geofísica nos tempos atuais, principalmente no que se refere às interferências no meio ambiente e legislação ambiental.

Além disso, a aplicação do método geofísico pode ser realizada em áreas de difícil acesso como, por exemplo, encostas, onde a investigação geotécnica através de sondagens mecânicas é mais limitada.

1.2.3 Tecnológica

Os equipamentos de eletrorresistividade são os únicos equipamentos geofísicos fabricados pela indústria nacional, o que torna mais fácil a aquisição e manutenção dos mesmos em território nacional, possibilitando a inclusão desta técnica na indústria da construção civil.

1.2.4 Social

O crescimento desordenado de muitas cidades brasileiras causa a ocupação de regiões com elevado risco geotécnico, aumentando o número de mortes causadas por deslizamentos em épocas de chuva. Para se amenizar esse risco e tornar essas regiões mais seguras para a população é necessário o conhecimento das características e do comportamento do solo.

A utilização da geofísica como ferramenta auxiliar à investigação geotécnica pode gerar informações mais detalhadas das encostas de forma mais rápida e possibilitar o

monitoramento do nível freático. Além disso, uma execução de uma obra de engenharia civil que respeite os protocolos de segurança é indispensável para a ampliação da infraestrutura e para a melhoria dos serviços prestados à sociedade.

2 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS EM GEOTECNIA

Os projetos de engenharia civil necessitam do conhecimento adequado das características e propriedades do solo onde a obra será realizada. Isto é válido para todos os tipos de projetos. As investigações de campo e em laboratório requeridas para obter as informações necessárias a essas questões são chamadas de *investigações do subsolo*.

De acordo com Machado e Machado (2014), os principais objetivos de uma investigação de subsolo encontram-se listados abaixo:

- Determinação da profundidade, espessura e extensão horizontal da camada do solo;
- Natureza do solo: Compacidade de solos grossos (areia e silte) e consistência de solos finos (argila);
- Profundidade do topo rochoso, alteração de rocha, além de suas características (litologia, mergulho e direção das camadas, espaçamento das juntas, planos de acamamento e estados de decomposição);
- Determinação do Nível d'água (NA);
- Obtenção de amostras (deformadas e/ou indeformadas) de solo e rocha.

Em um programa de investigação de subsolo é necessário levar em conta o tipo e a importância da obra que será realizada. Obras como barragens, túneis e grandes edificações necessitam de uma caracterização do subsolo mais detalhada em comparação ao conhecimento necessário para a construção de uma pequena residência. Contudo, é importante salientar que mesmo para obras de pequeno porte, a negligência na obtenção de informações do subsolo podem gerar problemas, levando a prejuízos no orçamento e no tempo planejado de execução.

Em um programa de investigação de subsolo existem três etapas fundamentais, como mostrado na Figura 2.1:



Figura 2.1 – Etapas de um programa de investigação do subsolo

A etapa de **Reconhecimento** abrange o conhecimento de todo tipo de informação necessária para o desenvolvimento do projeto. Para isso, torna-se indispensável a obtenção de mapas geológicos, fotos aéreas, literatura especializada (caso exista) além de visita ao local.

Na etapa de **Prospecção** são obtidas as características e propriedades do subsolo que podem variar de acordo com as necessidades do projeto ou do estágio em que a obra se encontra. Esta etapa pode ser dividida em fase *preliminar*, *complementar* e *localizada*. A fase de prospecção preliminar fornece dados para a localização das estruturas principais além de uma estimativa de custos. O objetivo desta fase é a execução de ensaios *in situ* e a retirada de amostras para investigação por meio de ensaios de laboratório. Na fase complementar, são realizadas investigações adicionais para solucionar problemas específicos que por ventura apareçam. Por último, a fase de prospecção localizada deverá ser realizada quando as informações obtidas nas fases anteriores são insuficientes para a execução do projeto em pontos específicos.

Os métodos de prospecção do subsolo para fins geotécnicos usados na etapa de prospecção podem ser classificados como métodos diretos (poços, trincheiras, sondagens a trado, sondagens de simples reconhecimento - SPT, rotativas e mistas), métodos semidiretos (*vane test*, CPT e ensaio pressiométrico) e métodos indiretos (geofísicos). Além disso, temos a coleta de amostras indeformadas por meio de blocos indeformados ou por meio de amostradores de parede fina. (MACHADO; MACHADO, 2014).

A etapa de **Acompanhamento** tem como objetivo avaliar o comportamento previsto

e desempenhado pelo solo. O acompanhamento é feito através de instrumentos instalados antes e durante a construção da obra para a medida da posição do nível d'água, da pressão neutra, pressão total, deslocamento, recalque, vazão e outros.

2.0.1 Métodos Diretos

Os métodos diretos consistem de perfurações e escavações executadas no subsolo, destinadas a observar diretamente as camadas e suas respectivas características litológicas e propriedades geotécnicas através da obtenção de amostras. Esses métodos podem ser ainda classificados em manuais (poços, trincheiras e sondagens a trado) e mecânicos (sondagem à percussão SPT, rotativa e mista).

Existem ainda os métodos semidiretos, os quais permitem obter as características de comportamento mecânico por meio de correlações com as grandezas medidas na execução do ensaio. Esses métodos recebem a denominação de ensaios "*in situ*", possuindo a vantagem de minimizar as perturbações causadas pela variação do estado de tensões e distorções causadas pelo processo de amostragem, assim como evitar choques e tensões decorrentes do transporte e manuseio em laboratório das amostras. São exemplos de métodos semidiretos o ensaio de penetração do cone (CPT), o ensaio de palheta *vane test* e o ensaio pressiométrico.

A seguir serão apresentados alguns detalhes da sondagem de simples reconhecimento com SPT.

2.0.2 Sondagem à percussão ou de Simples Reconhecimento (SPT)

A sondagem de simples reconhecimento com SPT, em inglês, *Standard Penetration Test* (SPT) é o ensaio de investigação geotécnica mais popular em praticamente todo o mundo. Através dele é possível obter a estratigrafia do terreno no ponto onde esse ensaio é realizado e a resistência à cravação do amostrador padrão por golpes de um martelo. Pode-se, através de correlações, realizar a avaliação da densidade de solos granulares, consistência de solos coesivos, além de uma medida de resistência associada à sondagem de reconhecimento (VOGT, 2012).

Este método direto de investigação possui bom custo benefício, simplicidade de execução, tendo seu procedimento normalizado pela ABNT através da norma ABNT-NBR-6484 (2001). O procedimento de execução de sondagens de simples reconhecimento consiste em um processo repetitivo de modo que em cada metro de solo são realizados três operações: abertura do furo (perfuração), ensaio de penetração e amostragem.

2.0.2.1 Perfuração

Quando se atinge aproximadamente 1 metro, é introduzido um tubo de revestimento (diâmetro de duas polegadas e meia) dotado de sapata cortante. Por dentro deste tubo, a penetração irá progredir com o trado helicoidal até se atingir o nível freático (ABNT-NBR-6484, 2001).

Após ser atingido o nível d'água, pode-se prosseguir a perfuração com a técnica de circulação de água, também conhecida como *percussão e lavagem*. Uma bomba d'água motorizada injeta água na extremidade inferior do furo, através de uma haste de menor diâmetro, por dentro do tubo de revestimento. Na extremidade deste, existe um trépano com ponta afiada e com dois orifícios pelos quais a água sai com pressão (PINTO, 2006)

A haste interna é repetidamente levantada e deixada cair de cerca de 30 cm. A sua queda é acompanhada de um movimento de rotação imprimido manualmente pelo operador. Essas ações provocam o destorroamento do solo no fundo da perfuração. Simultaneamente, a água injetada pelos orifícios do trépano ajuda a desagregação e, ao retornar à superfície, pelo espaço entre a haste interna e o tubo de revestimento, transporta essas partículas do solo que sofreram desagregação.

A perfuração utilizando a técnica de lavagem é mais rápida do que pelo trado. Porém, ela só pode ser empregada abaixo do nível d'água porque acima dele alteraria a umidade do solo e, conseqüentemente dificultaria a determinação do nível d'água, além de alterar as características geotécnicas dos solos e dificultar a detecção de mudanças de camadas.

Ao ser atingida a cota do ensaio, por qualquer um dos procedimentos adotados, é necessário que o furo esteja bem limpo para a realização do ensaio de penetração.

2.0.2.2 Ensaio de Penetração

Para ser realizada esta etapa será necessária a utilização do amostrador padrão ou amostrador Terzaghi-Peck, sendo constituído por: engate, corpo e sapata cortante. O corpo é constituído de tubos metálicos de parede grossa com corpo bipartido e ponta em formato de bisel (Figura 2.2). O engate tem dois orifícios laterais para a saída de água e ar e contém, interiormente, uma válvula constituída por esfera de aço inoxidável, para impedir que a amostra de solo saia do amostrador quando de seu içamento (MACHADO; MACHADO, 2014).

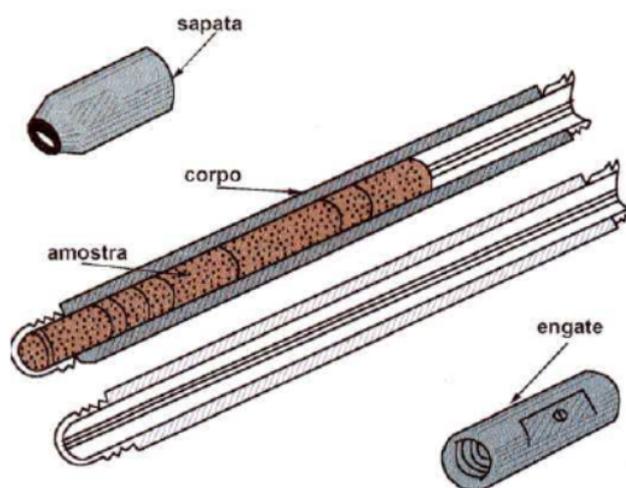


Figura 2.2 – Amostrador padrão de parede grossa (NOGUEIRA, 1995).

O amostrador é conectado à haste e apoiado no fundo da perfuração. Em seguida, é cravado pela ação de uma massa de ferro fundido (denominada de martelo) de 65kg. Para a cravação, o martelo é elevado a uma altura de 75 cm e deixado cair livremente. O alteamento do martelo é feito manualmente ou utilizando algum equipamento mecânico, através de uma corda flexível que passa por uma roldana existente na parte superior do tripé. Procedese a cravação de 45 cm do amostrador, anotando-se, separadamente, o número de golpes necessários à cravação de cada 15 cm do amostrador (Figura 2.3).

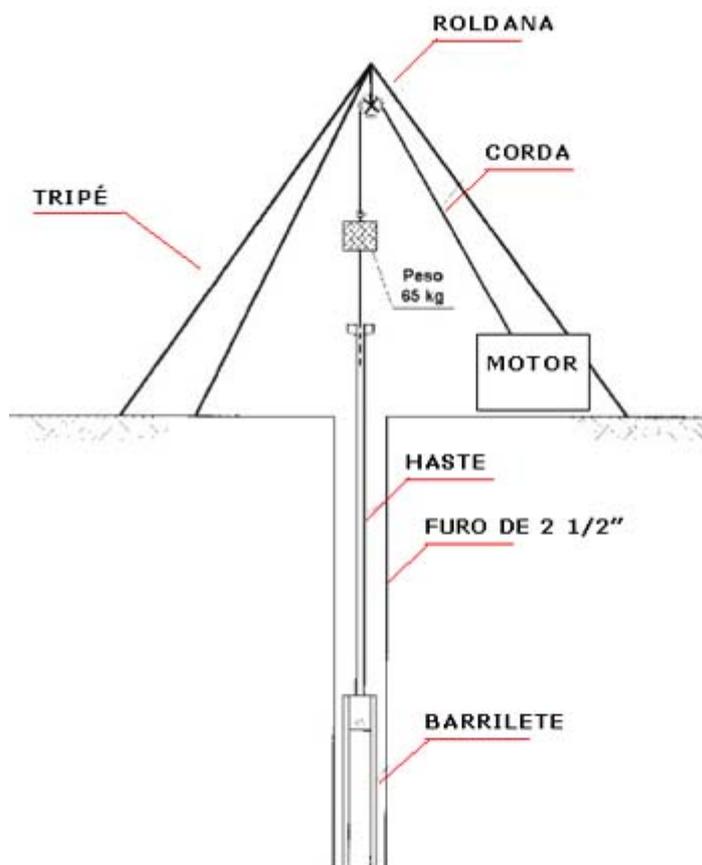


Figura 2.3 – Esquema de perfuração por percussão e amostragem (PINTO, 2006).

O resultado do ensaio de penetração será expresso pelo índice de resistência à penetração dinâmica (N_{SPT}). O valor deste índice corresponde ao número de golpes necessários para a cravação de 0.30 m do amostrador no solo, após uma cravação inicial de 0.15 m.

2.0.2.3 Amostragem

Deve ser coletada, para exame posterior, uma parte representativa do solo colhido pelo trado-concha durante a perfuração de até 1 metro de profundidade. A cada metro de perfuração a partir deste ponto devem ser colhidas amostras dos solos por meio do amostrador padrão (ABNT-NBR-6484, 2001).

De posse da amostra colhida no amostrador e com o valor N_{SPT} são feitas a identificação e classificação do solo, de acordo com a ABNT-NBR-7250 (1982). São utilizados testes tácteis visuais com a finalidade de definir as características granulométricas, de

plasticidade, presença acentuada de mica, matéria orgânica e cores predominantes. O nome dado ao solo não deve conter mais do que duas frações e sugere-se o uso das cores: branco, cinza, preto, marrom, amarelo, vermelho, roxo, azul e verde, podendo-se usar o claro e o escuro, para o máximo de duas cores e o termo variegado quando não houver duas cores predominantes (MACHADO; MACHADO, 2014).

Com o N_{SPT} determinado em cada metro, os solos são classificados quanto a compactidade (solos grossos) e consistência (solos finos), conforme mostram as Tabela 2.1 e Tabela 2.2.

Tabela 2.1 – Compactidade das areias em função da resistência à penetração SPT.

Número N do SPT	Grau de compactidade das areias
0 a 4	muito fofa
5 a 8	fofa
9 a 18	compactidade média
18 a 40	compacta
acima de 40	muito compacta

Tabela 2.2 – Consistência das argilas em função da resistência à penetração SPT.

Número N do SPT	Grau de consistência das argilas
Menor que 2	muito mole
3 a 5	mole
6 a 10	consistência média
11 a 19	rija
acima de 19	dura

Para o solo superficial, o grau de consistência/compacidade é normalmente baixo, apresentando-se como últimos produtos de alteração de rocha e registram processos que vão desde movimentação por gravidade até complexas atividades bioquímicas; correspondendo, na Pedologia, aos horizontes A e B (BRAGA, 1997).

Ainda segundo o mesmo autor, o material formado pela decomposição *in situ* da rocha, considerado como solo de alteração, localizado entre o solo superficial e a rocha muito alterada, apresenta um grau de consistência/compacidade extremamente variável, aumentando, na maioria das vezes, com a profundidade. O limite arbitrário entre o solo e a rocha muito alterada, corresponderia, no ensaio de penetração, ao impermeável à percussão. A rocha muito alterada seria considerada como intervalo entre o impenetrável a percussão e o impenetrável a percursão.

É importante salientar que as correlações existentes entre o SPT e consistência das argilas podem estar sujeitas a erros, em virtude de mudanças no comportamento deste material em função das cargas dinâmicas e estáticas, provocando o amolgamento (destruição da estrutura) e gerando modificações na resistência à penetração (MACHADO; MACHADO, 2014).

O projetista deve prestar atenção especial à qualidade das sondagens, pois os valores do número de golpes podem ser alterados por fatores ligados aos equipamentos utilizados, técnicas operacionais, bem como erros acidentais (MACHADO; MACHADO, 2014).

As fontes de erros ligadas aos equipamentos são: forma, dimensão e estado de conservação do amostrador padrão; estado de conservação das hastes e uso de hastes de diferentes pesos; martelo não calibrado e com peso fora do padrão, a natureza da superfície de impacto, além do diâmetro do tubo de revestimento (MACHADO; MACHADO, 2014).

No que concerne aos fatores ligados à técnica de operação pode-se citar, principalmente, a variação de energia de cravação, já que o martelo deve cair em queda livre de uma altura constante (75 cm). Contudo, é comum a diminuição da altura da queda devido ao cansaço e com isso, aumentar os valores dos índices.

Quanto aos erros acidentais, referem-se a erros na contagem do número de golpes, sendo a maioria cometido devido a erros humanos por conta do trabalho ser repetitivo e exaustivo.

2.0.2.4 Apresentação dos Resultados

Os resultados de uma sondagem deverão ser apresentados em forma de relatórios contendo o perfil individual de cada furo, com as cotas, diâmetro do tubo de revestimento, posições onde foram recolhidas as amostras, posição do N.A., resistência à penetração (N_{SPT}) e descrição do solo, bem como um corte longitudinal (seção), onde podem ser evidenciadas as sequências prováveis das camadas do subsolo.

O relatório fornecerá dados gerais sobre o local e o tipo da obra, descrição sumária do equipamento e outros dados julgados importantes (MACHADO; MACHADO, 2014). A Figura 2.4 apresenta um perfil associado e a Figura 2.5, um perfil individual de sondagem.

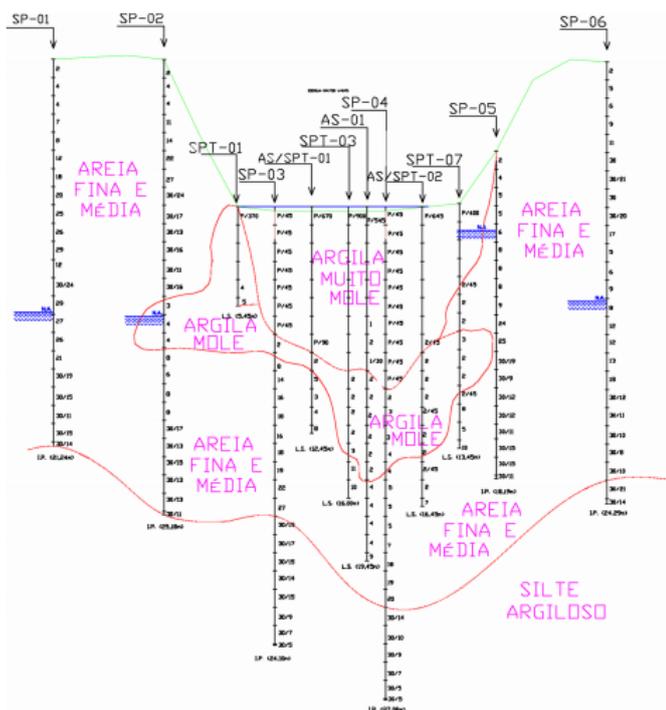


Figura 2.4 – Perfil associado ao subsolo (MACHADO; MACHADO, 2014).

GRÁFICO SPT 30 cm INICIAIS (---) 30 cm FINAIS (—)	PROFUNDIDADE	ENSAYO DE PENETRAÇÃO (GOLPES/CM ²)		RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO SPT		INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA	PERFIL GEOLÓGICO	PROFUNDIDADE DA CAMADA (m)	AMOSTRADOR: Ø INTERNO = 34,9 mm PESO: 65 Kg Ø EXTERNO = 50,8 mm ALTURA DE QUEDA: 75 cm REVESTIMENTO: 2,00 m	NÍVEL D'ÁGUA	AVANÇO
		INI.	FIN.	INI.	FIN.						
	1,00	1	1	2	2		00				TC
	2,00	1	1	2	2		01				TH
	3,00	1	1	2	2		02	3,00		3,10	3,00
	4,00	1	1	2	5		03				
	5,00	17	10	27	17		04	4,90			
	8,00	7	9	16	21		05				
	7,00	4	4	8	8		06				
	8,00	5	5	10	10		07	7,80			CA
	9,00	10	12	22	26		08				
	10,00	13	14	27	29		09				
	11,00	18	18	36	38		10				
	12,00	22	25	47	70		11				
	13,00	27	37	64	37			13,30			13,30
	14,00										
	15,00										

DESCRÇÃO DO MATERIAL

AREIA FINA POUCA SILTOSA, FOFA, COR ESCURA

AREIA FINA SILTOSA, COM PEDREGULHOS, FOFA A MEDIANAMENTE COMPACTA, COR CINZA

SILTE ARENOSO, COM PEDREGULHOS, POUCA COMPACTA A COMPACTA, COR CINZA

AREIA FINA, MEDIANAMENTE COMPACTA A MUITO COMPACTA, COR BRANCA

IMPENETRÁVEL AO AMOSTRADOR

NOTA:
Furo paralisado conforme descrito no item 6.4.1 da norma NBR6484:2001 - Solo - Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT.

Figura 2.5 – Perfil individual de sondagem.

2.0.2.5 Programação das sondagens

A programação das sondagens, número, disposição e profundidade dos furos depende do conhecimento prévio que se tenha da geologia do local, do solo e da obra específica para qual se faz a prospecção. As recomendações sobre a programação das sondagens estão na norma ABNT-NBR-8036 (1983) (PINTO, 2006).

Quando a estrutura tem sua localização bem definida dentro do terreno, a norma citada acima sugere o número mínimo de sondagens a serem realizadas, em função da área construída, conforme mostra a Tabela 2.3. Quando as estruturas não estiverem ainda localizadas, o número de sondagens deve ser fixado, de modo que, a máxima distância entre os furos seja de 100 m e cobrindo, uniformemente, toda a área (MACHADO; MACHADO, 2014).

Tabela 2.3 – Número mínimo de sondagens, segundo ABNT.

Área Construída m^2	No. 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
maior que 2400	a critério

3 MÉTODOS GEOELÉTRICOS

Os Métodos Geoelétricos integram um grande grupo no qual se inserem os métodos elétricos e eletromagnéticos. Caracterizam-se por medir em subsuperfície (ou no interior de furos de sondagens) a resposta do substrato geológico à excitação por campos magnéticos ou elétricos de origem natural e artificial.

A principal propriedade investigada por estes métodos é a resistividade elétrica ou o seu inverso, a condutividade elétrica. As investigações geoelétricas têm como finalidade a determinação das distribuições da resistividade (ou condutividade) em subsuperfície.

As fontes geradoras do campo eletromagnético, cujos efeitos são analisados nos estudos dos métodos geoelétricos, podem ser de origem natural ou artificial. Outro fato que caracteriza a variedade nas modalidades possíveis dos métodos geoelétricos, é que, fundamentalmente, o campo eletromagnético pode ser criado e medido no subsolo por meio de dois procedimentos básicos: galvânico e indutivo (BRAGA, 1997).

A metodologia galvânica configura-se pela existência de eletrodos que são cravados na superfície do terreno. Estes são conectados por meio de cabos apropriados a uma fonte de corrente contínua ou variável (equipamentos transmissores que são alimentados por baterias, motores geradores, etc.). A diferença de potencial entre os eletrodos irá provocar um campo eletromagnético no subsolo.

Já a metodologia indutiva implica na criação de um campo eletromagnético através de um circuito sem eletrodos. Este circuito irá emitir uma corrente variável por meio de equipamentos adequados. Quando induzida no subsolo, a corrente variável irá originar campos eletromagnéticos secundários que modificam o campo primário em qualquer ponto da superfície.

Considera-se que, os métodos elétricos, Eletrorresistividade; Polarização Induzida (IP) e Potencial Espontâneo (SP), são desenvolvidos por procedimentos galvânicos. Já os métodos eletromagnéticos são desenvolvidos por procedimentos indutivos (Figura 3.1).

Os métodos elétricos possuem sua origem no século XVIII com a descoberta sobre

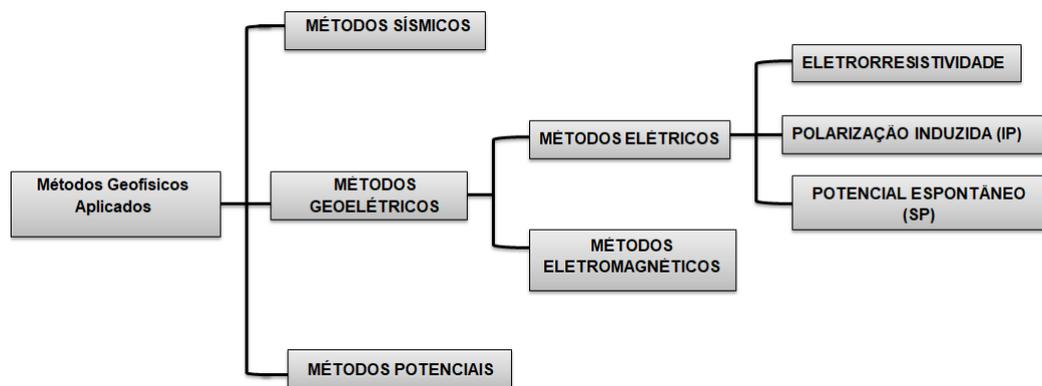


Figura 3.1 – Fluxograma dos métodos geoeletricos no contexto dos métodos geofísicos aplicados

a resistividade das rochas por Gray e Wheller (1720 *apud* Orellana, 1972) e sobre a condutividade do solo por Watson, em 1746 (*apud* Orellana, *op. cit.*).

Os primeiros trabalhos de aplicação deste método em prospecção mineral datam do início do século XX. Dentre os diversos pesquisadores que contribuíram para o desenvolvimento do método da eletrorresistividade destacam-se Conrad Schlumberger, da "Escola Francesa" e Frank Wenner, da "Escola Americana". Estes pesquisadores foram responsáveis pela introdução do arranjo de quatro eletrodos para medidas de resistividade de superfície.

Diversos autores discutem os princípios teóricos e práticos da eletrorresistividade. Entre eles, destacam-se os trabalhos de PARASNIS (1970), Orellana (1972) e Telford *et al.* (1990).

Neste capítulo será mostrado o funcionamento do método geofísico elétrico, em particular o método de eletrorresistividade, que será utilizado no trabalho, a técnicas de caminhamento elétrico (CE) e a teoria sobre o processo de inversão geofísica.

3.1 Propriedades Elébricas das Rochas

Segundo Lima (2014), as propriedades físicas macroscópicas das rochas dependem das propriedades de seus minerais constituintes e de suas proporções volumétricas, da forma das partículas sólidas, da topologia da agregação na chamada textura da rocha e da natureza dos fluidos que, normalmente, preenchem os vazios do agregado.

Ainda sob o ponto de vista do mesmo autor, eletricamente as rochas podem ser tratadas como agregados heterogêneos de partículas sólidas, condutoras e/ou dielétricas contendo em seus vazios, proporções variáveis de eletrólitos aquosos. Suas propriedades elétricas, portanto, dependem da textura e da composição mineral da matriz sólida, da geometria do espaço-de-poros e da proporção volumétrica de água nesses vazios ((MENDELSON; COHEN, 1982); (SEN, 1984); (SEN *et al.*, 1998);(LIMA; SHARMA, 1990) apud (LIMA, 2014)).

As principais propriedades elétricas são a condutividade elétrica, a permissividade dielétrica e a cargabilidade elétrica. A condutividade elétrica (σ) e sua inversa, a resistividade elétrica (ρ), possuem as maiores amplitudes de variação, sendo assim as propriedades mais diagnosticadas e utilizadas na identificação e mapeamento de zonas mineralizadoras, em avaliações de porosidades, de argilosidade, entre outras, quando uma área é submetida à ação de um campo elétrico.

A resistividade elétrica é um parâmetro aplicável para a caracterização da integridade física dos materiais geológicos, em termos de alteração, fraturamento e saturação (BRAGA, 2016).

De maneira simplificada, podemos definir a resistividade como a medida da dificuldade que a corrente elétrica encontra ao passar por um determinado material. Essa dificuldade está relacionada ao mecanismo pelo qual a corrente elétrica se propaga no meio. Esses mecanismos, em solos e rochas, serão elencados a seguir.

A corrente elétrica propaga-se nos materiais através de três mecanismos distintos: transporte eletrônico (ôhmico), eletrolítico e dielétrico. O primeiro é típico de materiais que contém elétrons livres, como os minerais metálicos. Na condução eletrolítica, a corrente é transportada pelos íons e o fluxo de corrente é relativamente mais baixo comparado ao caso anterior. A condução dielétrica ocorre em materiais isolantes (corrente de polarização ou deslocamento)(TELFORD *et al.*, 1990).

Como na natureza a maioria das matrizes rochosas são isolantes, ou seja, não possuem minerais metálicos em sua composição, vamos considerar que a condução da corrente elétrica se dá predominantemente pela condutividade eletrolítica. Assim, em rochas em que predomina a propagação do campo elétrico por condutividade eletrolítica, a re-

sistividade depende de vários fatores, dificultando a atribuição de um único valor para um determinado tipo litológico.

Rochas de mesma natureza podem apresentar resistividades influenciadas pelas condições locais, como: conteúdo de eletrólito e concentração do mesmo, tamanho dos grãos, porosidade, metamorfismo, efeitos tectônicos, entre outros, fazendo com que um mesmo tipo litológico possa apresentar uma ampla gama de variação nos valores de resistividade (Figura 3.2).

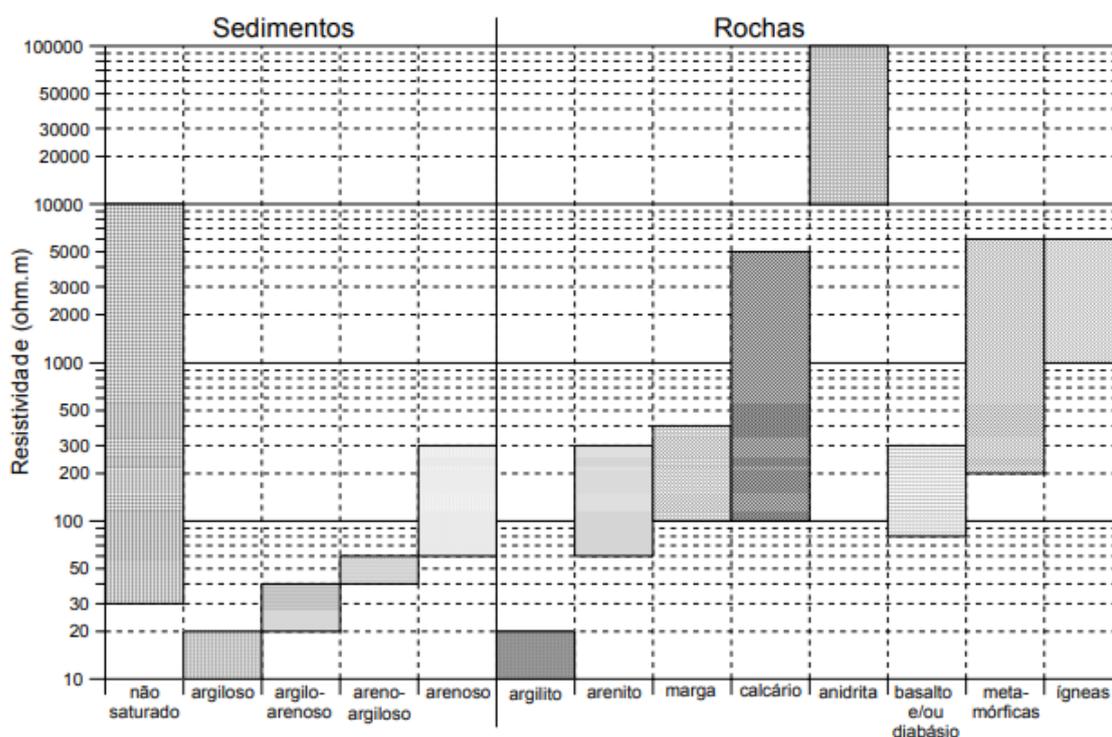


Figura 3.2 – Faixa de variação na resistividade das rochas (BRAGA, 2006).

Os íons, responsáveis por tal condução, resultam da dissociação dos sais na água intersticial das rochas (água de formação). O mais abundante deles é o cloreto de sódio, que se dissocia em Na^+ e Cl^- (NERY, 2014). A concentração e a composição química dos sais vão depender da natureza das rochas nas quais as águas tenham percolado em seu fluxo superficial ou subterrâneo. Já que a maioria das rochas existentes na crosta terrestre são formadas por silicatos e carbonatos, os quais são considerados praticamente isolantes, essas rochas seriam más condutoras de eletricidade, embora o eletrólito presente em seus poros e fissuras altere essa condição.

Archie (1942) desenvolveu, através de vários dados experimentais com arenitos limpos (sem argila), uma relação empírica para expressar a influência da porosidade sobre a resistividade de uma rocha:

$$\rho_t = \frac{a\rho_w}{\phi^m S_w^n} \quad (3.1)$$

onde:

- ρ_t é a resistividade medida em uma formação saturada por qualquer tipo de fluido;
- ρ_w é a resistividade da água de saturação;
- ϕ é a porosidade da rocha;
- S_w é a saturação em água;
- a é um fator que depende da geometria do canal poroso. É um tipo de propriedade textural dos poros.
- m e n são, respectivamente, índices de cimentação e saturação, ambas são constantes empíricas relacionadas ao tipo de porosidade da rocha.

A partir da análise da Figura 3.2, pode-se concluir que apenas com informações geofísicas é praticamente impossível identificar um material geológico com precisão. Isso se deve ao fato de que as resistividades em uma rocha podem variar amplamente em um mesmo tipo litológico, dependendo dos fatores a que as rochas estão sujeitas. Dessa forma uma boa identificação litológica deverá ser feita precisamente pela junção dos resultados geofísicos, testemunhos de sondagens (se houver) e informações geológicas adquiridas anteriormente à aquisição (GONÇALVES, 2016).

As resistividades dos solos, quando saturados, seguem os padrões descritos anteriormente, identificando e caracterizando os diferentes tipos de materiais geológicos em subsuperfície. Entretanto, quando os solos encontram-se não saturados, porção localizada acima do nível d'água, seus valores são considerados atípicos, apresentando uma

ampla faixa de variação (por exemplo, de 100 a 2000 Ohm.m) não identificando os materiais em subsuperfície em termos litológicos. As variações das resistividades, neste caso, refletem apenas as pequenas variações de saturação existentes (BRAGA,2016).

A física do fluxo de corrente elétrica nos solos sugere que uma possível correlação entre a resistência do solo e a resistividade elétrica deve ser baseada nos parâmetros que controlam as duas variáveis, como o tamanho das partículas (textura), grau de saturação, porosidade e cimentação. Contudo, é necessário notar que a resistividade elétrica é sensível a salinidade do fluido de saturação enquanto a resistência do solo não é relacionada a esse parâmetro. Portanto, a relação entre os parâmetros elétricos e a resistência do solo será afetada se a salinidade do fluido variar em profundidade (SUDHA *et al.*, 2009).

Por outro lado, o conteúdo de argila na matriz do solo pode afetar tanto a resistência do solo quanto a resistividade elétrica. A condutividade elétrica está relacionada ao tamanho das partículas pela densidade de cargas elétricas presentes na superfície dos constituintes sólidos do solo (SUDHA *et al.*, 2009).

Em solos com predominância da fase fina, a capacidade de troca catiônica da argila forma uma nuvem de íons móveis adicionais em torno das partículas dos argilominerais facilitando o fluxo de corrente elétrica. Portanto, em solos argilosos temos uma condutividade mais alta (e baixos valores de resistividade elétrica) do que em solos com predominância da fase grossa devido a magnitude da superfície específica (FUKUE *et al.*, 1999).

Solos com grande presença de matéria orgânica (turfa) são usualmente compostos por materiais deteriorados que estão misturados a minerais do solo formando uma textura distinta, possibilitando uma retenção em maior proporção de água e eletrólitos, sendo portanto altamente condutivos.

Ekwue e Bartholomew (2010) observaram o efeito da turfa na condutividade de alguns solos em Trindade, sendo concluído que quando aumenta-se o conteúdo de turfa no solo ocorre um aumento de condutividade elétrica, mantendo constante a umidade e a densidade.

3.2 Método da Eletrorresistividade (ER)

Se considerarmos um condutor cilíndrico homogêneo (Figura 3.3), no qual L é seu comprimento e S é a área de sua seção transversal, com base na Segunda Lei de Ohm, podemos definir a relação entre resistividade (ρ) e a resistência (R), fornecida pela Equação 3.2:

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (3.2)$$

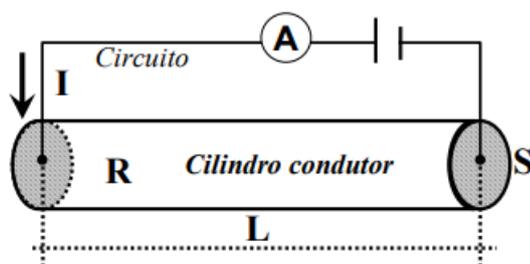


Figura 3.3 – Cilindro condutor homogêneo em que L é seu comprimento e S é a área da sua seção transversal (BRAGA, 2006)

A magnitude ρ é um coeficiente que depende da natureza e do estado físico do corpo considerado e recebe o nome de *resistividade*. Portanto, a dimensão da resistividade é o produto da resistência por uma longitude; em função disto, a unidade de resistividade no sistema *SI* será Ohm.m ($\Omega \cdot m$)

Em um material tridimensional terrestre, a corrente elétrica vai se propagar de forma semi-esférica a partir do local de origem da injeção de corrente (Figura 3.4). Ao conectar-se uma bateria ao solo, por meio de cabos e eletrodos (de corrente), distantes um do outro, a corrente elétrica gerada pela bateria será conduzida pela Terra, já que esta não é um isolante perfeito. Vamos considerar, *a priori*, que a resistividade no solo é uniforme e que o padrão do fluxo de corrente vai refletir essa homogeneidade.

Esse padrão de corrente pode ser mapeado na superfície ao se conectar um voltímetro a dois eletrodos (de potencial), sendo que um deles está mais próximo ao eletrodo de corrente e o outro está mais afastado (distância r). Com essa configuração é possível

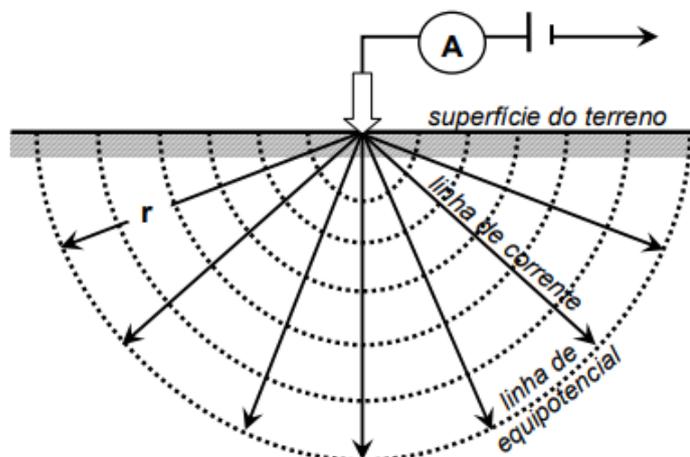


Figura 3.4 – Fonte pontual de corrente na superfície de um meio homogêneo (BRAGA, 2006).

medir a diferença de potencial (ΔV) entre esses dois locais, como é possível observar na Figura 3.5.

Valores de diferença de potenciais detectados fora dos padrões esperados para um solo homogêneo nos fornecem informações quanto à forma e as propriedades elétricas das heterogeneidades em subsuperfície.

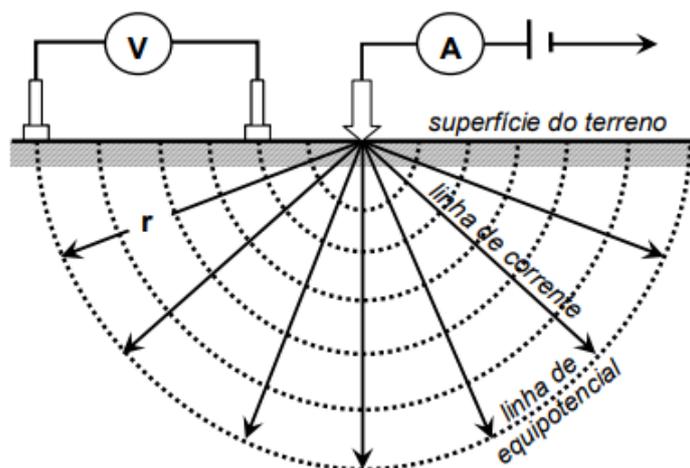


Figura 3.5 – Diferença de Potencial na superfície de um meio homogêneo (BRAGA, 2006).

Porém, na prática esse procedimento não é usual. A razão para tal está na grande distância entre os eletrodos de corrente, sendo necessária uma redução dessa distância. Na Figura 3.6, temos a configuração usual das aquisições elétricas onde são utilizadas, normalmente, quatro eletrodos (dois de corrente e dois de potencial). A profundidade

da penetração da corrente aumenta com o aumento da separação entre os eletrodos de corrente. Por conta disso, essa separação deve ser escolhida com cuidado para que se possa energizar o solo até a profundidade que se deseja investigar (GONÇALVES, 2016).

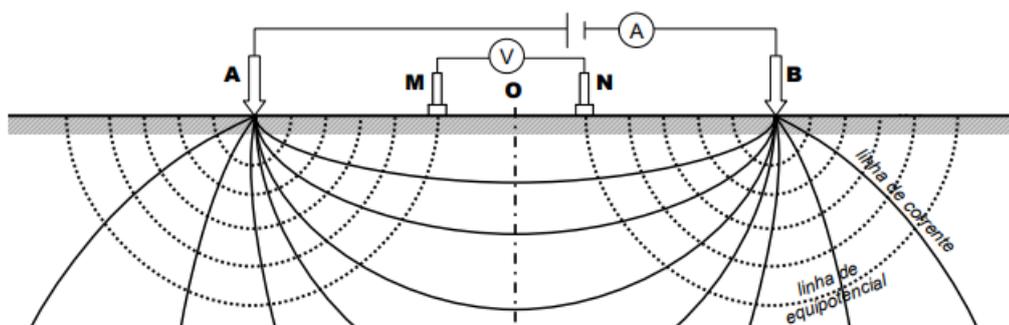


Figura 3.6 – Configuração tetraeletródica usualmente utilizada em campo para medir a diferença de potencial em um solo ao ser injetada uma corrente (BRAGA, 2006).

3.2.1 Teoria Elementar

3.2.1.1 Potencial em um meio Homogêneo

Para calcular o potencial elétrico num meio homogêneo é preciso considerar um semi-espaco homogêneo e isotrópico, de condutividade σ onde se estabelece um fluxo de corrente contínua. Se δA é um elemento de superfície nesse semi-espaco e \vec{J} a densidade de corrente nesse elemento, a corrente que passa através de δA será $\vec{J}\delta A$ (TELFORD *et al.*, 1990)

Em condições estacionárias, a equação de Maxwell para o campo elétrico e a equação de conservação da carga elétrica se reduzem, respectivamente às equações abaixo:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (3.3)$$

e

$$\vec{\nabla} \times \vec{J} = 0, \quad (3.4)$$

sendo \vec{E} a intensidade do campo elétrico (V/m), e \vec{J} a densidade de corrente elétrica (A/m^2). Assim, \vec{E} é um campo conservativo que pode ser derivado de um potencial elétrico V , da seguinte forma:

$$\vec{E} = -\nabla \cdot V \quad (3.5)$$

Em meios isotrópicos e lineares, a densidade de corrente elétrica se relaciona ao campo elétrico pela Lei de Ohm, como mostra a Equação 3.6:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (3.6)$$

sendo σ a condutividade elétrica do semi-espaço.

Deste modo, substituindo a Equação 3.5 na Equação 3.6, obtém-se:

$$\vec{J} = -\sigma \nabla \cdot V \quad (3.7)$$

Aplicando o divergente em ambos os lados da equação anterior e sabendo que $\nabla \cdot \vec{J} = 0$, temos:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (3.8)$$

Usando a identidade $\nabla \cdot (\phi A) = \nabla \phi \cdot A + \phi \nabla \cdot A$ na Equação 3.8, tem-se:

$$\nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (3.9)$$

Para um condutor homogêneo, σ é constante e diferente de zero, então o primeiro termo da Equação 3.9 se anula e o que resta é a Equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.10)$$

Para um eletrodo pontual de corrente no interior do espaço condutor, homogêneo e isotrópico, haverá influência da simetria esférica e o potencial assim dependerá da distância da fonte ao ponto de medição. Considerando isso, temos que o potencial medido obedece à seguinte equação:

$$V = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (3.11)$$

Onde V é o potencial elétrico, I é a intensidade de corrente, ρ é a resistividade e r é a distância entre o eletrodo de corrente e o ponto no qual o potencial é medido.

No caso do eletrodo se situar na superfície do semi-espaço, e a condutividade acima deste semi-espaço for nula (terra-ar), a expressão do potencial elétrico é:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (3.12)$$

Quando a distância entre dois eletrodos de corrente é finita (Figura 3.6), o potencial em qualquer ponto próximo da superfície será afetado por ambos eletrodos de corrente. Assim, o potencial devido ao eletrodo de corrente A no eletrodo de potencial M é:

$$V_1 = \frac{A_1}{AM} \quad (3.13)$$

Onde \overline{AM} é a distância do eletrodo de corrente A ao eletrodo de potencial M e A_1 é:

$$A_1 = \frac{I\rho}{2\pi} \quad (3.14)$$

Pelo fato das correntes nos dois eletrodos serem iguais e opostas em direção, o potencial devido ao eletrodo de corrente B no eletrodo de potencial M é:

$$V_2 = -\frac{A_2}{\overline{BM}} \quad (3.15)$$

Onde \overline{BM} é a distância do eletrodo de corrente B ao eletrodo de potencial M e o A_2 é:

$$A_2 = \frac{I\rho}{2\pi} = -A_1 \quad (3.16)$$

Assim, temos:

$$V_1 + V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} \right) \quad (3.17)$$

Finalmente, introduzindo um segundo eletrodo de potencial em N, é possível medir a diferença de potencial entre M e N, que será:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} \right) - \left(\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{BN}} \right) \right] \quad (3.18)$$

Essa configuração corresponde ao arranjo de quatro eletrodos, onde \overline{AM} , \overline{BM} , \overline{AN} , \overline{BN} são os espaçamentos, ou separações, entre os eletrodos. Isolando o parâmetro

resistividade, obtém-se:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \left[\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)} \right] \quad (3.19)$$

Onde o fator geométrico é dado por:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)} \quad (3.20)$$

e finalmente chegamos a Equação 3.21:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3.21)$$

A constante K possui dimensões de comprimento e depende unicamente da geometria relacionada a disposição dos eletrodos de corrente e potencial em superfície. Trata-se de um fator que leva em conta a diminuição do potencial com a distância.

A Equação 3.21 sintetiza o método da eletrorresistividade que consiste, basicamente, na injeção de uma corrente (I) no solo por intermédio de um par de eletrodos (A e B) e a medida da diferença de potencial (ΔV) resultante da passagem desta corrente através de outro par de eletrodos (M e N).

3.2.2 O conceito de resistividade aparente

Quando é realizada uma investigação através da injeção de corrente no solo, tem-se os seguintes problemas:

- As dimensões do material através do qual passa a corrente varia com a geometria da disposição dos eletrodos (K) usados para injetar a corrente;
- O meio não é homogêneo, pois engloba, a rocha subjacente, a influência do

lençol freático e de outras rochas intercaladas (como no caso de um pacote de rochas estratificadas).

O fato do meio não ser homogêneo faz com que o valor da resistividade elétrica varie ponto a ponto, tanto lateralmente como também com o aumento de profundidade. Consequentemente, o valor medido em superfície irá variar para cada posição do eletrodo, assim como para a disposição e/ou o tamanho do arranjo de eletrodos utilizado.

Essa resistividade, obtida aplicando-se a equação válida para meios homogêneos (sendo que o dado foi obtido em meio heterogêneo) é denominada resistividade aparente. A Equação 3.21, desta forma, pode ser reescrita como:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3.22)$$

A resistividade aparente, assim como a verdadeira são expressas com a mesma unidade de medida no (SI), Ohm.m. Em um modelo de Terra homogênea, a resistividade aparente é igual a resistividade verdadeira.

Segundo Orellana (1972), a resistividade aparente não é um parâmetro físico do meio e sim um valor que representa o efeito integrado do semi-espaco sobre o qual a medida é efetuada. A resistividade aparente é uma resultante que sofre influência de diversas resistividades existentes no volume investigado. Trata-se de um conceito formal, não podendo ser considerada uma média das resistividades em subsuperfície.

Conforme ilustrado na Figura 3.7, onde os quatro eletrodos estão posicionados em locais de resistividades $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$, a resistividade medida (aparente) possivelmente não será igual a nenhuma das quatro, mas sofrerá influência de todas elas, de suas respectivas distribuições e geometria dos corpos (GANDOLFO, 2007).

Por fim, o conceito de resistividade aparente é de grande utilidade em aplicações práticas do método, pois é um parâmetro, que como já discutido anteriormente, pode apresentar variações ao longo de uma seção, possibilitando a identificação de anomalias resistivas ou condutivas presentes no local investigado.

Para que se conheça as resistividades verdadeiras das camadas é necessário que o dado passe por uma etapa de inversão geofísica.

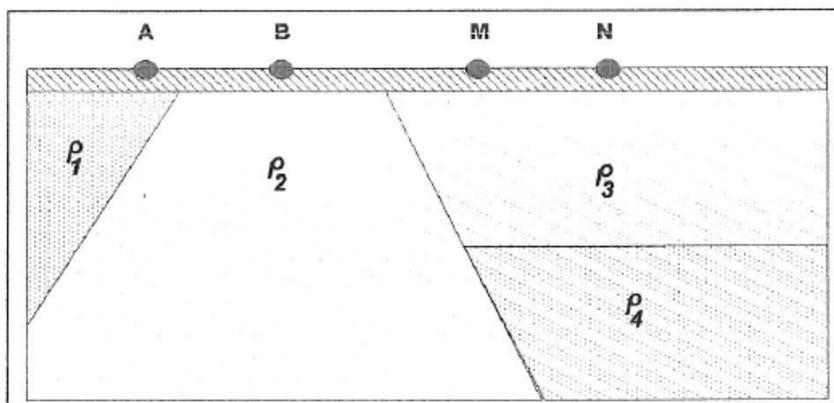


Figura 3.7 – Ilustração esquemática de um substrato rochoso heterogêneo (GALLAS, 2000).

3.2.3 Arranjo de Eletrodos

A forma como os eletrodos de corrente (A e B) e os eletrodos de potencial (M e N) são dispostos nos ensaios geoeletricos é denominada arranjo

No método da eletrorresistividade, é necessário calcular o fator geométrico K adequado para obter o valor da ρ_a , que satisfaça o arranjo utilizado. Os diferentes tipos e estilos de configuração dos eletrodos possuem vantagens, desvantagens e sensibilidades particulares. O espaço disponível e a magnitude do trabalho são alguns dos fatores que influenciam na escolha do tipo de arranjo a se utilizar (GONÇALVES, 2016).

Os arranjos de eletrodos mais utilizados são: Wenner, Schlumberger e Dipolo-Dipolo, contudo, não só existem essas configurações na bibliografia. Encontram-se muitos casos práticos em que os arranjos pólo-dipolo, gradiente e mais raramente, *mise-à-la-masse* foram ou são utilizados. Todavia, neste trabalho o foco será dado no Dipolo-Dipolo, que será o arranjo utilizado.

O arranjo Dipolo-Dipolo é certamente o de uso mais difundido dentre os diversos arranjos existentes, sendo largamente utilizado para diversos fins (mineração, prospecção de água subterrânea, estudos ambientais e geologia de engenharia) (GANDOLFO, 2007).

Este arranjo também possui uma configuração tetraeletródica alinhada semelhante ao arranjo anterior. Os eletrodos de corrente são espaçados com uma distância fixa

a bem como os eletrodos de potencial (Figura 3.8). O espaçamento a entre os dois eletrodos de corrente e os dois eletrodos de potencial permanece fixo durante todo o levantamento, sendo essa abertura definida com o objetivo do trabalho.

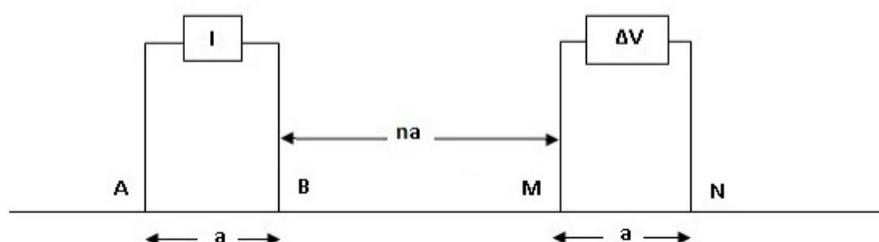


Figura 3.8 – Arranjo Dipolo-Dipolo (AMARANTE, 2014).

São realizadas medidas do potencial elétrico conforme os eletrodos de potencial e de corrente são afastados por uma separação $n.a$, onde n é uma constante. Cada um destes afastamentos corresponde a um nível de investigação em profundidade. Quanto maior for esta distância, maiores profundidades poderão ser alcançadas, tendo como limite de valor aceitável, as leituras de potencial superiores ao nível de ruído presente no local (GANDOLFO; GALLAS, 2007).

O fator geométrico desse arranjo é dado pela Equação 3.23:

$$K = \pi n a (n + 1) (n + 2) \quad (3.23)$$

3.2.4 Técnica do Caminhamento Elétrico

No método da Eletrorresistividade, duas técnicas são utilizadas para fazer o mapeamento do subsolo, a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (CE). Serão apresentadas algumas características e principais usos da técnica de Caminhamento Elétrico (CE), utilizada no trabalho.

A técnica de Caminhamento Elétrico tem como objetivo gerar uma imagem da sub-superfície em que seja possível delimitar a geometria das litologias ali presentes, sendo obtida com base em medidas efetuadas ao longo do terreno, com espaçamento constante entre os eletrodos AMNB. Por meio dessa técnica, investigam-se, ao longo de linhas,

as variações laterais do parâmetro físico a uma ou mais profundidades determinadas (GONÇALVES, 2016).

Para realizar o caminhamento elétrico é necessário fixar o espaçamento entre os eletrodos para obtenção das leituras pertinentes a um mesmo nível. Então, todo o arranjo será deslocado para a posição seguinte e são efetuadas as leituras de resistividade aparente correspondentes, continuando esse procedimento até o final do perfil a ser investigado. O arranjo de eletrodos mais utilizado nesta técnica é o dipolo-dipolo.

Neste arranjo, os eletrodos de corrente e de potencial são alinhados em uma mesma direção com espaçamento constante (Figura 3.9). No seu desenvolvimento podem-se utilizar vários dipolos de recepção dispostos ao longo do sentido da investigação, podendo, a depender do caráter do trabalho, estudar as variações horizontais de um parâmetro geológico ao longo de um perfil com um ou mais dipolos, atingindo vários níveis de investigação (BRAGA, 2016).

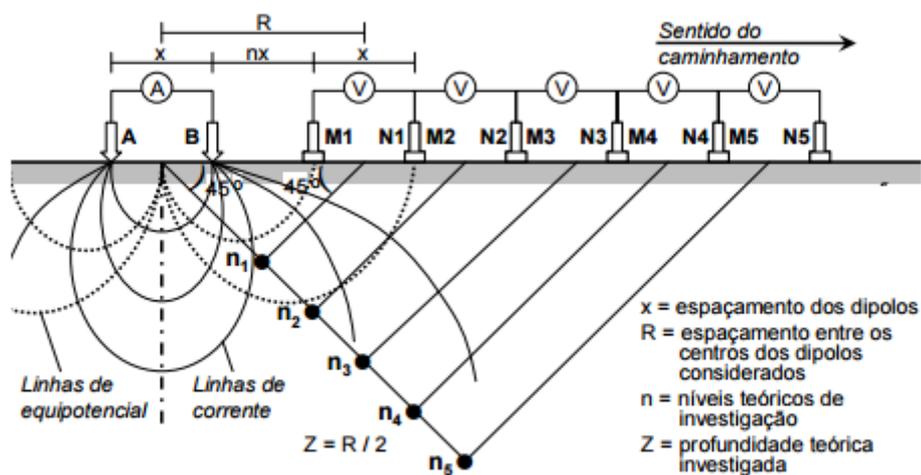


Figura 3.9 – Técnica do Caminhamento Elétrico utilizando um arranjo dipolo-dipolo (BRAGA, 2016).

É necessário salientar que a profundidade de investigação não depende unicamente da configuração geométrica do sistema de medidas, mas também dos contrastes das resistividades nos materiais em subsuperfície (GALLAS, 2000). A profundidade de investigação varia de $R/4$ em meio bastante resistivo e $R/10$ em meio altamente condutor (ZORZI; RIGOTI, 2011).

Uma forma de plotagem dos dados largamente utilizada no meio técnico foi introduzida por (HALLOF, 1957). O sistema de plotagem dos parâmetros geoeletricos é efetuado, segundo o autor, considerando como ponto de atribuição das leituras uma projeção de 45° a partir dos centros dos dipolos AB e MN até o ponto médio entre os centros desses dipolos (Figura 3.10).

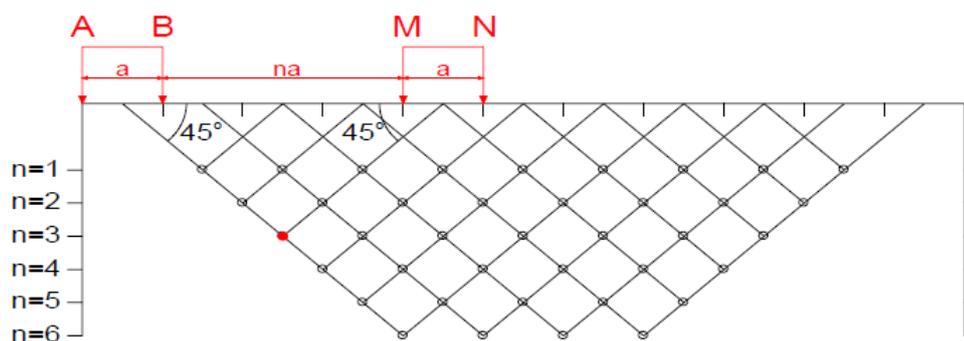


Figura 3.10 – Forma de dados para construção da seção de resistividade aparente. N= níveis de investigação (HALLOF, 1957).

Após a plotagem de todos os parâmetros geoeletricos obtidos em um perfil levantado, os dados de campo são geralmente apresentados sob a forma de uma seção, onde as resistividades aparentes estão distribuídas espacialmente em subsuperfície. Porém, é necessário entender que essas distribuições não possuem correspondência com a verdadeira posição e geometria das estruturas em subsuperfície. Por conta deste fato, chama-se essa forma de apresentar os dados de pseudo-seção de resistividade aparente (GONÇALVES, 2016).

Cada linha horizontal da pseudo-seção está associada a um valor específico de n e também a uma "profundidade teórica de investigação", resultando em uma apresentação apenas qualitativa das variações verticais de resistividade aparente (Figura 3.11). Ou seja, neste tipo de plotagem, que será chamada de "convencional", as profundidades representadas não estão relacionadas diretamente a nenhuma profundidade efetiva e a escala vertical, neste caso, não tem nenhum significado preciso (GANDOLFO, 2007).

Segundo Gallas (2000), a grande vantagem de se utilizar o arranjo dipolo-dipolo é o fato de se tratar de um arranjo simétrico, sendo mais fácil a interpretação de uma pseudo-seção, principalmente para se determinar com segurança a posição de uma anomalia.

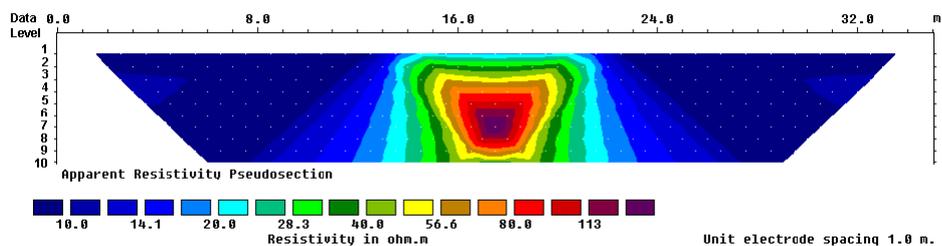


Figura 3.11 – Exemplo de uma pseudo-seção de resistividade aparente usando o arranjo dipolo-dipolo (LOKE, 2000)

Para realizar um levantamento utilizando a técnica do caminhamento elétrico é exigido do geofísico uma programação que inclui, além das questões de organização, logística e infra-estrutura, a escolha do espaçamento entre os eletrodos, a quantidade de níveis a serem investigados, espaçamentos ideais entre os perfis e, ainda, as direções das linhas (GONÇALVES, 2016).

3.3 Profundidade de Investigação

A profundidade de investigação é um conceito de fundamental importância em qualquer método ou técnica geofísica utilizada. No caso do método de eletrorresistividade, vários autores têm se debruçado sobre este tópico com o intuito de estabelecer uma possível relação entre o espaçamento dos eletrodos (e tipo de arranjo) na superfície e uma profundidade de investigação determinada.

EVJEN (1938) foi um pioneiro na definição de profundidade de investigação utilizando o conceito de fator-profundidade ("*depth factor*"). Entende-se por fator-profundidade, um fator que transforma a distância medida na superfície do terreno (No caso dos métodos elétricos, o espaçamento entre eletrodos) em um valor significativo de profundidade.

Este autor ainda conceituou o termo *profundidade de investigação* como sendo a profundidade onde exatamente metade da corrente total esteja situada acima e a outra metade situada abaixo da mesma, enfatizando ainda que a penetração depende da distribuição das propriedades elétricas do meio com a profundidade.

Segundo MUSKAT e EVINGER (1941), para um dado sistema, metade da corrente

introduzida em subsuperfície irá propagar-se acima de um plano, cuja profundidade é igual à metade do espaçamento entre os eletrodos de corrente.

Posteriormente, ROY e APPARAO (1971) concluíram através de sua densa pesquisa que, ao ser considerado um meio com determinada estrutura e composição (uniforme, homogêneo e isotrópico), a penetração de corrente (ou distribuição de corrente) é função somente do posicionamento dos eletrodos de corrente, enquanto a profundidade de investigação é determinada pela posição tanto dos eletrodos de corrente como os de potencial.

Na técnica de Caminhamento Elétrico (utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo), a profundidade de investigação teórica em cada nível investigado é definida, segundo alguns autores como Braga (2016), como sendo a metade da distância entre os centros dos dipolos considerados (AB e MN). Entretanto, na prática, essa relação é mais próxima da realidade se for tomada como aproximadamente $R/4$, em que R é a distância entre os centros dos dipolos. É necessário lembrar que, como nesse tipo de arranjo o potencial à medida que nos afastamos do dipolo AB diminui sensivelmente, as leituras mais afastadas se tornarão mais difíceis de serem obtidas com precisão.

3.4 Inversão Geofísica

A inversão geofísica pode ser definida como o processo matemático que determina um modelo idealizado de subsuperfície com base em um conjunto finito de dados observados, cuja resposta esteja em concordância com estes valores medidos (GANDOLFO, 2007).

Existem três conceitos fundamentais que devem ser analisados na inversão geofísica: o de "modelo"; o de "parâmetro do modelo" e o da "resposta associada ao modelo".

Um modelo consiste em um conjunto de relações que representam uma abstração matemática particular de um processo observado. Será expresso pela distribuição da(s) propriedade(s) física(s) investigada(s) (por exemplo, resistividade elétrica, velocidade de propagação da onda sísmica etc.) e procura reconstituir as feições geológicas, de forma a descrever adequadamente o conjunto de dados observados em campo.

As equações relacionadas a este modelo dependem, por sua vez, de um determinado

número de parâmetros, os quais se desejam determinar a partir dos dados observados. A resposta do modelo consiste nos dados sintéticos produzidos pelo mesmo, podendo ser tanto uma função linear como uma função não linear dos parâmetros do modelo.

O dado obtido em campo (medida) e a resposta do modelo são comparados por intermédio de algoritmos de otimização que procuram minimizar as diferenças entre o dado observado e o dado calculado. Muitos desses algoritmos requerem a escolha prévia de um modelo de parâmetros, a partir do qual é estabelecida a resposta do modelo (modelo inicial). No passo seguinte, o algoritmo de otimização irá produzir um novo modelo, resultando em uma nova resposta que se ajustará cada vez melhor ao conjunto de dados medidos. Se de fato ocorrer este processo, é dito que o mesmo converge para uma solução (GANDOLFO, 2007).

Como os dados geofísicos reais são sempre numericamente finitos, a inversão nunca poderá ser única. Ou seja, mais de uma solução irá satisfazer as observações.

3.4.1 *Inversão 2D de dados de eletrorresistividade*

Quando não existiam programas capazes de inverter dados de eletrorresistividade 2D, a interpretação baseava-se apenas no dado de campo apresentado sob a forma de pseudo-seções de resistividade elétrica aparente. De forma geral, a interpretação de uma seção de caminhamento era realizada de forma simplesmente qualitativa, o que dependia da experiência do geofísico intérprete para o posicionamento correto das anomalias observadas.

Apesar destas limitações, interpretações puramente qualitativas vinham sendo empregadas com relativo sucesso na aplicação da técnica de caminhamento elétrico em mineração e na prospecção de água subterrânea em aquíferos fissurados (GANDOLFO, 2007). Atualmente, existem no mercado diversos "softwares" para a inversão dos dados, que podem, a princípio, corrigir as distorções observadas nas pseudo-seções, e fornecer valores mais exatos das profundidades e das resistividades elétricas em subsuperfície.

A causa desta evolução está intimamente ligada ao desenvolvimento de "*hardware*", no qual máquinas potentes e a preços mais acessíveis são capazes de manipular um grande número de informações. Além disso, a internet foi uma importante ferramenta,

partindo do pressuposto que disponibiliza ao usuário o emprego de vários programas para livre utilização.

As principais técnicas de inversão bidimensional para os dados de eletrorresistividade são as técnicas conhecidas como "*ridge regression*" e a técnica de otimização através do método dos mínimos quadrados.

Pelton *et al.* (1978) descreve a técnica "*ridge regression*" como um algoritmo que realiza a inversão dos dados de eletrorresistividade. Este algoritmo difere do que é utilizado pelo método dos mínimos quadrados. De acordo com Sasaki (1989), DeGroot-Hedlin e Constable (1990), Oldenburg, D. W and Li *et al.* (1994), Loke e Barker (1996), o método da otimização por mínimos quadrados é mais comumente utilizado, tendo como principal vantagem a de ser uma técnica de uso para inversão de dados 2D e 3D de eletrorresistividade.

De acordo com Ellis *et al.* (1994), uma maior quantidade de informações a priori melhora de maneira considerável o modelo geofísico, ou seja, a principal vantagem do método dos mínimos quadrados é de permitir que se acrescentem informações adicionais de subsuperfície, estas podem ser restritivas durante o procedimento de inversão de dados, o que permite um maior controle durante o processo de modelagem, adequando melhor o modelo invertido com a geologia local em questão.

Os *softwares* rotineiramente empregados para a inversão 2D podem ser classificados em dois principais grupos: os de inversão por polígonos e os de inversão por suavização (OLAYINKA; YARAMANCI, 2002).

A inversão por polígonos, conhecida por "*true polygon inversion*" ou "*block inversion*" (OLAYINKA; YARAMANCI, 2000), utiliza algoritmos que empregam polígonos para a representação de corpos ou camadas, constituindo assim elementos geométricos cada qual com um valor de resistividade constante. Desta forma, é necessária a construção de um modelo geológico inicial por parte do usuário.

Já a inversão por suavização, "*smooth inversion*", utiliza algoritmos baseados em um esquema de células. A inversão pode ser feita sem que o usuário entre com um modelo geológico inicial constituindo, dessa forma, um processo automático de imageamento.

O modelo por suavização, gerado de forma automatizada, pode auxiliar na construção do modelo inicial que o processo de inversão por polígonos necessita.

3.4.2 Modelo de Inversão com a utilização do software *RES2DINV*

De acordo com Loke (1997), a inversão bidimensional dos dados de resistividade é um problema do tipo não linear, o qual necessita de um process iterativo a partir da introdução do modelo inicial. Essa característica permite que o modelo inicial não dependa da introdução dos dados medidos para a realização de pseudoseções de resistividade aparente.

A principal vantagem do programa *RES2DINV* é a não entrada dos dados no modelo inicial por parte do intérprete, assim o processamento do modelo de inversão é rápido, com a entrada dos dados obtidos posteriormente para o mecanismo de inversão do modelo a ser tratado.

A sensibilidade nos valores de resistividade está relacionada com o tipo de arranjo eletródico utilizado no ensaio, ou seja, por exemplo, se o arranjo for dipolo-dipolo, a sensibilidade nos valores de resistividade tende a ser maior do que nos arranjos Schlumberger e Wenner (GEOTOMO SOFTWARE, 2004).

3.4.2.1 Parâmetros da modelagem de inversão

Os principais parâmetros a serem considerados durante a modelagem de inversão é quanto ao tipo de suavização, fator de amortecimento, a forma de discretização em blocos retangulares, o processamento da matriz jacobiana, o erro *rms* e, por fim, fator e filtro de aplainamento.

Existem dois tipos diferentes de restrição que podem ser aplicados ao método de inversão por mínimos quadrados: o método por vínculo de suavidade da norma L_2 e a inversão que minimiza a norma L_1 . Esta última será chamada de "inversão robusta", diferenciando-se da primeira, que será chamada de "inversão por vínculo de suavidade".

A inversão por vínculo de suavidade busca um modelo suavizado que minimize a soma do quadrado das variações espaciais do modelo de resistividade ("rugosidade" do

modelo) assim como erro (diferença entre o dado medido e o calculado).

A suavização do modelo de inversão é extremamente sensível a qualquer tipo de ruídos nos dados, isto é, se o conjunto de dados tiver uma grande quantidade de ruídos, a inversão por suavização é mais influenciável, enquanto que se o nível do ruído for baixo, o processo de suavização retratará os diferentes intervalos de resistividade de maneira gradual, de tal maneira que não exista variação abrupta na resistividade em subsuperfície, sendo, portanto um modelo com variação gradual de resistividade em subsuperfície e sem saltos nesses valores.

Em um dado pouco ruidoso e com boa qualidade nas informações, qualquer tipo de método de suavização das técnicas de inversão satisfaz o modelo final (da imagem a ser interpretada), sendo, portanto um modelo que pode ser usado por qualquer tipo de suavização das técnicas de inversão.

Já a inversão robusta, de maneira diferente da inversão por suavização, tem como finalidade buscar um modelo que minimize a diferença absoluta entre os valores de resistividades aparentes medidos e calculados. Esta restrição é referida na literatura como "blocky inversion" (LOKE *et al.*, 2003).

Esta inversão tem como característica a menor sensibilidade a ruídos de forma que produz menos artefatos no modelo. No entanto, diferentemente da inversão por suavização, tolera melhor a existência de um valor discrepante no universo dos dados. Além de fornecer resultados mais satisfatórios em locais com variações abruptas de resistividade produzindo, como resultado final, imagens nas quais a distribuição de resistividade se dá por degraus. Se tratando de situações com grandes contrastes de resistividades, a inversão robusta fornece, em linhas gerais, o erro de ajuste inferior à inversão por suavização

A discretização do meio consiste na divisão do domínio em células retangulares homogêneas, sendo o parâmetro do modelo, a resistividade elétrica *verdadeira* de cada elemento que compõe a malha. As células são comumente denominadas de blocos. Os blocos do modelo 2D são arranjados de uma forma não rígida e aproximadamente em conformidade com a distribuição dos dados na pseudo-seção de resistividade aparente (LOKE, 2000).

Desta forma, o problema inverso irá consistir em determinar um valor de resistividade elétrica de cada célula de forma que seja minimizada a diferença entre o valor calculado e o valor de resistividade aparente medido (SASAKI, 1989).

No RES2DINV, a utilização de células com largura igual a meio espaçamento entre eletrodos na malha de elementos finitos fornece resultados mais precisos no cálculo das resistividades do modelo. O custo deste procedimento é o aumento do tempo de processamento, pois a quantidade de blocos do modelo cresce significativamente (LOKE, 2000).

Cada uma das células ou blocos possuirá os seguintes atributos: um valor de resistividade calculada (que é o parâmetro do modelo), uma largura e uma espessura. O modelo é arranjado de maneira similar à distribuição dos pontos ("x") da pseudo-seção de resistividade aparente (Figura 3.12) (GEOTOMO SOFTWARE, 2004).



Figura 3.12 – Arranjo de blocos utilizado no modelo, juntamente com a posição dos pontos de medida da correspondente pseudo-seção. O arranjo de eletrodos utilizado foi o Dipolo-Dipolo (GEOTOMO SOFTWARE, 2004).

Quanto à espessura dos blocos, a quantidade de fileiras dos mesmos está também fortemente vinculada à distribuição dos pontos da pseudo-seção, plotados de acordo com as profundidades estabelecidas por Edwards (1977). A espessura da primeira fileira de blocos e o incremento (dado em porcentagem) das fileiras subsequentes em profundidade são outros dois parâmetros que definem o arranjo discreto utilizado no RES2DINV. Estes podem ser modificados pelo usuário no ajuste do modelo se o mesmo possuir informações de métodos diretos de investigação (GEOTOMO SOFTWARE, 2004).

Para o arranjo Wenner e Schlumberger, a espessura da primeira fileira dos blocos é

0,5 vezes o espaçamento entre os eletrodos. Já para os arranjos Pólo-Dipolo e Dipolo-Dipolo, esta espessura é de aproximadamente 0,9 , 0,6 e 0,3 vezes o espaçamento entre os eletrodos, respectivamente (GEOTOMO SOFTWARE, 2004).

Quanto ao cálculo e processamento da matriz jacobiana é dado como uma resposta do modelo em relação aos dados de cada resistividade, onde cada bloco do modelo é discretizado. O uso principal da matriz jacobiana é através dos métodos Gauss-Newton e quasi-Newton, que são dois diferentes tipos de soluções através do método de mínimos quadrados (GANDOLFO, 2007).

O método Gauss-Newton apresenta uma desvantagem e uma vantagem em relação ao método quasi-Newton. A principal vantagem é que o número de iterações necessárias para o modelo de inversão convergir é geralmente baixo, enquanto que a principal desvantagem é de requerer maior processamento computacional e uma maior quantidade de dados, o que leva mais tempo quando se compara com o método quasi-Newton (GANDOLFO, 2007).

Gandolfo (2007) menciona que a principal desvantagem do método quasi-Newton é a necessidade de um maior número de iterações para o processo de inversão convergir, sendo que a principal vantagem é o menor tempo computacional para processar uma maior quantidade de dados.

A técnica comumente utilizada em programas de geofísica é uma intermediária que se utiliza da combinação dos métodos Gauss-Newton e quasi-Newton, de tal forma que o tempo de convergência e o erro de ajuste fique entre os resultados de ambos os métodos dos mínimos quadrados (LOKE *et al.*, 2003).

O fator de amortecimento representa certo equilíbrio entre a resolução e a estabilidade, sendo usado para controlar a suavização de uma imagem (SASAKI, 1992). Este fator é um parâmetro que suaviza o modelamento geofísico, ou seja, quando o fator de amortecimento é pequeno, consegue-se detectar variações de resistividade que são discrepantes, em contrapartida quando o fator de amortecimento é grande, as discrepâncias entre os valores de resistividade não são bem identificadas, por causa da suavização destes valores (DEGROOT-HEDLIN; CONSTABLE, 1990).

O filtro de aplainamento é um outro parâmetro que é relacionado com o fator de amortecimento, adequando melhor o modelo geofísico à realidade do local, pois permite adicionar informações geológicas que se tornam importantes na tentativa de enriquecer a modelagem geofísica (LOKE, 1997).

3.4.3 erro RMS

O erro de ajuste dos dados (*"data misfit"*) de resistividade aparente é calculado através da diferença entre o logaritmo das resistividades aparentes medidas ρ_{aobs} e calculadas ρ_{acalc} , podendo ser expressado pela equação abaixo:

$$e = [(\rho_{aobs} - \rho_{acalc}) / (\rho_{aobs})] \cdot 100\% \quad (3.24)$$

Além disso, pode-se calcular o erro RMS (*"root mean square"*) para toda a pseudo-seção constituída por "N" dados:

$$e_{RMS} = \left(\frac{1}{N} \sum^2 \right)^{1/2} \quad (3.25)$$

Frequentemente o erro RMS é utilizado como um fator de qualidade da inversão geofísica, representando matematicamente quanto o modelo calculado se aproxima do modelo observado em campo. É admitido na literatura que seções invertidas com erros RMS abaixo de 10% se constituem como boas aproximações da subsuperfície.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados aspectos relevantes às três áreas de estudo: Localização Geográfica, Geologia Regional, Caracterização Geotécnica e suas respectivas aquisições geofísicas. Também serão esclarecidos aspectos técnicos da aquisição e do Tratamento e Processamento dos Dados. Por fim, o capítulo é encerrado com a descrição da Análise Qualitativa e da Correlação.

4.1 Área I

4.1.1 Localização Geográfica

A área de estudo I (Figura 4.1) está localizada nas coordenadas $12^{\circ} 51' 01.05''$ S e $38^{\circ} 17' 51.16''$ O e se constitui em zona alagada com vegetação de mangue sobre o qual se desenvolveu um trabalho de aterro na região do talvegue do Córrego Paranamirim. Essa área é localizada na Via Expressa de Lauro de Freitas (VELF) ou BA-093, em Camaçari, município da Região Metropolitana de Salvador (RMS), situada a aproximadamente 40km da capital estadual.

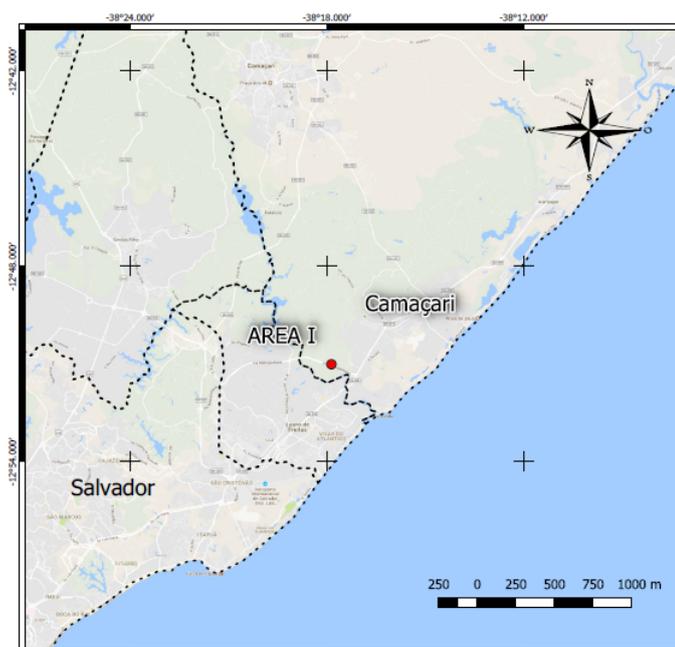


Figura 4.1 – Imagem de satélite da área de estudo e do córrego Paranamirim, em Camaçari-BA.

4.1.2 Geologia Regional

A área de estudo I encontra-se no contexto bacinal conhecido como Bacia do Recôncavo. Esta bacia encontra-se inserida no Cráton do São Francisco, ocupando uma área de aproximadamente 11.500 km^2 . É limitada a norte e noroeste, pelo Alto do Aporá; a sul, pelo sistema de falhas da Barra; a oeste, pela falha de Maragogipe; e, a leste, pelo sistema de falhas de Salvador (SILVA, O. B.; CAIXETA, J. M.; MILHOMEM, P.S.; KOSIN, 2007), como pode ser observada na Figura 4.2:

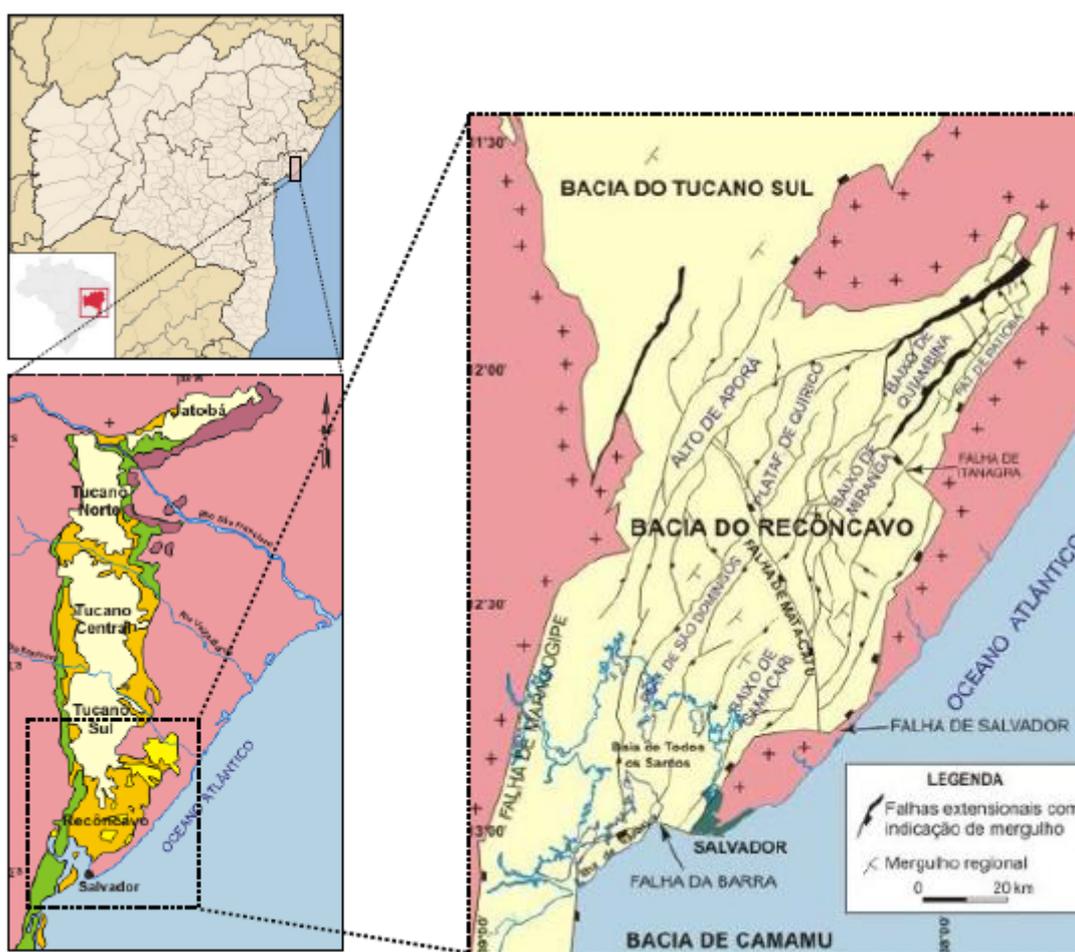


Figura 4.2 – Mapa de localização, com destaque para a Bacia do Recôncavo (MILHOMEM, P.S.; DE MAMAN, E.J.; OLIVEIRA, F.M.; CARVALHO, M.S.S.; SOUZA-LIMA, 2003).

A Bacia do Recôncavo (Figura 4.3) é parte integrante do sistema de riftes do Recôncavo-Tucano-Jatobá, que se estende também pelos estados de Sergipe e Pernambuco. Sua configuração estrutural está relacionada a esforços distensionais que resulta-

ram na abertura do Supercontinente Gondwana, durante o Eocretácio (MAGNAVITA *et al.*, 2005).

Sua arquitetura é a de um meio *graben* (f), com falha de borda a leste e orientação geral NE-SW que se desenvolveu sobre o embasamento cristalino de idade arqueana a paleoproterozóica. Sua constituição é essencialmente formada por pacotes sedimentares siliciclásticos com depocentro atingindo espessura máxima de 6.500m, no baixio de Camaçari. Sua configuração estrutural é definida principalmente por falhamentos normais planares, com direção preferencial N30°E, que condicionam o mergulho regional das camadas para SE, em direção às áreas mais subsidentes (MILHOMEM, P.S.; DE MAMAN, E.J.; OLIVEIRA, F.M.; CARVALHO, M.S.S.; SOUZA-LIMA, 2003).

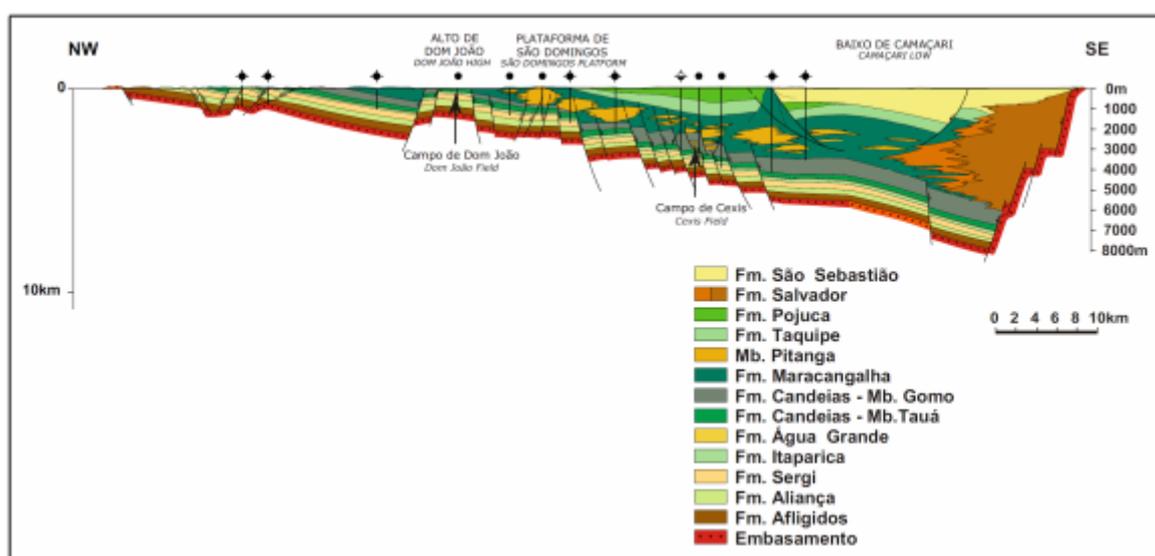


Figura 4.3 – Seção geológica esquemática da Bacia do Recôncavo evidenciando a geometria de meio-*graben* e falhamentos normais de alto ângulo (PENTEADO, 1999).

4.1.2.1 Estatigrafia da Bacia do Recôncavo

- **Embasamento:** Desenvolvido sobre o Cráton do São Francisco, o embasamento da bacia é representado pelo Cinturão Salvador-Esplanada e consiste de um segmento crustal estruturado na direção NE-SW, limitado por zonas de cisalhamento transcorrentes sinistrais. Predominam, na área de estudo, granulitos (ortognaisses charnoenderbíticos e charnockíticos) e biotita gnaiss retrometamorfizado a partir do granulito (OLIVEIRA JR, 1990).

- **Sequências Sedimentares da Bacia do Recôncavo:** Segundo ARAGÃO (1994), as sequências sedimentares que preenchem a Bacia do Recôncavo, são atribuídas a processos extensionais do período Juro-Cretáceo, relacionadas ao estágios de *sinéclise*, *pré-rifte*, *rifte* e *pós-rifte*. A descrição de cada estágio da Bacia do Recôncavo foge do escopo deste trabalho. Portanto, serão apenas apresentadas informações sobre as sequências sedimentares importantes para o contexto do município de Camaçari.

4.1.2.2 Geologia Local

No município de Camaçari, ocorre uma diversidade de unidades litológicas, a saber: Embasamento Cristalino, Formação São Sebastião, Formação Marizal, Grupo Barreiras, Depósitos Flúvio-Marinhos e Eólicos, Depósitos Litorâneos Holocênicos, Depósitos Flúvio-Lagunares e Terraços Holocênicos (CAMAÇARI, 2015) (Figura 4.4). As unidades serão descritas cronologicamente da mais antiga para a mais recente.

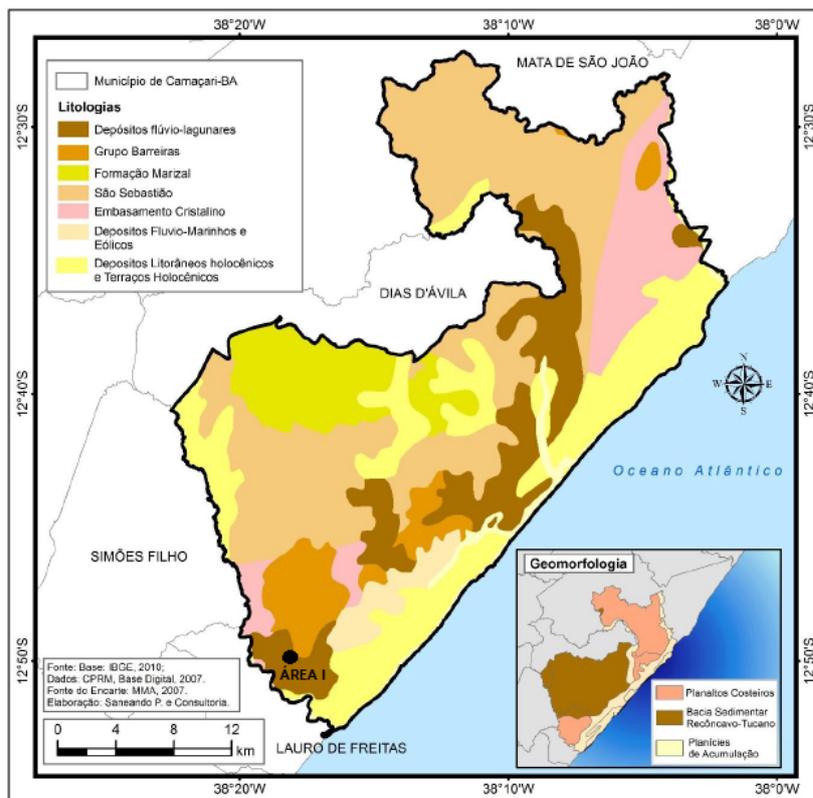


Figura 4.4 – Domínios Litoestatigráficos do município de Camaçari. Em destaque no mapa, a Área I (CAMAÇARI, 2015).

- **Embasamento Cristalino:** O embasamento cristalino encontrado na orla oceânica é constituído de rochas essencialmente granulíticas, ácidas e básicas. Estas rochas estão intensamente alteradas, devido ao intemperismo químico preponderante da área.

Nas região próxima do Rio Pojuca, observam-se as melhores exposições destas rochas, nas quais é possível observar a influência de fraturas e falhas importantes sendo localmente atravessados por intrusões básicas, pegmatitos e aplitos (CAMAÇARI, 2015).

- **Formação São Sebastião** As rochas da Formação São Sebastião foram datadas do Cretáceo Inferior. É composta por arenitos grossos a finos, brancos e amarelo-avermelhados, friáveis, feldspáticos, intercalados com argilas siltíticas. Estratificadamente sobrepõe-se de forma concordante ao Grupo Ilhas e é recoberto pelas Formações Marizal e Barreiras (SEABRA, 2011).

- **Formação Marizal:** Segundo LIMA e VILAS BOAS (1994), os conglomerados aflorantes na região de Camaçari-BA, pertencentes à porção basal da Formação Marizal (Cretáceo Inferior), estão posicionados discordantemente acima da Formação São Sebastião, algumas vezes com contato bem demarcado, que pode ocorrer sob a forma de crostas ferruginosas contínuas, com cerca de até 3,0cm de espessura.

- **Grupo Barreiras:** O Grupo Barreiras ocorre ao longo do litoral brasileiro estendendo-se desde o Amapá até o Rio de Janeiro, de ocorrência quase contínua e de significativa regularidade geomorfológica (ARAI, 2006). É composto predominantemente por arenitos vermelhos e amarelados, contendo leitos de argila de cores variadas como vermelho, branco e amarelo, maciças ou laminações paralelas, ocorrendo ainda algumas lentes cascalhosas.

- **Depósitos Litorâneos Holocênicos:** Referem-se a sedimentos predominantemente quartzosos, friáveis e facilmente transportados pelo vento quando não há cobertura vegetal. Quando há cobertura vegetal, ocorre a fixação das dunas (CAMAÇARI, 2015).

- **Depósitos Flúvio-Lagunares:** De origem fluvial e marinha, esses sedimentos ocorrem ao longo dos rios Joanes, Capivara, Grande e Jacuípe, sobretudo em suas desembocaduras e nas lagoas e córregos localizados ao longo da costa atlântica. São compostos por areia e silte argilosos ricos em matéria orgânica. Esses detritos orgânicos acumulam-se devido ao remanejamento dos sedimentos marinhos, devido à ação de marés e correntes marinhas (CAMAÇARI, 2015).
- **Terraços Holocênicos:** São representados por cordões litorâneos que formam uma extensa faixa que vai de Ipitanga até a foz do Rio Pojuca. Apresentam largura variável, entre 20 e 300m. São essencialmente arenosos contendo fragmentos de conchas e corais (CAMAÇARI, 2015).

Como pode ser visualizado na Figura 4.4, a Área I está localizada no Domínio Litológico dos Depósitos Flúvio-Lagunares, sendo a área de estudo localizada em uma zona alagada com água salobra com vegetação de mangue associada ao Córrego do Paranamirim.

4.1.3 Caracterização Geotécnica

Podemos classificar o solo desta área como sendo constituído de materiais transportados, de natureza detrítica, não consolidados, de granulometria heterogênea, argilosos, argilo arenosos e areno-argilosos, ricos em matéria orgânica (CAMAÇARI, 2015).

De acordo com o projeto executivo do aterro realizado pela empresa Envgeo e cedido à equipe geofísica pelo Consórcio Sistema BA-093, a investigação geotécnica na Área I consistiu de sondagens de simples reconhecimento (à percussão), ensaio de palheta (*Vane Test*) e coleta de amostras indeformadas.

Foram realizadas 6 sondagens SPT (As quais foram denominadas como "SP" seguido do número da estaca) pelas empresas Transgeo e GeoBahia, em pontos determinados pela Envgeo Engenharia e os ensaios de palheta foram realizadas pela UFBA (Laboratório de Geotecnia) em duas verticais, a primeira na estaca E-60 e a segunda na estaca E-64. Contudo, para este trabalho, serão analisados apenas os boletins das sondagens SPTs.

Os resultados dos ensaios penetrométricos indicaram a presença de um pacote de

espessura variável de solo argiloso compressível e de baixa resistência (solo mole) ao longo de todo o trecho do talvegue do córrego Paranamirim.

Próximo do córrego, o material tem textura mais arenosa, apesar de que, superficialmente, o material se apresenta com maior quantidade de matéria orgânica. No restante do trecho são observadas duas camadas distintas: a primeira, mais superficial, composta de matéria orgânica de cor preta, com espessura variável, e de baixa resistência. Comumente foram observados penetrações de 70 a 100cm apenas com o peso das hastes.

Sotoposta a essa camada, encontra-se um solo argiloso compressível de cor cinza, também com espessura variável, porém com número de golpes ligeiramente superior da ordem de 2 a 4 golpes, com passagem de penetração de 40 a 70cm para o peso das hastes.

4.1.4 Aquisição Geofísica

A aquisição geofísica foi realizada na área I nos dias 20 e 21 de outubro de 2016 e consistiu de seis caminhamentos elétricos no aterro implantado sobre a área de alagamento associada ao córrego Paranamirim. O nível do aterro no momento do levantamento dos perfis estava em torno de 6,0m acima do terreno encharcado. A Figura 4.5 mostra uma visão ampla do trecho do aterro.

O método geofísico usado foi o caminhamento com eletrorresistividade (CE) pois pretende-se investigar não só a variação vertical da resistividade, mas também, as suas variações horizontais. Este caminhamento emprega arranjo de eletrodos do tipo dipolo-dipolo, com espaçamento de 5m entre os eletrodos.

A opção por levantar perfis do tipo CE na direção longitudinal do aterro, deve-se ao fato de se poder atingir maiores comprimentos (210 m) e assim dispor os eletrodos com maiores separações na superfície e, conseqüentemente, investigar profundidades de até 22 metros.

O arranjo dipolo-dipolo realizou medidas com arranjos de eletrodos MN e AB separados de até oito vezes ($8 \times a$) com a separação padrão ($a = 5\text{m}$).



Figura 4.5 – Vista do aterro com o cabo que conecta o aparelho de eletrorresistividade aos eletrodos, os quais estão alinhados no sentido longitudinal da BA-093.

4.2 Área II

4.2.1 Localização Geográfica

A segunda área de estudo está localizada nas coordenadas $12^{\circ} 52' 31.8''$ S e $38^{\circ} 28' 40.4''$ W. Está situada entre a rua Amazonas (Travessa Amazonas) e a Avenida Afrânio de Peixoto, próximo à Praia Grande - Paripe (Figura 4.6).

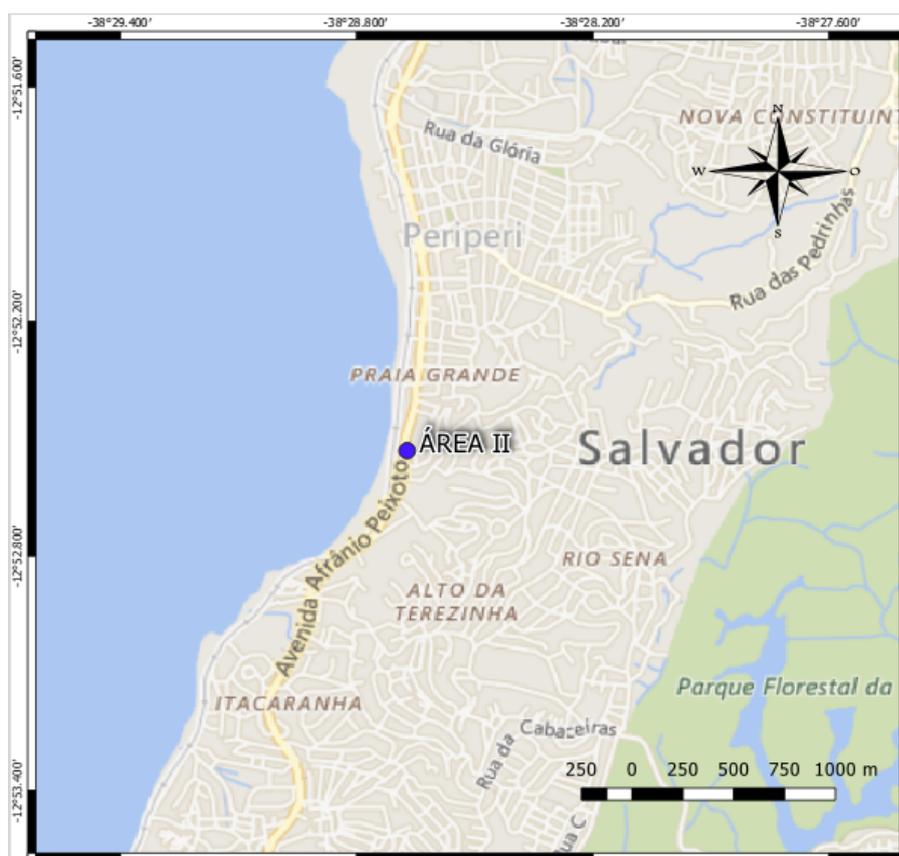


Figura 4.6 – Mapa do Subúrbio Ferroviário de Salvador com destaque para a Área II na rua Afrânio Peixoto.

4.2.2 Geologia Regional

Localizado entre os meridianos $38^{\circ} 40' W$ e $38^{\circ} 18' W$ e as latitudes $12^{\circ} 44' S$ e $13^{\circ} 01' S$, o Município de Salvador apresenta uma extensão territorial de cerca de 308 km^2 . A parte continental do município, que corresponde a cerca de 90% de todo o território, encontra-se implantada sobre dois sítios urbanos, denominados de Cidade Baixa e de Cidade Alta, separados fisicamente pela escarpa de falha geológica - Falha de Salvador - e delineados, respectivamente, pelas águas da Baía de Todos os Santos (BTS) e pelo Oceano Atlântico (VIEIRA *et al.*, 2005).

O conjunto de ilhas, no qual destacam-se as ilha dos Frades e de Maré, que corresponde aos 10% restantes do território municipal, situa-se na BTS a noroeste da Cidade Baixa, nas proximidades dos municípios de Madre de Deus e de Candeias, respectivamente (VIEIRA *et al.*, 2005).

Segundo Barbosa e Dominguez (1996), a cidade de Salvador é caracterizada por um conjunto litológico representado por três domínios principais:

1. **Bacia Sedimentar do Recôncavo**, que faz parte do contexto Rift Recôncavo e onde ocorre rochas sedimentares Mesozóicas do tipo conglomerados, representados pela Formação Salvador e, arenitos e folhelhos, representados pela Formação Pojuca do Grupo Ilhas. De forma geral os bairros do subúrbio ferroviário, cidade baixa (península itapagipana, calçada/mares, comércio) e ilhas estão edificadas sobre os sedimentos da bacia do Recôncavo. Uma pequena parte desses bairros, situados ao pé da escarpa da Falha de Salvador foram erguidos sobre solos de alteração do embasamento cristalino.
2. **Alto de Salvador ou Maciço de Salvador**, representado por associação de rochas cristalinas, com arranjo estrutural complexo e paragêneses minerais de metamorfismo de alto grau, genericamente, chamadas de "granulitos". Essas rochas metamorfolizadas, graníticas e basálticas compõem o embasamento cristalino arqueano-paleoproterozóico, o *horst* de Salvador de orientação estrutural e proveniência do tectonismo que originou a falha geológica que leva o mesmo nome da cidade;
3. **Planície Litorânea ou Margem Costeira Atlântica**, faixa plana onde se destacam os pequenos morros arredondados, modelados por flutuações climáticas e do nível do mar, formada por depósitos sedimentares Terciários da Formação Barreiras e Depósitos inconsolidados do Quaternário (sedimentos com características distintas, compartimentadas nos subdomínios dunas, cordões litorâneos e areias de praia).

Os domínios citados acima têm sido alvos de pesquisas e subdivisões de seus constituintes ao longo do tempo, principalmente os domínios 1 e 3. Este fato pode ser verificado nos estudos geológicos-geotécnicos apresentados no PDE GEOHIDRO (2004) que, mais recentemente, subdividiu esses domínios, inclusive o domínio 2, em unidades informais hierárquicas que representam ambientes com propriedades geológicas, geomorfológicas e geotécnicas homólogas (Figura 4.7).

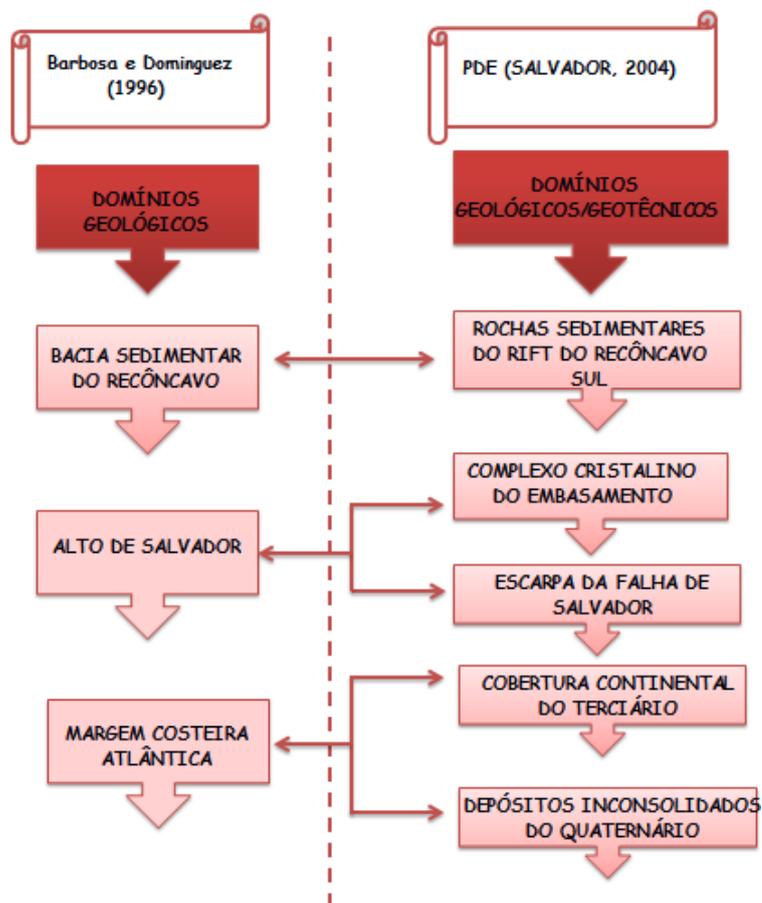


Figura 4.7 – Esquema comparativo dos domínios geológicos de Salvador segundo Barbosa e Dominguez (1996). Adaptado de SILVA (2005).

4.2.3 Geologia Local

Segundo o Mapa Geológico Regional do Plano Diretor de Encosta (PDE), a área de estudo se encontra inserida no Domínio das Rochas Sedimentares Cretáceas do Rift do Recôncavo Sul, na Formação Pojuca, mais especificamente entre o Bloco do Subúrbio Ferroviário e o Bloco da Ilha do Frade (Figura 4.8).

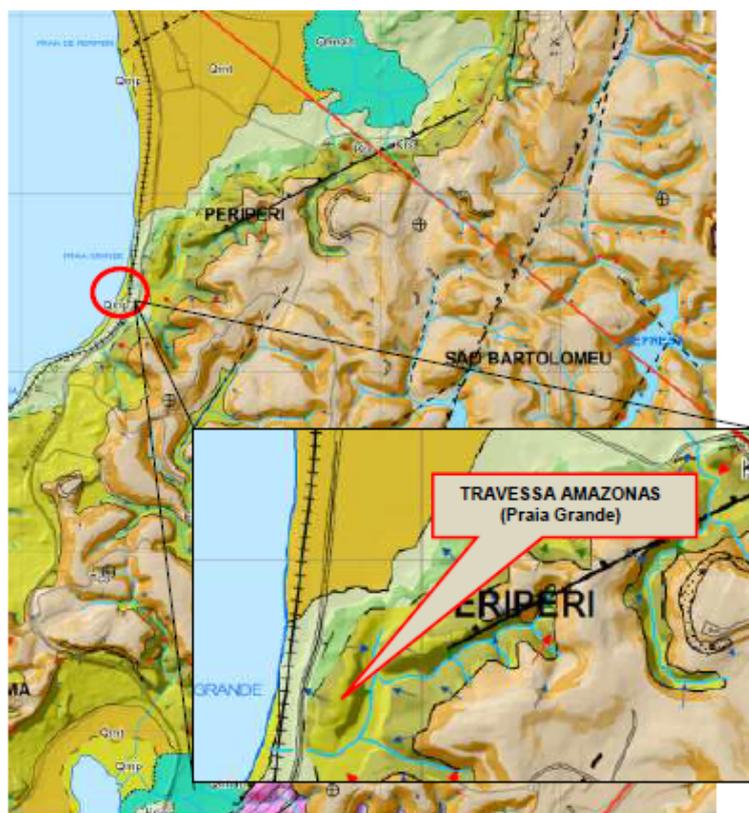


Figura 4.8 – Localização da área em estudo no Mapa Geológico Regional, com base nos mapas temáticos do Plano Diretor de Encostas (PDE) (GEOHIDRO, 2004).

Segundo GEOHIDRO (2004), no Bloco do Subúrbio Ferroviário, a Formação Pojuca comporta um arranjo interestratificado de siltitos argilosos de cor cinza esverdeados com espessuras variáveis complementado por raras intercalações de arenitos médios a finos ou pela presença localizada de corpos individualizados de arenito médio com estrutura maciça interpostos em folhelhos ou siltitos.

Por consequência do intemperismo, principalmente físico (associado a períodos de menor e maior pluviosidade típicos da região), sobre os folhelhos laminados e siltitos argilosos que compõem o bloco, formou-se o solo residual de textura fina conhecido regionalmente como massapê. Esse solo apresenta-se na maior parte do ano na condição não saturada, ocupando cerca de 20% da área da Bacia do Recôncavo (SIMÕES; Costa Filho, 1981).

Simões e Costa Filho (1981) relataram que as primeiras contribuições a respeito ao estudo de massapês estiveram associadas com as dificuldades na implantação da BR-324 entre Salvador e Feira de Santana. Destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Sobral

(1956); Arimathea (1958), Sobral e Menezes (1962) e Presa (1980).

A característica principal do Massapê é apresentar expansão e retração quando varia a sua umidade e grau de saturação. É bastante conhecido que, esses solos potencialmente expansivos, tem geralmente uma fração argilosa significativa a qual é formada por uma porcentagem importante de minerais argílicos do grupo montmorilonita. Ambas características tem reflexo na sua plasticidade. Também influenciam nas características expansivas do solo a Capacidade de Troca Catiônica (CTC), o tipo do cátion e a concentração eletrolítica (SIMÕES; Costa Filho, 1981).

Fonseca (1968) encontrou nas frações argila das Formações Candeias, Ilhas e São Sebastião porcentagens significativas de montmorilonita e minerais argílicos de camada mista (ilita-montmorilonita).

Simões e Costa Filho (1981) coletaram 29 amostras de massapê de diversos pontos do Recôncavo Baiano realizando, para cada uma delas, análises químicas, mineralógicas e de caracterização geotécnica. A caracterização qualitativa e semi-qualitativa dos minerais argílicos presentes nas frações silte e argila das amostras de massapê foi feita por difração de raio-x e análise química. Os resultados confirmaram dados encontrados anteriormente por Fonseca (1968), praticamente todas as amostras apresentaram teores significativos de montmorilonita e/ou ilita-montmorilonita, apesar do mineral predominante ser em muitos casos, a caulinita. Deve-se notar que a ilita encontrada pode ser proveniente da transformação da montmorilonita em presença do clima úmido como existente no Recôncavo Baiano.

Segundo trabalhos apresentados por Sobral (1956); Simões e Costa Filho (1981), a expansão livre do Massapê está na faixa de 12,3% a 40,3% a depender da porcentagem de montmorilonita na fração argila, enquanto que a pressão de expansão varia de 1,39 a 2,26 kg/cm^3 . Esses valores são extremamente altos e por consequência desse fato, os problemas de trinca das estruturas assentadas sobre este solo são tão rotineiros.

O Bloco da Ilha do Frade se caracteriza pela ocorrência de conglomerados polimíticos desorganizados contendo seixos e matações de rochas do embasamento, sustentados por matriz arenosa que em resposta ao intemperismo desenvolve um manto de solo avermelhado com textura francamente areno-siltosa (VIEIRA *et al.*, 2005).

4.2.4 Caracterização Geotécnica

A crista da encosta faz parte da Travessa Amazonas (onde pode ser observada a existência de edificações de até dois pavimentos) e o pé está voltado para a Avenida Afrânio Peixoto. A referida encosta apresenta uma extensão de aproximadamente 120 metros e possui um histórico de deslizamentos prévios.

O primeiro evento de instabilidade registrado data de maio de 2015. Nesta ocasião parte da Travessa Amazonas foi comprometida. Posteriormente, em maio de 2017, em função das chuvas que atingiram a cidade de Salvador ocorreu outro escorregamento que praticamente fez desaparecer a rua, atravessando uma das edificações localizadas nesta Travessa (Figura 4.9).



Figura 4.9 – Local onde ocorreu o deslizamento. Em destaque, a crista da superfície de escorregamento.

Na etapa do projeto básico deste local já tinham sido executadas 9 SPTs, SP-101 a SP-107, SP-100 e SP-120. Todas acusaram a existência de uma camada de aterro, de espessura variando entre 0,50m e 4,00m, composta por um material de baixa resistência (areia argilo siltosa).

Algumas sondagens indicaram a aparente ocorrência de solo resultante da intemperização do folhelho, solo argilo-siltoso de cor esverdeada, regionalmente conhecido como massapê. Em todas as sondagens citadas anteriormente a resistência à penetração aumentou com a profundidade até atingir o estrato impenetrável.

Posteriormente, no mês de maio de 2017, foi executada uma nova campanha de investigação, onde foram realizadas 09 novas SPTs, numeradas como SP-201 a SP-209. Três delas foram realizadas na crista da encosta, aproximadamente à cota 25,00m e as outras seis restantes no platô localizado no pé do talude.

A realização destas novas sondagens possibilitou uma melhor definição da distribuição das camadas que ocorrem na área de intervenção, bem como o topo do estrato impenetrável, e principalmente, o topo da camada correspondente ao solo residual de folhelho (Massapé). Trincheiras foram também executadas no sentido perpendicular à crista da encosta com o mesmo propósito (Figura 4.10).

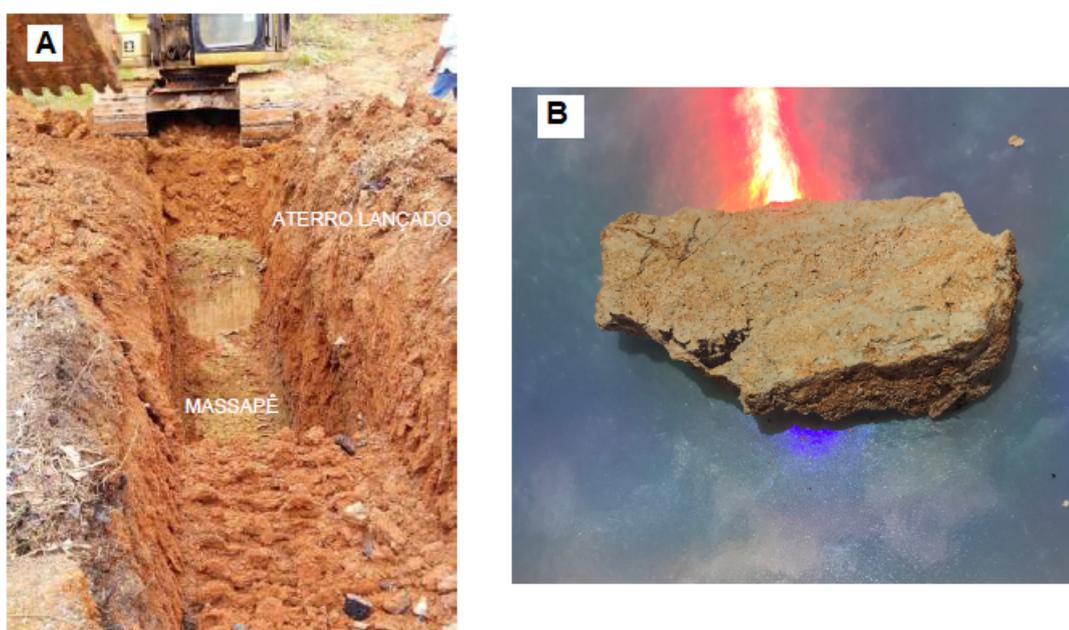


Figura 4.10 – (a) Trincheira aberta no talude evidenciando a presença de material de baixa resistência apoiado no estrato residual de folhelho, massapé. (b) Amostra de folhelho de cor esverdeada encontrado no local.

De uma forma geral, foi possível definir a existência de uma camada de aterro de espessura variando entre 0,5m a 4,0m composta por um material de baixa resistência, de composição variando de silte arenoso com argila a silte argiloso.

Na face da superfície de ruptura do deslizamento, as sondagens identificaram a presença de um material correspondente ao aterro lançado, denominado de areia argilo siltosa.

Abaixo dessa espessa camada de material lançado, foi detectada a ocorrência do solo massapê (argila siltosa) e, sotoposto a esse solo, foi verificada a ocorrência de folhelho alterado/decomposto até chegar ao estrato impenetrável. Essas informações foram usadas para gerar o perfil geotécnico associado, como mostra a Figura 4.11.

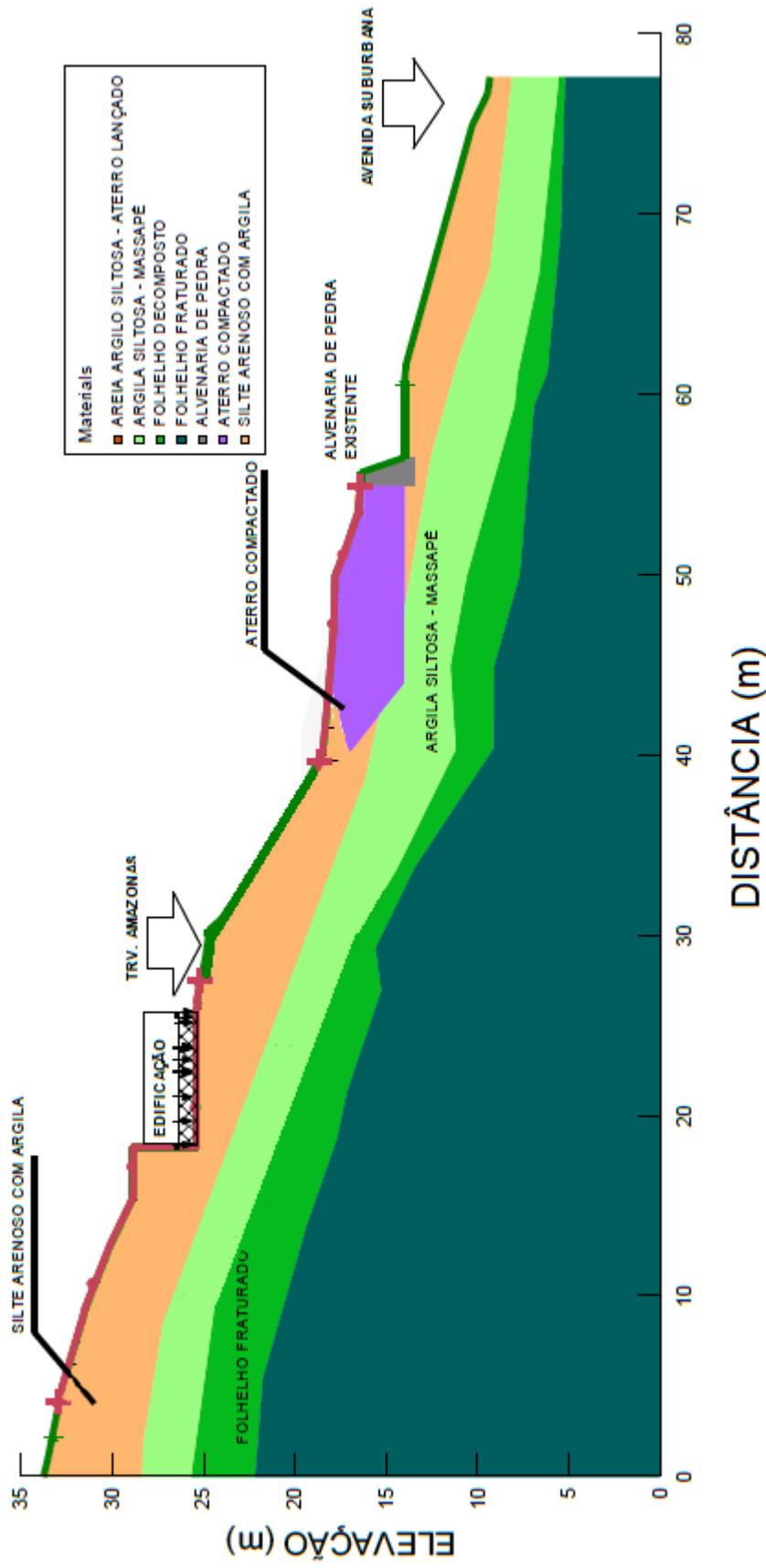


Figura 4.11 – Perfil geotécnico na encosta, destacando a Travessa Amazonas (Área de estudo) e os estratos, bem como suas composições e profundidades. Fonte: ENVgeo

4.2.5 Aquisição Geofísica

No dia 8 de dezembro de 2017 foi realizada a aquisição geofísica da Travessa Amazonas. O método geofísico utilizado foi o Eletrorresistividade com a técnica de Caminhamento Elétrico. Foram realizados 02 Caminhamentos Elétricos (CE): Um paralelo à crista da encosta, passando pelo local onde foram realizadas as sondagens SP-201, SP-202 e próxima à SP-203 e, outro localizado no platô localizado no pé do talude, passando pelas sondagens SP-204, SP-205 e SP-206/SP-206 A (Figura 4.12).

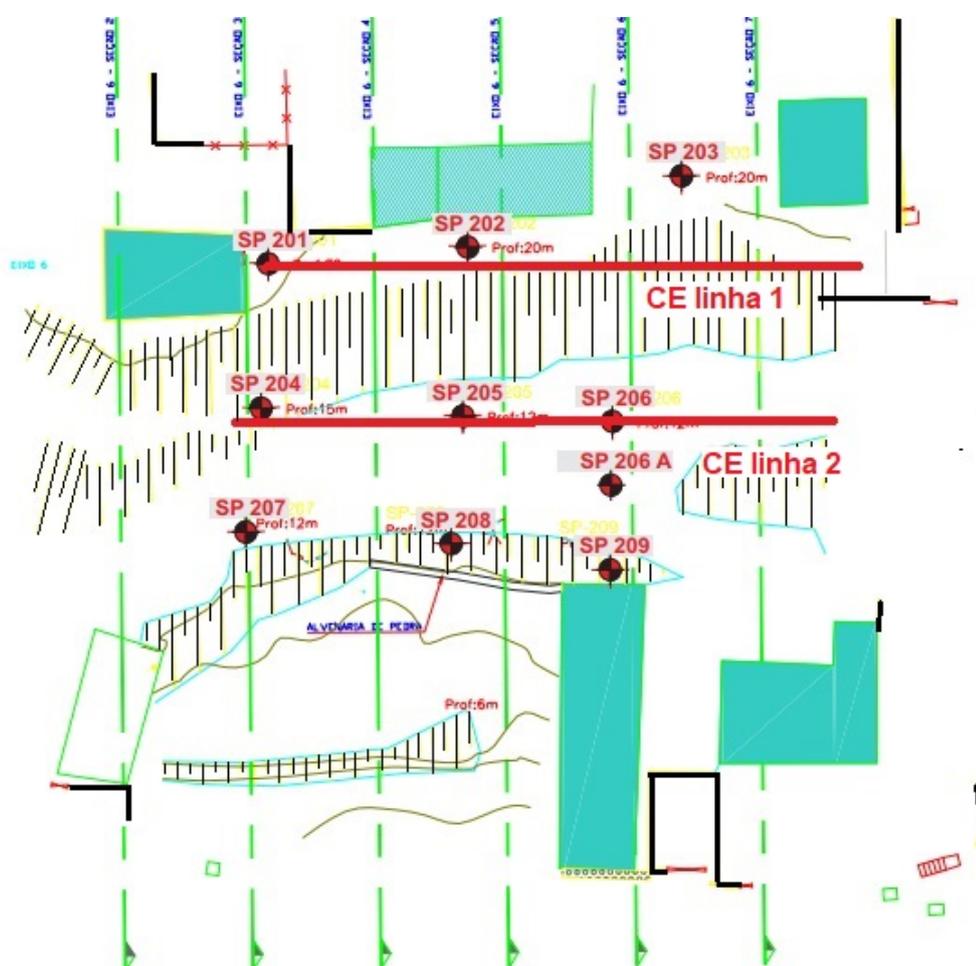


Figura 4.12 – Croqui de localização das SPT destacando o posicionamento dos caminhamentos elétricos no talude.

O arranjo utilizado foi o dipolo-dipolo e o espaçamento entre os eletrodos foi de 2,5m. Os caminhamentos tiveram, aproximadamente, 42,5m de extensão sendo utilizados 20 eletrodos em cada uma das linhas, perfazendo um número total de 120 medidas, cada uma.

Em ambos os caminhamentos foram atingidos 9 níveis de investigação chegando a, aproximadamente, 14.0m de profundidade.

Na Figura 4.13 é possível identificar o processo de aquisição dos Caminhamentos Elétricos Linha 1 (na crista do talude) e Linha 2 (no platô).



Figura 4.13 – (A) Procedimento do CE linha 1 sendo montado na crista do talude (B) Procedimento do CE linha 2 sendo montado no platô.

4.3 Área III

4.3.1 Localização Geográfica

A área de estudo III (Figura 4.14) está localizada nas coordenadas $12^{\circ} 57' 49.89''$ S e $38^{\circ} 30' 07.44''$ O e se constitui como uma das mais famosas encostas da cidade de Salvador, tanto pelo seu histórico de acidentes (que remetem ao período colonial e à ocupação da cidade), quanto pelo seu potencial associado a novos deslizamentos.

O local está situado no bairro de Santo Antônio além do Carmo, centro histórico de Salvador e na encosta existe uma comunidade identificada como Chácara de Santo Antônio.

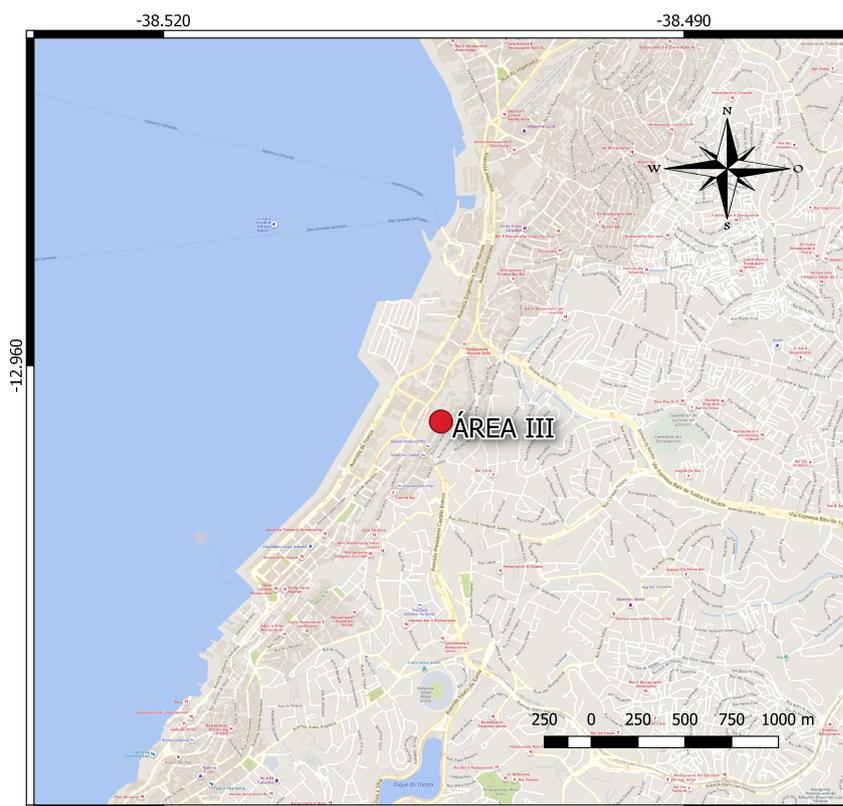


Figura 4.14 – Mapa do Centro Histórico de Salvador com destaque para a Área III, situada no bairro de Santo Além do Carmo. Fonte: Google Earth.

A encosta se encontra na escarpa de Falha de Salvador, compreendendo a extensão aproximada entre o Forte da Capoeira e ao túnel Américo Simas (Figura 4.15).



Figura 4.15 – Mapa do Centro Histórico de Salvador com destaque para a Área III, situada no bairro de Santo Além do Carmo. Fonte: Google Earth

A ocupação do local ocorreu de maneira desordenada, existindo atualmente residências de baixo padrão econômico e elevada vulnerabilidade estrutural, sendo disseminadas de maneira dispersa por toda encosta. Uma parcela considerável destas residências são barracos constituídos com restos de materiais reaproveitados, tais como: madeiras, papelão, plásticos, etc (GEOENG, 2014).

4.3.2 *Histórico de Deslizamentos*

O histórico de deslizamentos desta encosta remonta o período de ocupação da cidade de Salvador até o último acidente em 2011, o que evidencia o quanto os problemas encontrados neste local são antigos e sem soluções eficazes implantadas até o momento.

Durante a ocupação de Salvador, na época de sua fundação, as áreas de encosta da Falha de Salvador foram gradativamente ocupadas devido à sua importância estratégica e defensiva, ao proporcionar uma observação permanente da Baía de Todos os Santos, que precisou ser defendida do ataque de invasores (ELBACHÁ, A.T; CAMPOS, L.E.P; BAHIA, 1992).

Os primeiros problemas relacionados com instabilidade de encostas em Salvador datam do século XVI como foi relatado por emissários enviados pela Coroa Portuguesa para o Brasil, a respeito de grandes escorregamentos na Escarpa da Falha de Salvador (FARAH, 2003).

Nesta época as autoridades locais adotaram soluções paliativas, visando minimizar o risco encosta abaixo, sem maiores preocupações com a condição da encosta acima. Tal solução foi a construção de barreiras físicas, visando impedir que os escravos lançassem detritos nas encostas, sem promover melhorias nos sistemas de coleta e destinação do lixo ou de efluentes sanitários, o que, além de diminuir o risco, poderia promover a melhoria da qualidade de vida de todos, indistintamente (FARAH, 2003).

O problema foi agravado devido ao aumento gradual das ocupações desordenadas das encostas, o que colaborou também para a conformação de cortes e aterros inadequados e o surgimento de pontos de lançamento concentrado de esgoto primário e água servida despejadas ininterruptamente na encosta, devido à falta de infra-estrutura urbana (GEOENG, 2014).

Existem registros de um grande deslizamento de terra nas proximidades do local de estudo, ocorrido em 27 de abril de 1971, após três dias de chuvas intensas e prolongadas que acumularam uma precipitação da ordem de 500 mm. As principais consequências de tal deslizamento foram a destruição de diversas residências e a interdição temporária do Túnel Américo Simas (SILVA, 2006).

Em decorrência de chuvas torrenciais que caíram na cidade em 08 e 09 de novembro de 2011, com registro de quase 200 mm em 48 horas, diversos pontos da cidade foram atingidos por deslizamentos de encostas, dentre estes o mais grave: o da Chácara de Santo Antônio, onde o deslizamento provocou o desabamento de 02 imóveis, ficando 103 condenados (GEOENG, 2014).

Foram implementadas situações sociais mitigadoras, logo após o último acidente, tais como: isolamento temporário da área, interdição de acessos e imóveis comerciais adjacentes, abrigo provisório dos moradores impedidos de retornar temporariamente às suas residências, e demolição dos imóveis ameaçados de desabamento. Entretanto, até o presente momento não foram implantadas soluções definitivas de engenharia para os problemas de instabilidade desta encosta (GEOENG, 2014).

4.3.3 Geologia Regional

A caracterização geológica da área foi realizada com base na análise e interpretação de mapas geológicos do local GEOHIDRO (2004) em escala de 1:250.000 (Figura 4.16), complementada por inspeções de campo efetuadas pela empresa GeoENG para confirmação dos dados disponíveis na literatura.

Na área de risco foram detectados três Domínios Geológicos, a saber:

- **Coberturas Sedimentares Terciárias da Formação Barreiras:** Os solos destas coberturas apresentam textura tipicamente arenosa e coloração amarelada, cuja resistência pode variar significativamente, dependendo do grau de saturação do terreno. É neste Domínio que acontece a maioria dos deslizamentos de terra e erosões. Tais solos sedimentares recobrem os solos residuais subjacentes, descritos a seguir (GEOENG, 2014).



Figura 4.16 – Geologia Regional, em escala 1:250.000, mostrando que na área de estudo o Domínio Geológico Preponderante é associado à Escarpa de Falha de Salvador. Adaptado de (GEOHIDRO, 2004).

- **Solos residuais do Embasamento Cristalino de Salvador:** Estes solos residuais comumente apresentam textura com matriz argilosa e coloração variegada, com tom predominantemente avermelhado. Os solos íntegros do manto de intemperização do Embasamento Cristalino costumam apresentar boas propriedades geotécnicas em termos de resistência ao cisalhamento. O ganho de resistência destes solos é associado à cimentação provocada pela precipitação dos óxidos de ferro e hidróxidos de alumínio (laterização), o que garante fortes ligações químicas entre os grãos dos solos não saturados (resultando em forças coesivas aparentes). Embora os solos intactos apresentem bom comportamento geotécnico, deve ser considerada a possibilidade de ocorrência de planos preferenciais de ruptura condicionados por estruturas reliquias, capazes de apresentar parâmetros de resistência inferiores aos da massa de solo intacto (GEOENG, 2014).
- **Produtos da Escarpa de Falha de Salvador:** Durante séculos foram palco de diversos acidentes, que ceifaram muitas vidas e causaram danos materiais. Ainda hoje, na região da Avenida Jequitaia e Comércio a encosta rochosa com seu manto de alteração oferecem alto grau de risco pra quem vive ou trabalha no sopé. Este compartimento geológico-geotécnico é composto por rochas do Embasamento Cristalino, Falha de Salvador e rochas sedimentares da Bacia do Recôncavo. Sob aspecto morfológico, é constituído por uma encosta ou escarpa esculpida a partir

da erosão do bloco alto da Falha de Salvador com a linha de cumeada contínua com orientação geral 035° - 215° , e vertentes com declives superiores a 150%. Na parte superior da escarpa da falha ocorrem solos residuais argilosos ou argilo-siltosos, por vezes sustentando matacões, e/ou exposições da rocha intensamente fraturada. Vários trechos da vertente acomodam colúvios e/ou solos transportados, dispostos sobre rocha cristalina muito fraturada ou solos residuais mais lixiviados. O maciço rochoso que sustenta o relevo apresenta um sistema de fraturas constituído de pelo menos 5 famílias que segmentam a rocha formando um padrão de descontinuidades inter cruzadas com predominância das fraturas com mergulho alto (GEOHIDRO, 2004).

A água superficial de chuva ou lançada através de um sistema de esgotamento deficiente, muito comum nas comunidades fixadas no topo da encosta, infiltra no terreno e se mistura com a água subterrânea que circula através das fraturas do maciço cisalhado, elevando o índice de saturação dos solos ou colúvios que recobrem a vertente (VIEIRA *et al.*, 2005).

De acordo com GEOHIDRO (2004), a conjugação destes fatores naturais estabelece para este ambiente um quadro forte de susceptibilidade para a ocorrência de deslizamentos de solos e quedas de blocos de rocha, com as seguintes características cinemáticas:

- descolamento ao longo da interface dos colúvios;
- deslocamento da interface rocha alterada/solo contendo blocos;
- ruptura não circular em fatias na rocha alterada;
- ruptura circular nos solos, no saprólito e no próprio colúvio;
- ruptura em cunha ou tombamento nos taludes rochosos

No âmbito dos taludes rochosos, a combinação entre as propriedades geométricas do talude e do sistema de fraturas define uma maior susceptibilidade para deslizamentos de blocos por ruptura em cunha, muito embora exista também o condicionamento necessário para eventos de tombamento e deslizamento planar (GEOHIDRO, 2004).

4.3.4 Caracterização Física do Local

A caracterização física do local foi feita a partir de observações das visitas técnicas realizadas pela equipe da GeoENG e foram retiradas do Anteprojeto de Engenharia (GEOENG, 2014).

O acesso ao local pode ser feito facilmente a partir da crista da encosta, pelo Largo do Santo Antônio.

Em diversos pontos da encosta foram conformados desníveis bruscos entre as vias de acesso e as entradas das residências, dificultando a circulação dos moradores. A interligação entre as vias existentes é feita por meio de vielas e becos estreitos, em piso não pavimentado, com declividade muito acentuada, superfície irregular e sem corrimão/guarda-corpo apropriado (Figura 4.17). Em alguns locais foram identificadas escadarias que conformam degraus no próprio terreno, sem nenhum tipo de pavimentação. Embora em alguns pontos existissem escadarias pavimentadas, estas se encontravam em péssimo estado de conservação.



Figura 4.17 – (a) Acessos precários e edificações estruturalmente vulneráveis (barracos de madeira). (b) Vista geral da encosta, mostrando as edificações em áreas de risco muito alto. Observa-se nitidamente neste local edificações fora de prumo (GEOENG, 2014).

Foram identificadas por toda a área intervenções antrópicas feitas no terreno pelos próprios moradores, objetivando a implantação das habitações locais, por meio de cortes a montante e aterros lançados a jusante. As referidas movimentações de terra, geralmente executadas sem critério técnico, criam inúmeros mecanismos predisponentes para rupturas, aumentando a condição de instabilidade local da encosta e criando risco inclusive para as edificações adjacentes às intervenções realizadas

A vegetação que cobre a encosta é constituída basicamente por espécies arbustivas, capim alto (tipo Colonião), árvores de médio e grande porte e bananeiras. Em alguns pontos foram observadas falhas na vegetação, expondo as superfícies destes taludes às intempéries e conseqüente infiltração da água pluvial.

Como já é conhecido, as bananeiras interferem negativamente na estabilidade das encostas pelo fato de serem capazes de acumular água próximo às suas raízes, umedecendo o terreno. Este tipo de vegetação é indesejável nestes locais pois, de um modo geral, contribuem para o aumento da sobrecarga na encosta e infiltração de água no terreno, tendo como consequência saturação e perda de resistência dos taludes em solo.

Existem residências na encosta não contempladas por sistema de esgotamento sanitário. Embora o local seja servido de água encanada e sistema de esgoto do Projeto Bahia Azul, foram identificados pontos de lançamento de concentrado de esgoto e águas pluviais na superfície da encosta. Grande parte das tubulações domiciliares encontram-se furadas e com vazamentos, aumentando o encharcamento do terreno e a saturação do solo, prejudicando a resistência ao cisalhamento deste substrato.

A ocupação desordenada em áreas sem rede de drenagem superficial e sem manutenção de cobertura vegetal adequada, nas posições topográficas mais críticas, resulta em desequilíbrio do balanço natural entre a infiltração e o escoamento superficial. Desta maneira, o terreno é re-esculpido pelo fluxo desorganizado da água, agravando sensivelmente as condições de estabilidade e aumentando o risco de instabilizações, especialmente nos eventos de precipitações intensas e prolongadas.

Na crista da encosta foram identificadas edificações antigas, voltadas para a rua Direita do Santo Antônio que, possivelmente, são tombadas por órgãos do patrimônio histórico. Tais residências, embora sejam de alto padrão econômico, também podem apresentar vulnerabilidade estrutural, diante da localização em relação à encosta.

Em zonas de baixada o risco identificado é associado à possibilidade de soterramento de edificações e vias de acesso, devido a ruptura de taludes a montante. Secundariamente, o risco geotécnico nessas regiões também é associado à ocorrência de enchentes e inundações nas áreas de baixada.

4.3.5 Caracterização Geotécnica

De acordo com o anteprojeto de engenharia realizado pela empresa GeoENG e cedido à equipe geofísica, a investigação geotécnica consistiu de 15 (quinze) SPTs no terreno investigado, solicitadas até a profundidade da superfície impenetrável à percussão.

Os resultados das sondagens indicaram uma camada superficial inconsistente, saturada, de baixa resistência, classificada como sendo composta por provável aterro de textura silto-arenosa, com argila, de coloração marrom a marrom escuro apresentando pedregulhos, restos vegetais e entulho e N_{SPT} que 5. (Figura 4.18).



Figura 4.18 – Solo superficial, inconsistente e saturado, classificado como sendo um provável aterro (GEOENG, 2014).

Subjacente a essa camada, ocorrem solos residuais (maduro e jovem) de texturas que vão de silte argiloso com areia a silte arenoso com argila, de coloração predominantemente marrom. Apresentando pedregulhos e restos de matéria orgânica (raízes). A resistência é crescente com a profundidade, apresentando valores de N_{SPT} entre 5 e 15 golpes (Figura 4.19).

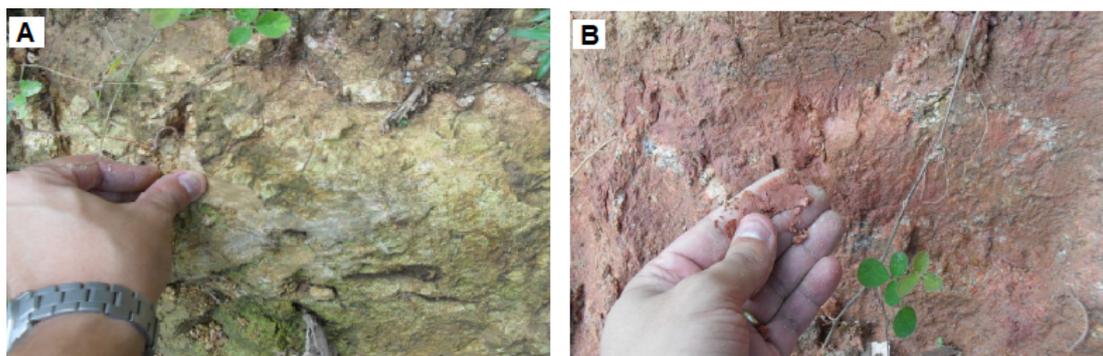


Figura 4.19 – (A) Aspecto do solo residual maduro abaixo da camada superficial de provável aterro. (B) Aspecto do solo residual jovem, ocorrente entre o solo residual maduro e o solo de alteração de rocha (GEOENG, 2014).

Abaixo desta camada, foram detectados solos de alteração de rocha, de textura silto-arenosa, de coloração cinza, apresentando pedregulhos e fragmentos de rocha, com N_{SPT} maiores que 15 golpes (Figura 4.20).



Figura 4.20 – Aspecto da rocha muito fraturada, alterada e pouco coerente, identificada num corte subvertical realizado por moradores (GEOENG, 2014).

As informações sobre as camadas de solo foram usadas para gerar perfis geotécnicos da situação, como mostrado na Figura 4.21. Foram discutidos apenas 2 perfis do total de 6, pois estes aqui apresentados correspondem à posição espacial dos dois caminhamentos elétricos levantados.

O nível d'água do lençol freático não foi identificado nas investigações realizadas. Entretanto, observa-se a exsudação de água em alguns pontos localizados no pé da

encosta. Observa-se também pontos de vazamentos de água provenientes de ligações domiciliares irregulares e de esgoto sobre a superfície da encosta.

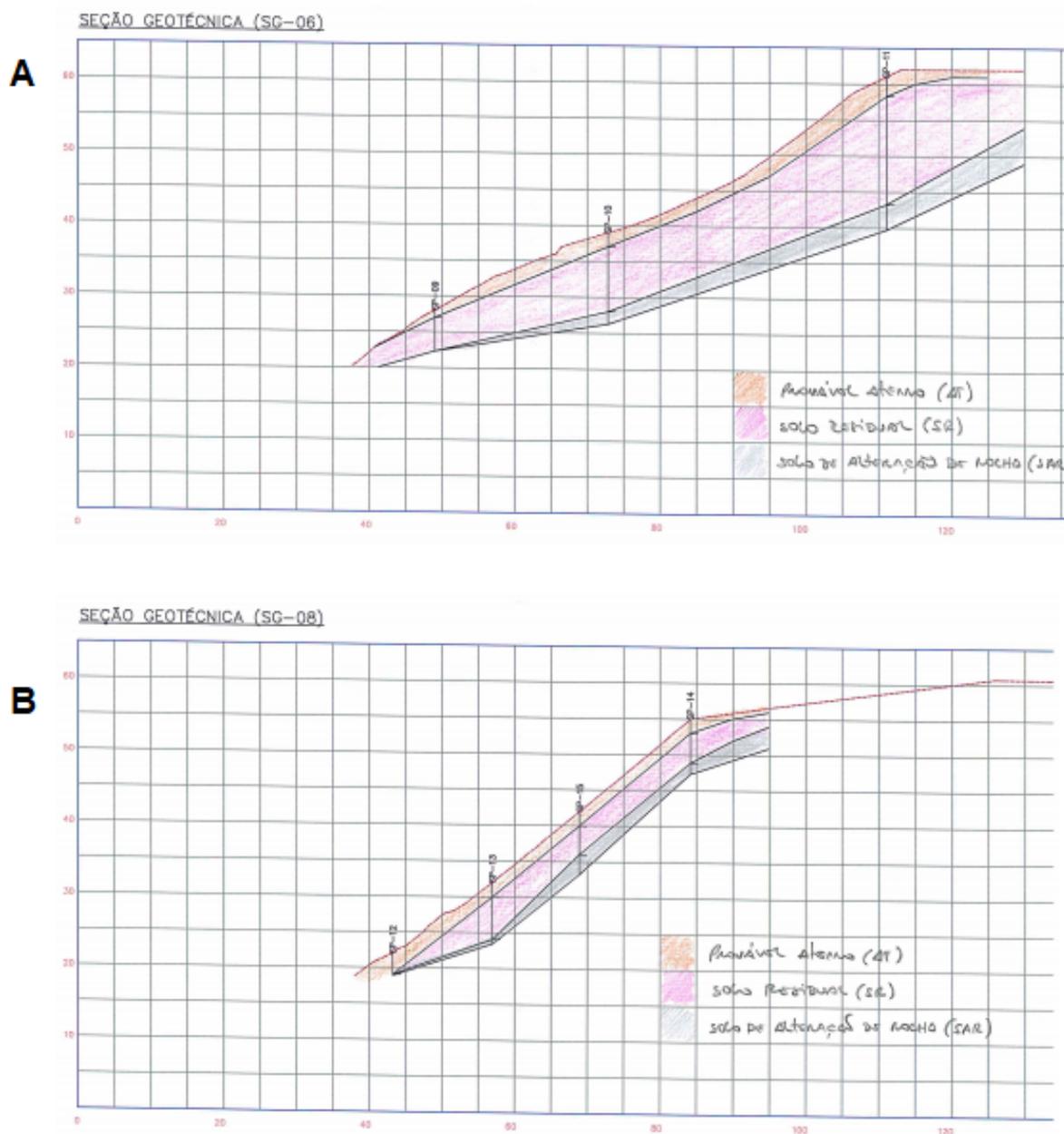


Figura 4.21 – (a) Perfil geotécnico associado do terreno, baseado em sondagens próximas da Linha 01. (b) Perfil geotécnico associado do terreno, baseado nas sondagens próximas a Linha 03 (GEOENG, 2014).

4.3.6 Aquisição Geofísica

No dia 21 de novembro de 2018 foi realizada a aquisição geofísica na encosta do Capistrano no bairro do Santo Antônio Além do Carmo. O método geofísico utilizado foi o de eletrorresistividade com a técnica de Caminhamento Elétrico (CE). Foram realizados 02 Caminhamentos Elétricos perpendiculares à encosta: Um localizado a partir da mureta da Praça (CE 01) e outro a partir de um quintal de uma casa (CE 03) (Figura 4.22).

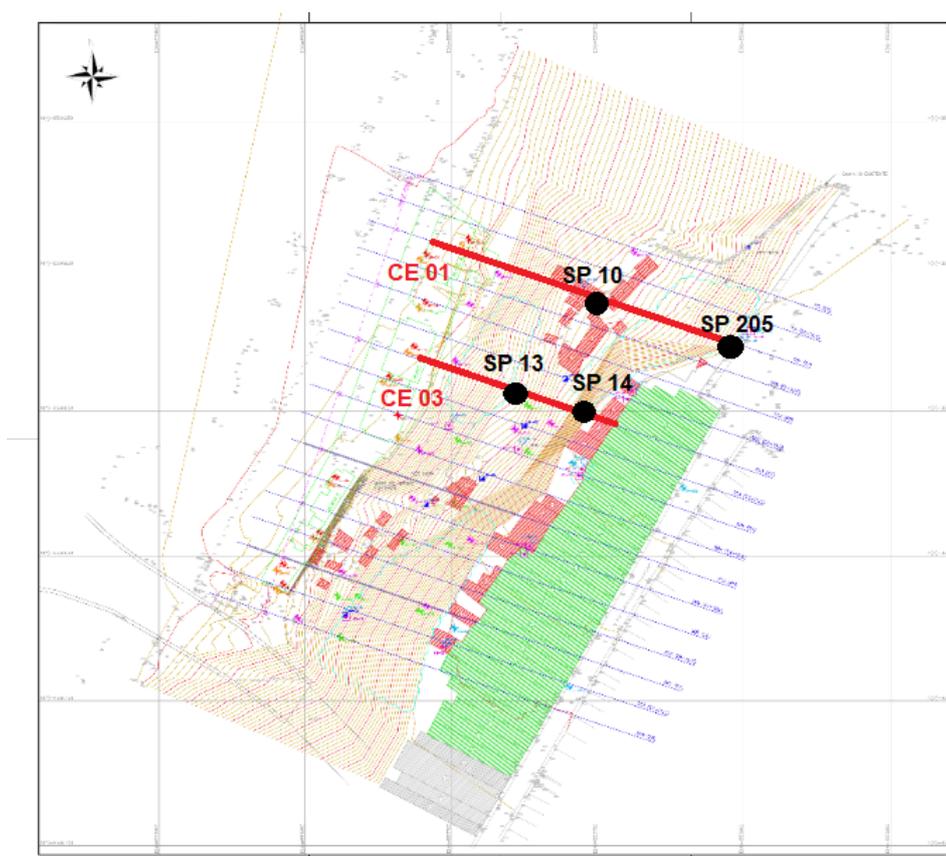


Figura 4.22 – Croqui de localização dos furos de sondagem SPT destacando o posicionamento dos caminhamentos na encosta (GEOENG, 2014).

Foram realizadas várias campanhas de sondagens em toda encosta do Capistrano nos anos de 2014, 2017 e 2018. No entanto, só serão analisadas as SPTs que estão mais perto dos caminhamentos elétricos realizados, como é mostrado na Figura 4.22.

As sondagens SP 10, SP 13 e SP 14 foram realizadas em março de 2014, enquanto a sondagem SP 205 foi realizada posteriormente, por outra empresa, em outubro de 2017.

O arranjo utilizado para ambos os caminhamentos foi o dipolo-dipolo com espa-

çamento de 5.0 m. Este valor foi escolhido levando-se em conta a profundidade de investigação necessária para imagear as camadas do subsolo deste local.

Para o CE 01 foram utilizados 14 eletrodos, totalizando 70.0 m de extensão e 109 pontos medidos, atingindo 15 níveis de investigação. Para o CE 03, foram utilizados 12 eletrodos, totalizando 60 metros de extensão e 78 pontos medidos, atingindo 12 níveis de investigação.

Como é possível notar na Figura 4.23, em ambos os locais da aquisição foi encontrada uma grande quantidade de entulho superficial e até mesmo enterrado em camadas mais rasas do subsolo.



Figura 4.23 – (a) Colchão encontrado enterrado próximo à superfície e no local onde foi realizado a CE 01 (b) Entulho disposto na encosta, no local onde foi realizado a CE 03.

4.4 Aspectos técnicos da aquisição geofísica

Para a execução da aquisição geofísica nas três áreas de estudo foram utilizados os seguintes materiais (Figura 4.24):

- **Resistivímetro SYSCAL PRO SWITCH 72 da marca Iris Instrumental:**

Esse aparelho combina um transmissor, um receptor e uma unidade de comutação (*Switch Box*) em um único envólucro. O aparelho é programado para alternar automaticamente entre os seus 10 canais, obtendo autonomamente os dados de resistividade aparente com alta precisão e confiabilidade. Sua alimentação consiste de uma bateria de 12V.

- **Cabo Multi eletrodo:** Responsável por conectar o resistímetro aos eletodos metálicos por meio dos conectores. O cabo irá repassar a corrente elétrica gerada pelo resistímetro a todos os eletrodos conectados a ele e passar ao *SYSCAL-PRO* as leituras de diferença de potencial. O cabo utilizado possui espaçamento padrão de 5m entre cada eletrodo.
- **Eletrodos Metálicos:** São cravados e fixados no solo com a utilização de uma pequena marreta e então conectados ao cabo multi eletrodo através dos conectores. Estabelecem o contato galvânico com o superfície do terreno.
- **Conectores (Garras de Jacaré):** Conectam os eletrodos ao cabo multi eletrodo.

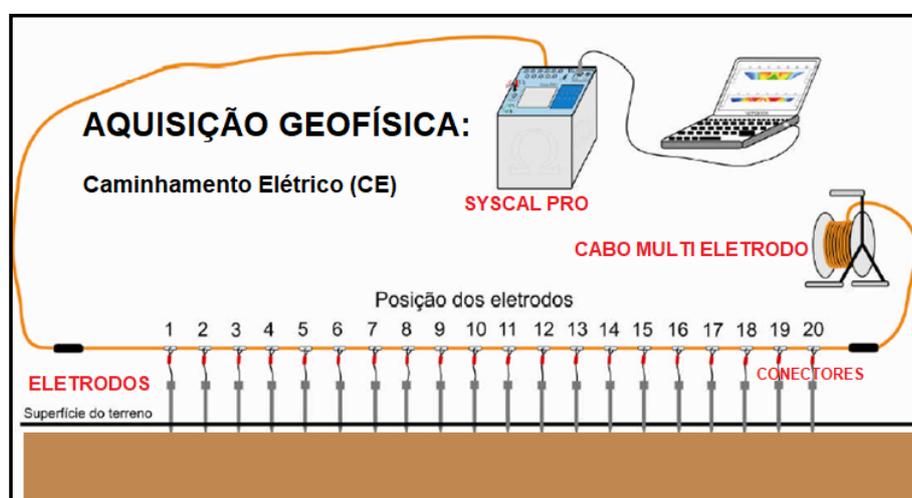


Figura 4.24 – Materiais usados na aquisição geofísica.

Para a montagem da aquisição geofísica é essencial a observação das condições existentes no terreno como relevo e topografia, da camada de solo que deve ser facilmente penetrável para os eletrodos, se existe pouca vegetação ou entulho no local e, finalmente,

ausência de fatores externos à superfície que perturbem a qualidade das medidas como estrutura metálicas e postes de eletricidade

A pesquisa foi realizada com um sistema de medidas em que os eletrodos estão dispostos ao longo de uma linha reta com espaçamento constante (5.0 m ou 2.5 m) entre os eletrodos adjacentes. Os eletrodos são espaçados corretamente com ajuda de uma fita métrica e devem ser bem enterrados com o uso de uma marreta para melhor fixação. Com todos os eletrodos fixados no terreno, o cabo multi eletrodo é estendido ao longo da linha de eletrodos e é conectado a eles através dos conectores (garras de jacaré).

O próximo passo é programar o resistivímetro de acordo com o tipo de aquisição que será feita (Caminhamento elétrico utilizando o arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de 5 m ou 2.5 m entre os eletrodos, quantidade de eletrodos, etc.).

Antes que as medidas sejam feitas é primordial realizar o Teste de Resistência de Contato através do botão *RS CHECK*. Este teste realizado automaticamente pelo aparelho irá conferir se todas as ligações entre os eletrodos estão bem instaladas para que a corrente possa ser transmitida ao solo com eficiência.

Este teste é indispensável devido ao fato de que a resistência de contato do conjunto cabos-eletrodos-solo pode afetar seriamente a qualidade da medida. Como a corrente injetada é limitada, altas resistências de contato diminuirão a corrente transmitida, resultando na leitura de potenciais menores e diminuição da razão sinal-ruído.

Quando eletrodos se encontram com resistência de contato acima de 30 kOhm.m é necessário checar esse eletrodo para ver se está corretamente conectado ao cabo multi eletrodo ou se está fincado corretamente ao solo. Após essa checagem, realiza-se novamente o Teste de Resistência de Contato até que todos os eletrodos se encontrem devidamente prontos para realizarem as medidas.

Para cada ponto medido o equipamento irá atribuir um fator de qualidade. Este fator é um parâmetro de empilhamento da medição, estabelecido pelo usuário, que representa o desvio padrão de cada medida (No presente estudo foi definido um desvio de 5%). Duas medidas são efetuadas para cada leitura com o desvio padrão calculado. A medição é

automaticamente descartada se o desvio é acima desse limite pré-definido pelo operador e assim o equipamento irá repetir a medida, sendo o número de repetições também programável pelo operador.

Concluída a aquisição dos dados, estes são transferidos do aparelho para o computador, através de cabo próprio para a comunicação entre eles, utilizando o *software PROSYS II* da própria *Iris Instrumental*. O dado pode ser exportado em diversos formatos, porém foi escolhido o formato **.txt*.

4.5 Tratamento e Processamento dos dados

Com os dados da aquisição no computador em formato **.txt*, é necessário que esses passem por uma etapa de edição dos dados espúrios. Tal filtragem pode ser feita a partir de diferentes padrões como, resistividade, desvio padrão ou intensidade da corrente injetada. Valores com desvio padrão muito altos ($\geq 20\%$) ou valores negativos de resistividade, por exemplo, são eliminados.

A remoção de dados espúrios é uma prática aceitável pois cada medida é uma resposta integrada de todo o semi-espaço e traz informações sobre toda a resposta do semi-espaço, ou seja, a redundância de dados devido a sobre-amostragem garante que a eliminação de alguns pontos não seja fatal para a resolução do modelo invertido.

Contudo, essa remoção deve ser feita de forma cautelosa, pois a eliminação massiva, em algum lugar "aleatório" de um grande número de dados pode causar baixa resolução nessa área.

Após a etapa de edição dos dados, é necessário que eles sejam dispostos em um arquivo **.dat*, formato reconhecido pelo programa de inversão *RES2DINV*. Neste arquivo será escrito o tipo de método elétrico utilizado, bem como arranjo, número de medidas e dados de topografia, se necessário. A forma como esses dados devem ser organizados deve seguir o modelo de arquivo de entrada estipulado pelo programa de inversão e que pode ser encontrado no seu manual.

Quando os dados da aquisição são finalmente editados e organizados seguindo o padrão do programa, o arquivo é exportado para o *software* de inversão *RES2DINV*, que

irá efetuar a leitura desse arquivo e verificar se existe algum erro no *.dat.

A etapa de inversão geofísica consiste de um processo matemático que tem como produto um modelo idealizado de subsuperfície com base em um conjunto de dados observados.

Esse processo procura reconstituir as feições geológicas com base na distribuição das propriedades físicas medidas em campo. A partir desses dados, é obtida uma estimativa do conjunto de parâmetros do modelo e informações com respeito a seus limites de confiança.

O programa de inversão gera um modelo de resistividade 2D através da divisão da subsuperfície em blocos retangulares sendo calculada a resistividade dos blocos que produzirá uma resistividade aparente de valores semelhantes aos valores de resistividade aparente medidos. Estes valores calculados pelo programa são apresentados na pseudo-seção de resistividade. Ao gerar a seção geoeletrica (modelo) de resistividade verdadeira, o programa também apresenta as pseudo-seções de resistividade aparente medida e calculada.

Os valores de resistividade aparente foram calculados utilizando uma sub-rotina de modelagem direta e a rotina de inversão foi calcula pelo método dos mínimos quadrados com vínculo de suavidade (*smoothness-constrained least-squares method*), cuja matemática pode ser revisitada no capítulo 3 (seção 3.5.3).

Também foi utilizada a opção "*use model refinement*", a qual permite a utilização de blocos (para os quais a resistividade é calculada) com largura igual a metade do espaçamento entre os eletrodos, o que forneceu resultados de resistividade elétrica mais precisos. A espessura da primeira fileira de blocos foi definida com uma razão de 0.4 em relação ao espaçamento dos eletrodos, e o fator de aumento da espessura estabelecido para cada fileira subsequente foi de 1.25.

A partir deste ponto foi feita a inversão, seguindo esse processo para cada um dos caminhamentos realizados nesta pesquisa, obtendo-se como produto final as seções geoeletricas de resistividade.

4.6 Análise Qualitativa e Correlação

Obtidas as seções de resistividade elétrica de cada área e de posse dos boletins de sondagem realizadas nos locais de estudo foi feita a integração das informações geotécnicas com os dados geofísicos analisando a possível correlação existente entre a propriedade de resistividade elétrica ρ e o número de golpes (N_{SPT}) em cada caminhamento elétrico.

Com objetivo de verificar essa relação entre as duas variáveis estudadas, os levantamentos geofísicos foram planejados para serem executados nos pontos com maiores quantidades de dados geotécnicos, atravessando transversalmente as estacas onde foram realizadas essas sondagens, em cada área.

4.6.1 Análise Qualitativa

Para a análise qualitativa foram criadas figuras integrando informações provenientes dos boletins de sondagem (penetração e gráfico do número de golpes final e inicial, nível d'água, cota da boca do furo e perfil gráfico das amostras) com a coluna de resistividade elétrica exatamente na posição do referido SPT no caminhamento elétrico. Desta maneira, é possível avaliar com o aumento da profundidade:

- A relação entre o N_{SPT} e a propriedade de resistividade elétrica;
- Como a variação na composição do solo (genética e textura) desde a camada de aterro até chegar ao impenetrável à peça de lavagem afeta qualitativamente a resistividade elétrica;
- A presença do nível d'água e como esta afeta a resistividade elétrica e o N_{SPT} .

4.6.2 Correlação

Para atender o objetivo de investigar o relacionamento entre o número de Golpes (N_{SPT}) e a resistividade elétrica (ρ) foi realizado o estudo da correlação entre estas variáveis no intuito de resumir e mensurar o grau de relacionamento linear entre elas.

O comportamento conjunto de duas variáveis quantitativas pode ser observado por meio de gráfico ou diagrama de dispersão. Se a representação gráfica das duas variáveis é

representada por pontos alinhados, ajustando-se a reta, se está na presença de uma relação linear (BUSSAB; MORETTIN, 2013). Por meio dos diagramas de dispersão pode-se inferir se existe uma correlação e ainda, se esta é positiva ou negativa (Figura 4.25).

DIAGRAMAS DE DISPERSÃO (X, Y)

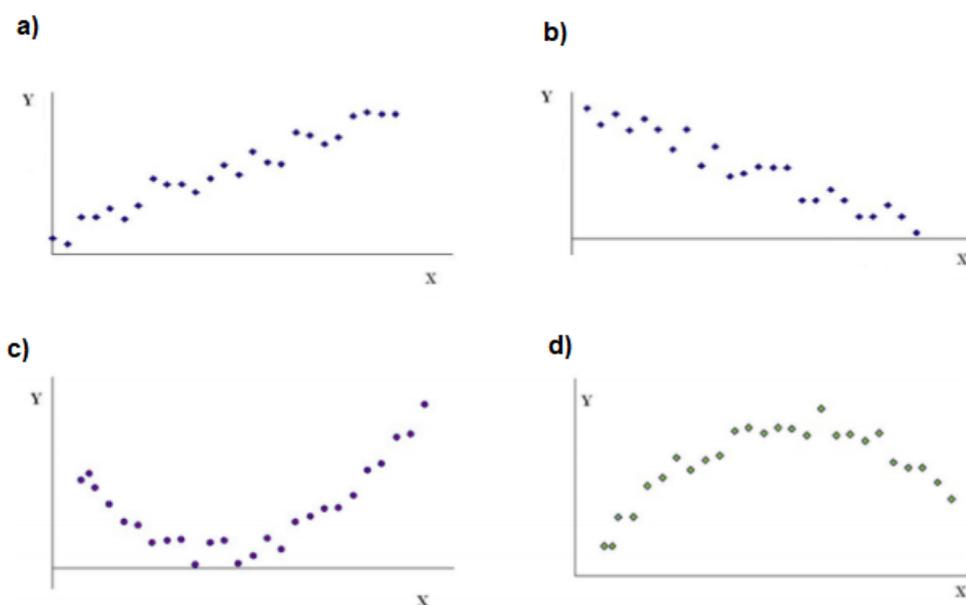


Figura 4.25 – Diagrama de dispersão de X e Y. Em a) temos uma correlação positiva (em média, quanto maior X maior será Y) e em b) temos uma correlação negativa (em média, quanto maior X menor será Y). Os diagramas em c) e d) sugerem uma regressão não linear entre as variáveis. Adaptado de BUSSAB e MORETTIN (2013).

Desta forma, foram plotados diagramas de dispersão para estudar a correlação entre o número de golpes (variável Y) e os valores de resistividade elétrica (variável X) para cada SPT utilizado nesta pesquisa.

Quando se analisam dados que sugerem a existência de uma relação funcional entre duas variáveis, surge a necessidade de se determinar uma função matemática que exprima esse comportamento, ou seja, uma equação de regressão. A análise da regressão é uma metodologia estatística que utiliza a relação entre duas ou mais variáveis quantitativas de uma forma que uma variável pode ser predita por outra ou outras.

Ao imaginar uma relação funcional entre duas variáveis X e Y, se está interessado numa função que explique grande parte da variação de Y por X, entretanto, uma parcela

da variabilidade de Y não explicada por X será atribuída ao acaso, ou seja, ao erro aleatório.

Formalmente, a análise da regressão parte de um conjunto de observações pareadas $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, relativas às variáveis X e Y e considera que podemos escrever a relação entre as duas variáveis, da seguinte maneira:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

onde:

- y_i é a variável resposta associada à i -ésima observação de Y ;
- x_i é a i -ésima observação do valor fixado para a variável independente (e não aleatória) X ;
- ε_i é o erro aleatório para a i -ésima observação, isto é, o efeito de fatores que estão afetando a observação de Y de forma aleatória;
- α é o ponto onde a reta corta o eixo das ordenadas e pode ser interpretável ou não;
- β é o coeficiente angular e representa o quanto varia a média de Y para um aumento de uma unidade da variável X .

Para estimar os parâmetros α e β através dos dados fornecidos pelas sondagens e caminhamentos elétricos e com o intuito de ajustar uma linha entre as variáveis em estudo é utilizado o "Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)". A reta obtida através deste método não é necessariamente o melhor ajuste possível, mas possui propriedades estatísticas desejáveis.

O MMQ consiste em fazer com que a soma dos erros quadráticos seja menor possível,

ou seja, este método consiste em obter os valores de a e b que minimizam a expressão:

$$S = \sum \varepsilon_i = \sum (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 \quad (4.2)$$

Aplicando derivadas parciais à expressão acima e, igualando-se a zero, acharemos as estimativas para α e β , as quais serão chamadas de a e b , respectivamente:

$$a = \frac{\sum y_i - b \sum x_i}{n} \quad (4.3)$$

e

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.4)$$

A chamada equação (reta) da regressão é dada por:

$$y = a + bx \quad (4.5)$$

E para cada x_i $i = (1, \dots, n)$ temos, pela equação de regressão, o valor predito:

$$y = a + bx_i \quad (4.6)$$

Para mensurar o grau de relacionamento entre o número de golpes e a resistividade elétrica é calculado o coeficiente de determinação (R^2). Este coeficiente é uma medida descritiva da proporção da variação do número de golpes que pode ser explicada por variações da resistividade elétrica, segundo cada modelo de regressão, ou seja, segundo a equação encontrada para cada sondagem nas três áreas de estudo. O coeficiente de

determinação é dado pela seguinte razão:

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4.7)$$

Em que o numerador representa a variação explicada pelo modelo e o denominador, a variação total. Quanto mais próximo de 1 (um) estiver o coeficiente de determinação, melhor será o grau de explicação da variação do número de golpes em termos da variação da resistividade elétrica.

Seguindo esta metodologia, foram encontradas as equações da regressão para cada uma das sondagens, além de seus respectivos coeficientes de determinação. Como pontuado por SUDHA *et al.* (2009) estas equações são relações situ-específicas e quando bem estabelecidas para um determinado local podem ser utilizadas para prever a variação do N_{SPT} a partir dos caminhamentos elétricos efetuados.

Aplicando esta abordagem às três áreas de estudo, foram desenvolvidos diagramas de dispersão para cada SPT e posteriormente, foram agrupadas sondagens próximas umas das outras ou com mesmo tipo de solo (segundo a descrição no boletim de sondagem) com o objetivo de melhorar a correlação. Dessa forma, é possível estabelecer uma relação situ-específica para cada tipo de solo encontrado nas áreas investigadas, podendo mensurar em que local a correlação funciona melhor.

Ainda de acordo com a pesquisa de SUDHA *et al.* (2009), os coeficientes das equações de regressão linear são sensíveis à mudança de litologia e conteúdo de argila. Considerando-se essa conclusão foram analisados os coeficientes angulares e lineares de cada equação estabelecida.

Diagramas de dispersão foram criados contendo pontos que representam os coeficientes angulares ou lineares de cada solo e sua respectiva resistividade elétrica média ou N_{SPT}^- (número de golpes médio) para que a correlação entre essas variáveis possa ser analisada e comparada com os resultados encontrados por SUDHA *et al.* (2009).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Área I

A Figura 5.1 apresenta o modelo de resistividade para a área de estudo em conjunto com a locação das 5 sondagens SPT realizadas ao longo do perfil. O erro RMS encontrado para a seção invertida foi de 7,8%.

De posse dos dados de eletrorresistividade, das descrições táteis-visuais do solo e dos valores de NSPT, inicialmente foram definidas faixas de valores de eletrorresistividade que guardassem correspondência com as características do solo obtidas das sondagens de simples reconhecimento.

Formou-se então um modelo geoeletrico de subsuperfície com três faixas de resistividade: A primeira faixa contempla valores de resistividade entre 100 e 200 Ohm.m (tonalidades esverdeadas mais escuras a claras) e corresponde a uma camada de aterro superficial com espessura em torno de 6,0 metros.

A segunda faixa está relacionada a baixos valores de resistividade, entre 2 a 100 Ohm.m (tonalidades azuis e verdes claras) e corresponde a uma camada de espessura também em torno de 6,0 metros que se apresenta com maior teor de água, e onde os menores valores de resistividades indicam zonas com maior grau de saturação do que outras (dado inferido da consistência do solo descrita nos relatórios individuais de sondagem) ou com a presença de bolsões de argila mole.

Finalmente, a faixa de maiores valores de resistividade, de 200 a 2000 Ohm.m (tonalidades amarelas e marrom clara), está relacionada com uma camada de rocha granulítica alterada ou rocha sã. Pode-se notar que a geometria desses blocos de rocha alterada se encontra descontínua ao longo do perfil, evidenciando locais (porção oeste) onde atinge maior elevação.

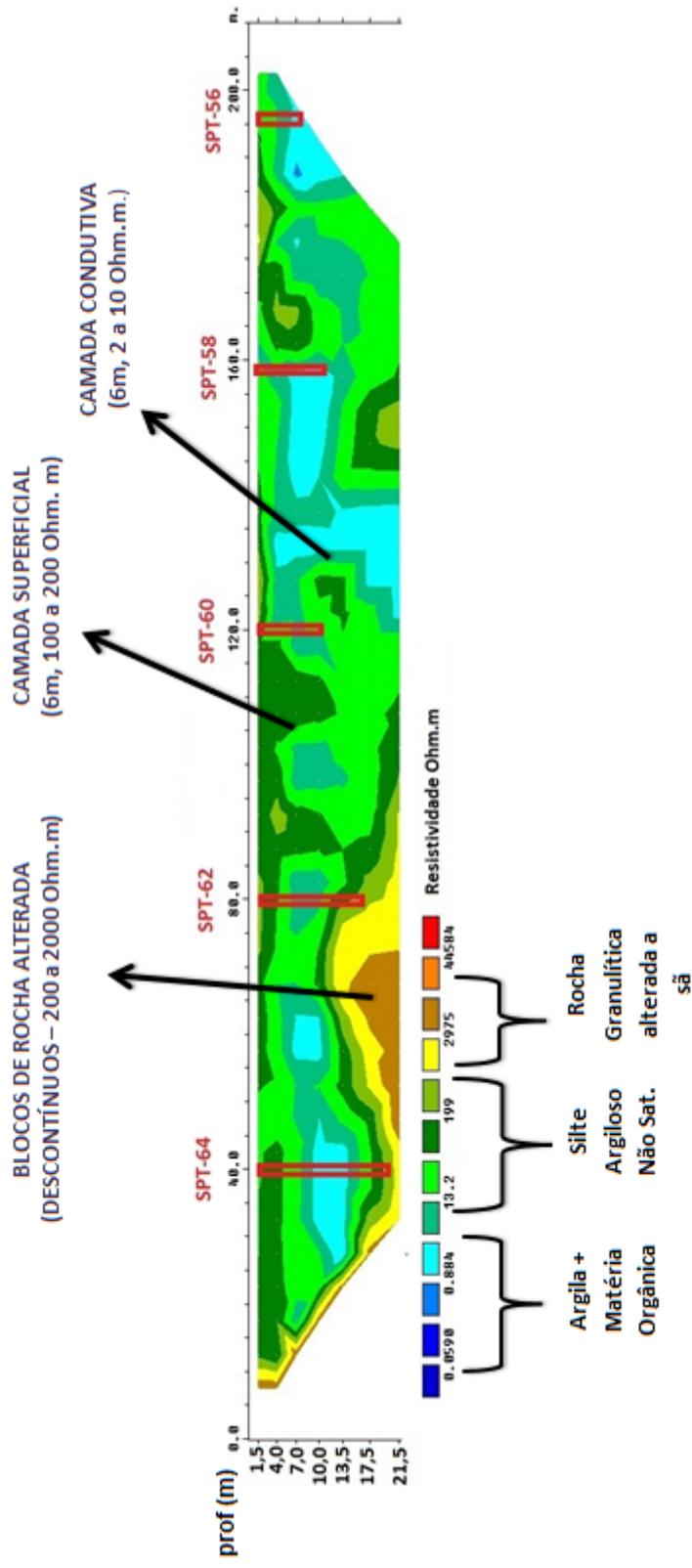


Figura 5.1 – Perfil levantado no sentido longitudinal do eixo da via expressa, sobre a pista. Apresentamos os ensaios SPTs projetados sobre a seção de eletroresistividade e os designamos pela estaca de sua posição.

5.1.1 Análise Qualitativa

São apresentadas imagens integrando as sondagens SPT com a coluna de resistividade elétrica na estaca em que se posicionou a sondagem com o objetivo de observar a correlação entre a propriedade física e o N_{SPT}

Na Figura 5.2 e Figura 5.3, correspondentes as estacas E-56 e E-60, observa-se inicialmente uma camada de silte argiloso com areia fina e média e com pedregulhos. Na estaca E-56 o material é descrito como de coloração vermelho escuro e de consistência média. Já na estaca E-60 o material é descrito como marrom claro e de consistência rija.

Essas camadas iniciais nas duas estacas são identificadas como sendo o provável aterro. A diferença na consistência do material das duas estacas é identificada pela diferença de valores iniciais de resistividade (13 Ohm.m na estaca E-56 e 100 Ohm na estaca E-60).

Sotoposta a essa camada, verifica-se a presença de areia fina e média com pedregulhos, com coloração cinza e compactidade variando de fofa (E-056) a compacta (E-60). Com a diminuição do número de golpes nesta camada, tanto na estaca E-056 como na E-060, é notado também uma diminuição dos valores de resistividade.

Abaixo deste trecho, encontra-se uma camada de argila siltosa com areia fina e com matéria orgânica em decomposição, muito mole e de coloração preta. A presença desse material de baixa resistência vai influenciar nos valores de resistividade elétrica causando, na estaca E-056, uma redução de aproximadamente 106 Ohm.m para 7 Ohm.m.

Após esse trecho de solo mole a muito mole, volta-se a encontrar uma camada de material de composição que varia de silte arenoso a areia com pedregulho nas duas estacas, tendo seu grau de compactidade variando de fofa a medianamente compacta. Neste trecho final, com o aumento da resistência do material atravessado, os valores de resistividade também seguem a mesma tendência.

SPT E-56

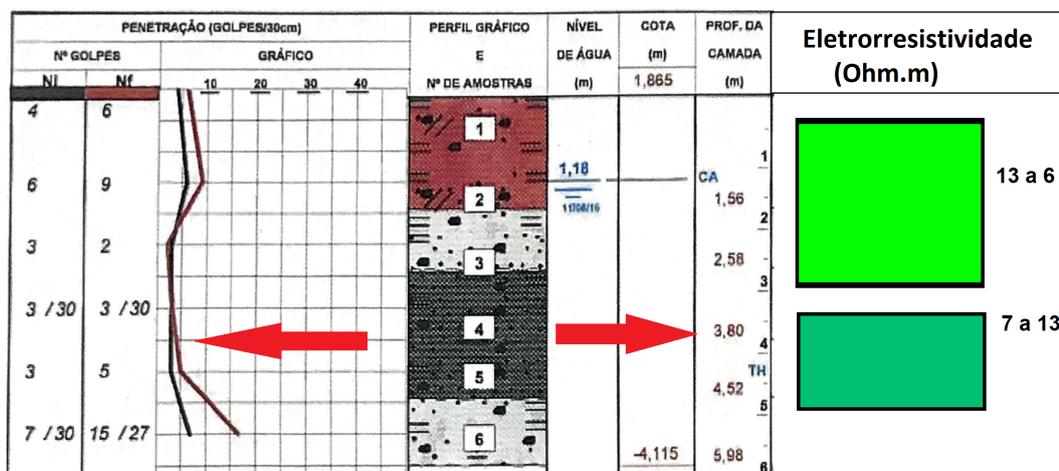


Figura 5.2 – Integração de ensaio SPT com a coluna de eletrorresistividade levantada ao longo da pista A na via expressa, na posição E-56.

SPT E-60

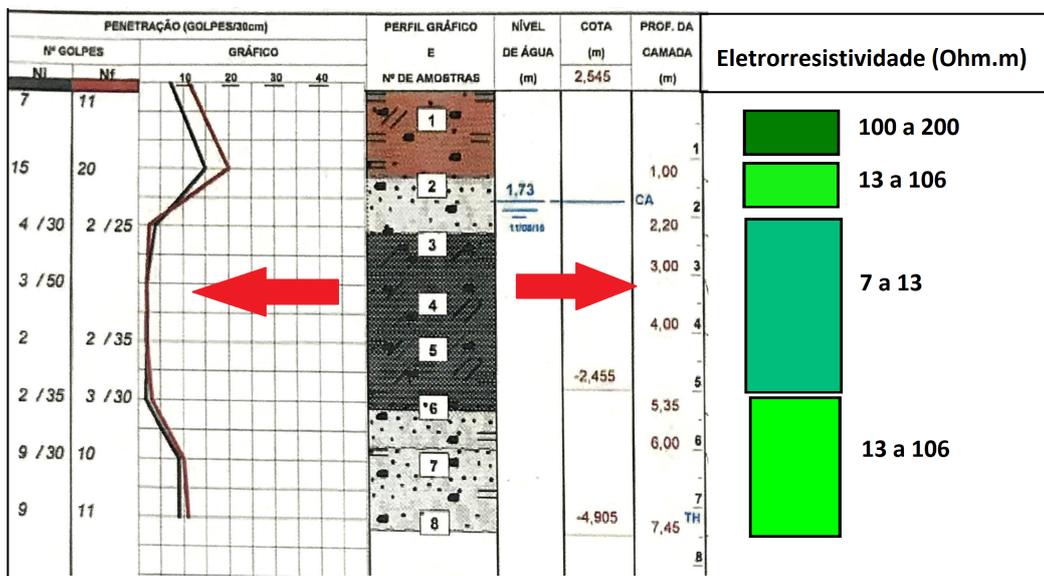


Figura 5.3 – Integração de ensaio SPT com a coluna de eletrorresistividade obtida no levantamento CE ao longo da pista A da via expressa, na posição E-60.

A Figura 5.4 e Figura 5.5 apresentam a primeira camada, tanto em E-62 como em E-64, identificada como sendo o provável aterro, sendo constituída por silte argiloso com areia fina e média e com pedregulho. Na estaca E-62, o material possui coloração marrom clara, sendo sua consistência classificada como rija.

Já na estaca E-64, o material tem coloração marrom e sua consistência é classificada como mole. Essa diferença na resistência do material das duas estacas é evidenciada nos valores correspondentes de resistividade (Na estaca E-62, material mais resistente possui valores iniciais de resistividade da ordem de 106 Ohm.m e na estaca E-64, de material mole, os valores iniciais são da ordem de 18 Ohm.m).

Sotoposta a essa camada superficial na estaca E-62, encontra-se uma camada de areia fina e média pouco siltosa com pedregulhos, medianamente compacta e de cor cinza. É observada também a presença do nível d'água. A presença da água e a diminuição da resistência à penetração do material vão influenciar na resistividade que sofre uma diminuição expressiva dos valores, saindo de 199 Ohm.m para valores na faixa de 13 a 106 Ohm.m.

Abaixo dessa camada, encontra-se um material descrito como argila siltosa com areia fina, de cor cinza e de consistência mole. Sotoposto a esse material, encontra-se areia fina e média pouco siltosa com pedregulhos de compactidade que variam de fofo a pouco compacta (Até aproximadamente 7m de profundidade).

Neste trecho, os valores de resistividade elétrica também acompanham o aumento de resistência do material à penetração. Quando o material é mole, a resistividade é da ordem de 7 a 13 Ohm.m e quando o material é fofo a pouco compacto, a resistividade é representada pelos intervalos de 13 a 106 Ohm.m e de 106 a 199 Ohm.m, respectivamente.

A partir de 8 metros de profundidade, o material em E-62 é descrito como silte arenoso com pedregulhos com compactidade variando de pouco compacto, compacto, medianamente compacto e por fim, compacto com alteração de rocha. Neste trecho final, os valores de resistividade seguem aumentando de acordo com o aumento na resistência dos materiais atravessados.

SPT E-62

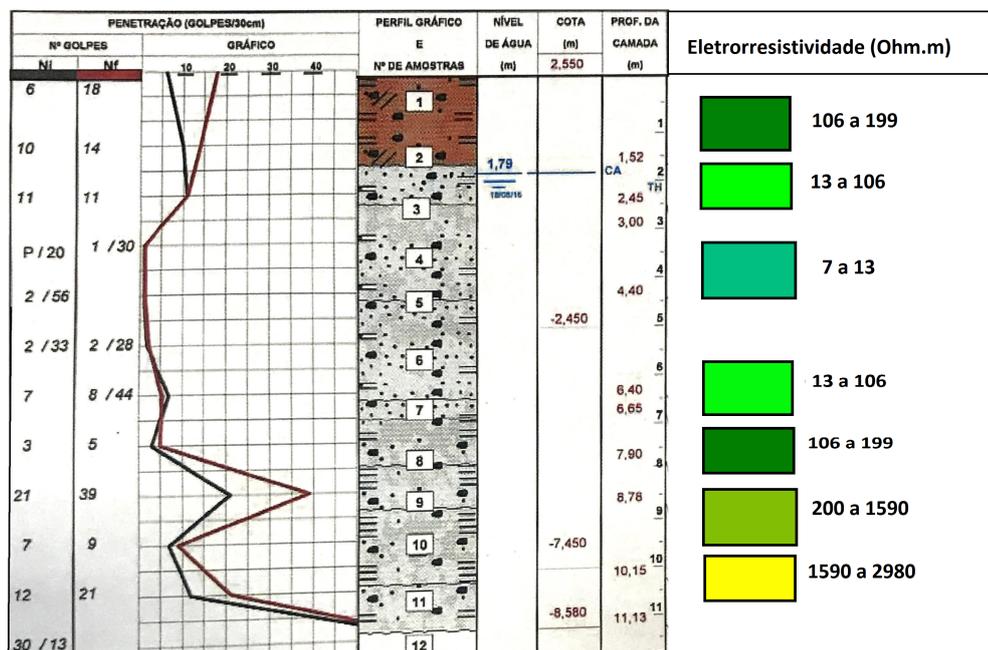


Figura 5.4 – Integração de ensaio SPT com a coluna de eletrorresistividade obtida no levantamento CE ao longo da pista A da via expressa, na posição E-62.

Com relação a estaca E-64 (Figura 5.5), logo abaixo da camada descrita como provável aterro, podemos perceber que a resistência do material aumenta (mole para rijo), fato evidenciado pelo aumento do número de golpes. Os valores de resistividade também tendem a acompanhar esse aumento de resistência, de acordo o intervalo de 18 a 101 Ohm.m.

Sotoposto a essa camada, encontra-se um material descrito como areia fina e média com pedregulhos, medianamente compacta, cor de cinza. Nesta camada, nota-se também, a presença do nível d'água (3,40 metros). A redução da resistência do material e mais intensa, a presença de nível d'água são responsáveis pela redução expressiva dos valores de resistividade, na ordem de 10 a 18 Ohm.m.

Abaixo desta camada, em torno de 5 a 6,5 metros de profundidade, é encontrado um material de resistência baixa, consistência muito mole a mole, descrito como argila siltosa com areia fina de coloração cinza. Essa mudança de resistência também é apontada nos

valores de resistividade (2 a 10 Ohm.m).

A partir de 9 metros de profundidade, encontram-se camadas com materiais do tipo silte arenoso com pedregulhos, pouco compactos e medianamente compactos, variando de cor cinza a marrom.

Por último, em aproximadamente, 12 metros de profundidades encontra-se um material de maior resistência (compacto) composto por silte arenoso com pedregulhos e com alteração de rocha. Com o aumento gradual da resistência desses materiais os valores de resistividade também aumentam seguindo a mesma tendência.

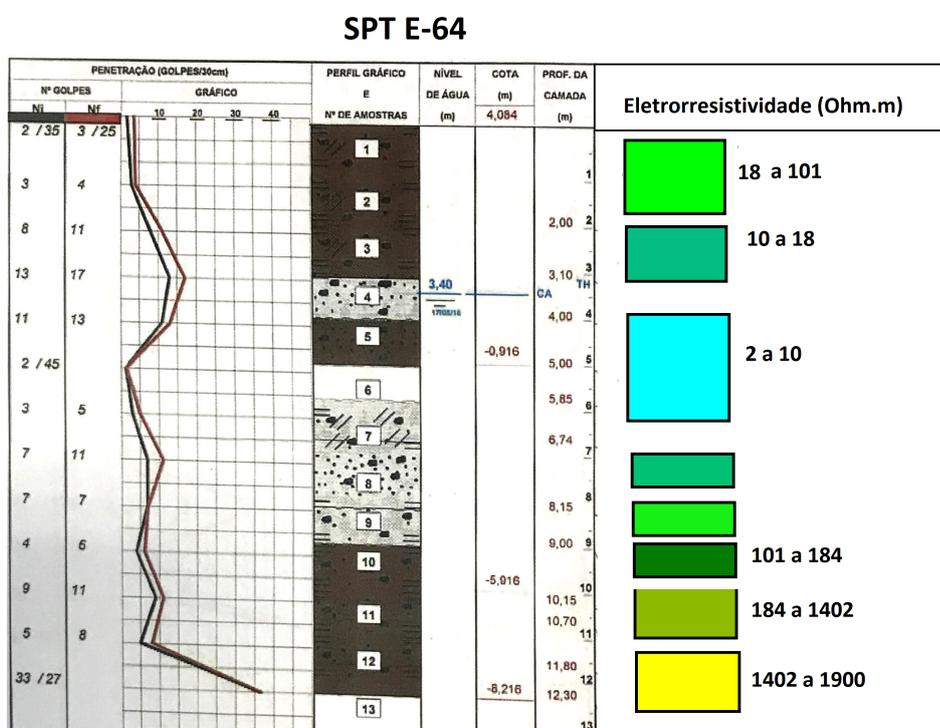


Figura 5.5 – Integração de ensaio SPT com a coluna de eletrorresistividade obtida no levantamento CE ao longo da pista A da via expressa, na posição E-64.

5.2 Área II

A Figura 5.6 apresenta os modelos de resistividade elétrica para a área de estudo em conjunto com a locação das 5 sondagens SPT realizadas ao longo da crista do talude e no platô próximo ao pé do talude (Figura 4.12). Os erros RMS encontrados para as

seções invertidas foram de 4,5% e 3,9%, respectivamente.

De posse dos dados de eletrorresistividade, das descrições táteis-visuais do solo e dos valores de N_{SPT} , inicialmente foram definidas faixas de valores de eletrorresistividade que guardassem correspondências com as características do solo obtidas das sondagens de simples reconhecimento.

Formou-se então um modelo geoeétrico de subsuperfície com 4 faixas de resistividade: A primeira faixa contempla valores de resistividade entre 45 a 68 Ohm.m (tonalidades marrom claro a laranja) e correspondem a camada de aterro superficial de até aproximadamente 4.0m, inconsolidada e de composição variando de silte argiloso com areia fina e média, de resistência média a mole até silte arenoso com argila de baixa resistência.

A segunda faixa contempla valores de resistividade entre 70 a 150 Ohm.m (tonalidades avermelhadas ao roxo) e corresponde ao material composto por silte arenoso com argila. A medida que aumenta-se a compactação, o material vai apresentando fragmentos de rocha alterada.

A terceira faixa contempla valores de resistividades entre 45 a 15 Ohm.m (tonalidades amareladas até nuances de verde escuro) correspondendo a um material com grande quantidade de argila, decorrente do intemperismo e decomposição dos folhelhos laminados e siltitos argilosos presentes na área, se caracterizando com um solo expansivo, regionalmente conhecido como massapê (argila siltosa).

Finalmente, a quarta e última faixa contempla valores de resistividade entre 14 e 5 Ohm.m (tonalidades azul claro a azul escuro) correspondendo ao solo de alteração de rocha até atingir a rocha sã (folhelho).

É importante salientar que os caminhamentos elétricos realizados nesta área conseguem imagear maiores profundidades do que as profundidades alcançadas pelas sondagens SPT, cuja maior profundidade foi de 12,36m.

É possível notar a presença de duas anomalias de resistividade bem definidas tanto na linha 1 como na linha 2 (Figura 5.6). Inicialmente, foi levantada a hipótese de que essas duas anomalias representavam matações ou blocos de material alterado. Contudo,

ao analisar as sondagens 201 e 202, foi notado que no local da anomalia o material se caracteriza como sendo um silte argiloso com areia média e pedregulhos, de alta resistência à penetração. De acordo com as características geotécnicas evidenciadas na amostragem, a hipótese de que a anomalia na linha 1 seria um matacão foi descartada.

Analisando a Figura 5.6, temos que a segunda anomalia está centrada no local onde foi realizada a sondagem SP-206. De acordo com as características dessa sondagem ficou evidenciado que a anomalia está posicionada na mesma profundidade que uma zona de alta resistência à penetração. De acordo com a amostragem, se trata de um silte arenoso com argila e fragmentos de rocha alterada, muito compacto.

Em comparação com a área I, é possível notar que nas seções de caminhamento elétrico da Figura 5.6, o intervalo de valores de resistividade elétrica é bem menor. Isto se deve a geologia desta área, composta por folhelhos laminados e silte argilosos, tornando essa área rica em argilominerais.

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) dos argilominerais forma uma nuvem de íons adicionais em volta de cada partícula de argila, facilitando o fluxo de corrente elétrica. Dessa forma, solos finos, como o solo da área II, apresentam valores de resistividade elétrica mais baixos.

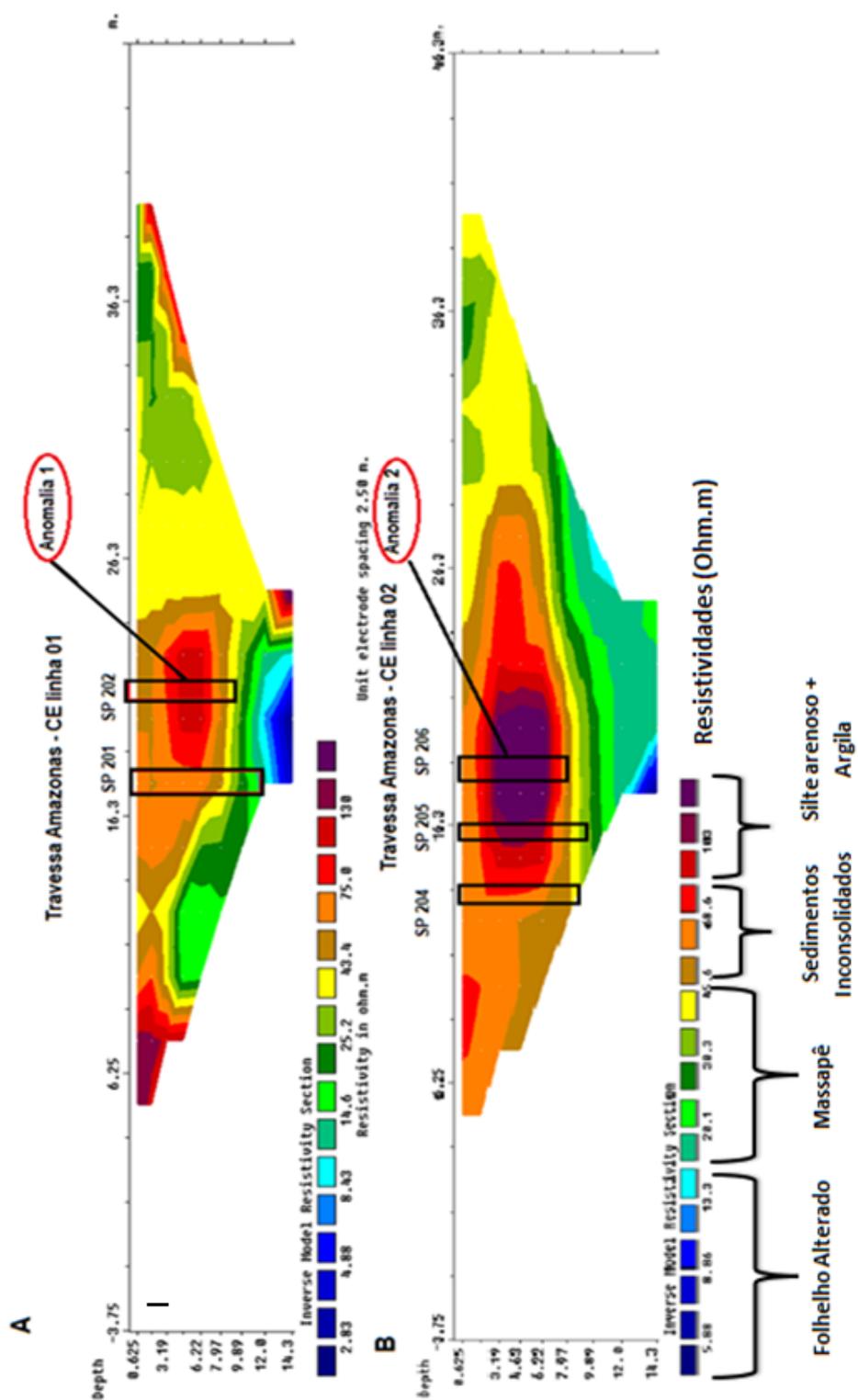


Figura 5.6 – (A) Caminhamento elétrico da linha 1 realizada na crista do talude. (B) Caminhamento elétrico da linha 2 realizado no platô da Travessa Amazonas. Em destaque, as anomalias nas duas seções.

5.2.1 Análise Qualitativa

São apresentadas imagens integrando as sondagens SPT com a coluna de resistividade elétrica na estaca em que se posicionou a sondagem com propósito de observar a possível correlação entre o N_{SPT} e a resistividade elétrica.

Na Figura 5.7 e na Figura 5.8, correspondentes às estacas SP 201 e SP 202, observam-se inicialmente uma camada de silte argiloso com areia média e com pedregulhos, sendo identificada como o provável aterro. A resistência dessa camada é baixa nas duas estacas, variando de muito mole a mole (em SP 202) e mole a rija (em SP 201). Os valores de resistividade elétrica nesta camada inicial variam entre 59 a 75 Ohm.m, nas duas estacas.

Intercalada nessa camada de silte argiloso, aparece em SP 201 e em SP 202 uma fina camada de silte arenoso com argila, causando uma diminuição dos valores de resistividade (Entre 58 e 43 Ohm.m). Contudo, a resistência não é afetada com essa litologia e os números de golpes seguem aumentando com a profundidade.

Na SP 201, a camada de silte argiloso atinge profundidades de até aproximadamente 7,0 metros, sempre com os valores de resistência crescendo em profundidade. Já na outra estaca, essa mesma camada é mais rasa, até 2,0m de profundidade.

Na estaca SP 201, temos a partir de 7,0 metros alterações de folhelho (folhelho decomposto) incorporadas ao silte argiloso, apresentando um pico de resistência (13 golpes). A resistência a penetração aumenta à medida que nos aproximamos da rocha sã até que o impenetrável a precursão seja atingido a uma profundidade de 12,36m. Contudo, por se tratar de um folhelho, uma rocha sedimentar composta em sua maioria de minerais trilaminares, de textura argilosa e alta superfície específica, não se observa neste caso um aumento da resistividade com o aumento da resistência do solo obtendo-se valores entre 13 e 9 Ohm.m.

Na estaca 202 (Figura 5.8), a partir de aproximadamente 2,0 metros, encontra-se uma camada de silte arenoso com pedregulhos e pouca argila. Os valores de resistividade correspondentes aumentam consideravelmente de 75 a 130 Ohm.m. Todavia, o número de golpes não sofre um aumento expressivo e por conta desse fato, a hipótese de que

essa anomalia se tratava de um matacão foi descartada.

Após 6,5 metros, o silte argiloso com areia média volta a aparecer e os valores de resistência seguem aumentando em profundidade. A resistividade elétrica, em contrapartida, sofre uma diminuição passando de 130 para, aproximadamente, 59 Ohm.m. De 7 metros até atingir o estrato impermeável em 8,2 metros, aparece uma camada de silte arenoso com argila de alta compactidade e os valores de resistividade tornam a cair até 34 Ohm.m.

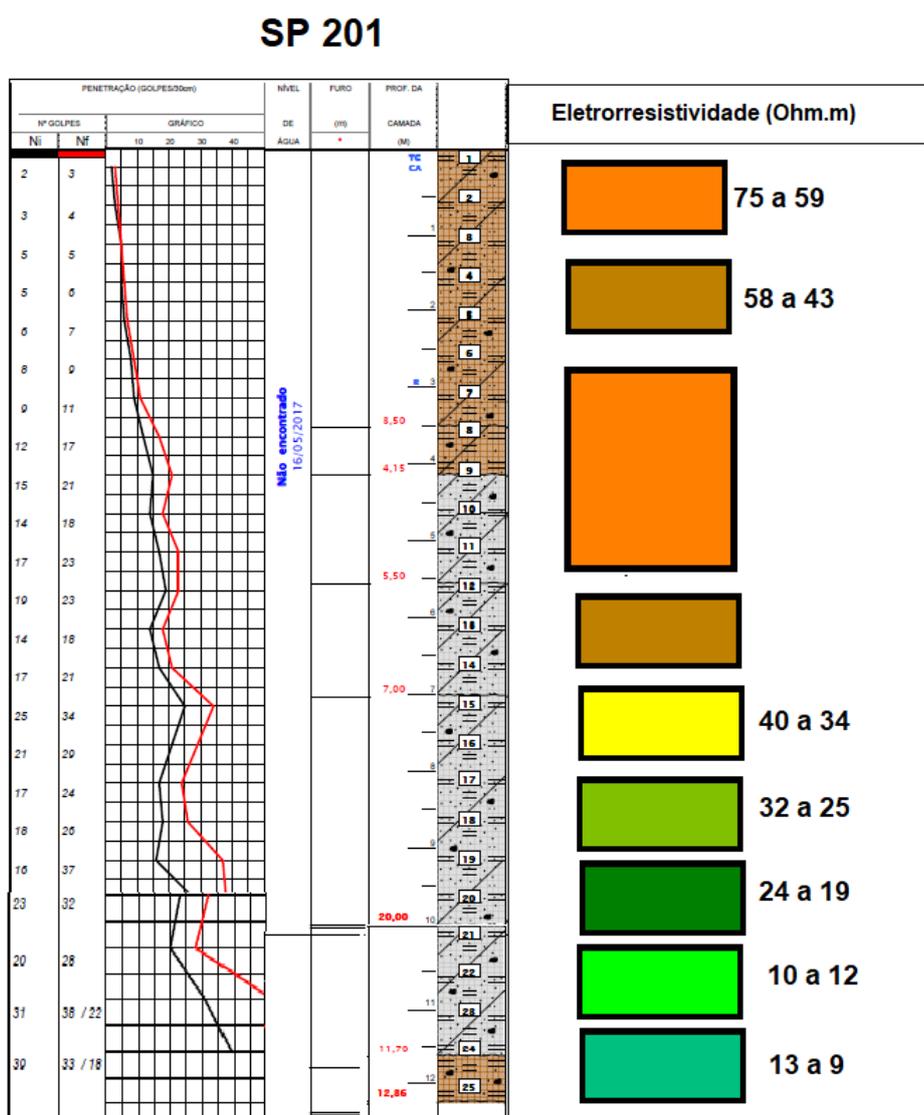


Figura 5.7 – Integração de ensaio SP 201 com a coluna de eletroresistividade obtida na caminhamento elétrico- Linha 1, na crista do talude.

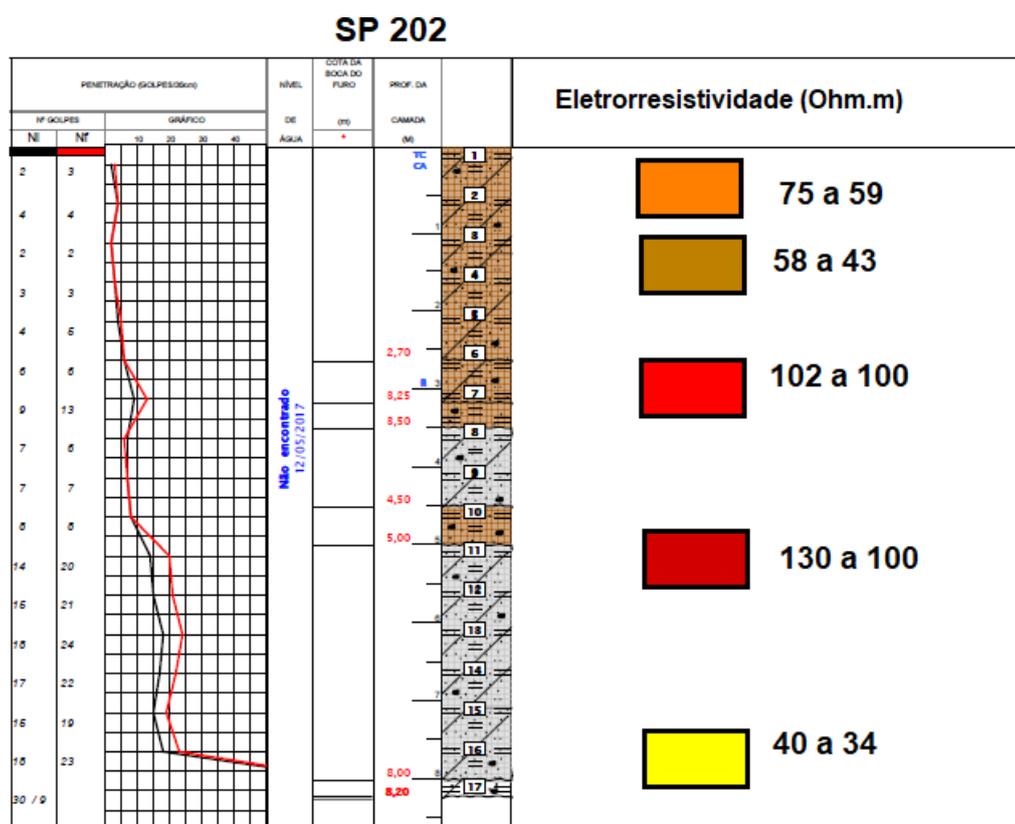


Figura 5.8 – Integração de ensaio SP 202 com a coluna de eletrorresistividade obtida na caminhamento elétrico- Linha 1, na crista do talude.

A Figura 5.9, Figura 5.10 e Figura 5.11 correspondem às estacas SP 204, SP 205 e SP 206, respectivamente. Essas sondagens foram realizadas na parte baixa do talude e seus resultados foram integrados aos valores de resistividade elétrica provenientes do Caminhamento Elétrico - Linha 2 (Figura 5.6), na mesma posição em que as sondagens foram realizadas.

De acordo com o resultado da amostragem em SP 204, é encontrado um material de composição silte arenosa com argila compondo a primeira camada. Esta atinge aproximadamente 2,5 metros de profundidade, com compacidade variando entre fofa a pouco compacta e valores de resistividade variando entre 59 e 75 Ohm.m.

A partir de 2,0 metros, é encontrada uma camada de argila siltosa (massapê). Os valores de resistência à penetração e resistividade elétrica também aumentam

Abaixo do massapê, em aproximadamente 2,95 metros, o silte arenoso volta a aparecer, dessa vez com fragmentos de rocha alterada, fazendo com que os valores de

resistência à penetração sofram um aumento considerável. Os valores de resistividade seguem o mesmo padrão, variando entre 102 e 75 Ohm.m.

Em 8,5 metros, a camada de massapê ressurge na amostragem, apresentando menores valores de resistência do que a camada anterior. Os valores de resistividade elétrica também diminuem, variando no intervalo de 75 a 59 Ohm.m.

De 10,0 metros até atingir o impenetrável em 12,36 metros, o material encontrado é de composição silto argilosa com areia fina a média, apresentando alteração de rocha mais intensificadamente com o aumento da profundidade. Assim, os valores de resistência aumentam e a tendência dos valores de resistividade elétrica é a diminuição gradual com o aumento da profundidade até o intervalo de 13 a 9 Ohm.m.

As primeiras camadas registradas nas SP 205 e SP 206 correspondem a um material de composição silto argilosa com areia média a fina e pedregulhos, de baixa resistência, que atinge até, aproximadamente, 2,5 metros em SP 205 e 2,7 metros em SP 206.

Abaixo dessas respectivas profundidades nas estacas SP 205 e SP 206, encontra-se uma camada de silte arenoso com argila. Em SP 205 este material possui resistência medianamente compacta e possui uma espessura de 80 cm. As resistividades aumentam e apresentam valores no intervalo entre 75 e 102 Ohm.m.

Ainda em SP 205, a partir de 3,0 metros de profundidade até atingir o estrato impenetrável em 10,11 metros, a camada de silte argiloso com areia fina reaparece. Os valores de resistência são altos e os valores de resistividade elétrica seguem o mesmo padrão (105 a 135 Ohm.m).

A partir de, aproximadamente, 5 metros, alterações da rocha folhelho são incorporadas ao silte argiloso com o aumento da profundidade (até 10,11 metros). Contudo, os valores de resistividade diminuem gradativamente com o aumento da alteração de rocha, até atingir valores no intervalo entre 32 a 25 Ohm.m.

Na SP 206, a partir de 2,71 metros de profundidade até atingir o impenetrável (8,93 metros), encontra-se uma camada de silte arenoso com argila e fragmentos de rocha alterada. A resistência dessa camada vai aumentando gradativamente e atinge o pico em aproximadamente 5,0 metros.

Esta camada possui altas resistividades (135 a 150 Ohm.m) e por conta dessas informações, foi levantada a hipótese de que essa anomalia de alta resistividade poderia ser interpretada como sendo um matacão. No entanto, essa hipótese foi descartada ao notar que a sondagem continua avançando, atravessando esse material.

Os valores de resistência à penetração diminuem a partir de 6 metros e voltam a aumentar à partir de 7 metros até atingir o impenetrável. Essa camada final se trata do silte argiloso com variação de alteração de rocha e os valores de resistividade diminuem gradativamente com o aumento da alteração, até atingir valores no intervalo de 40 a 34 Ohm.m.

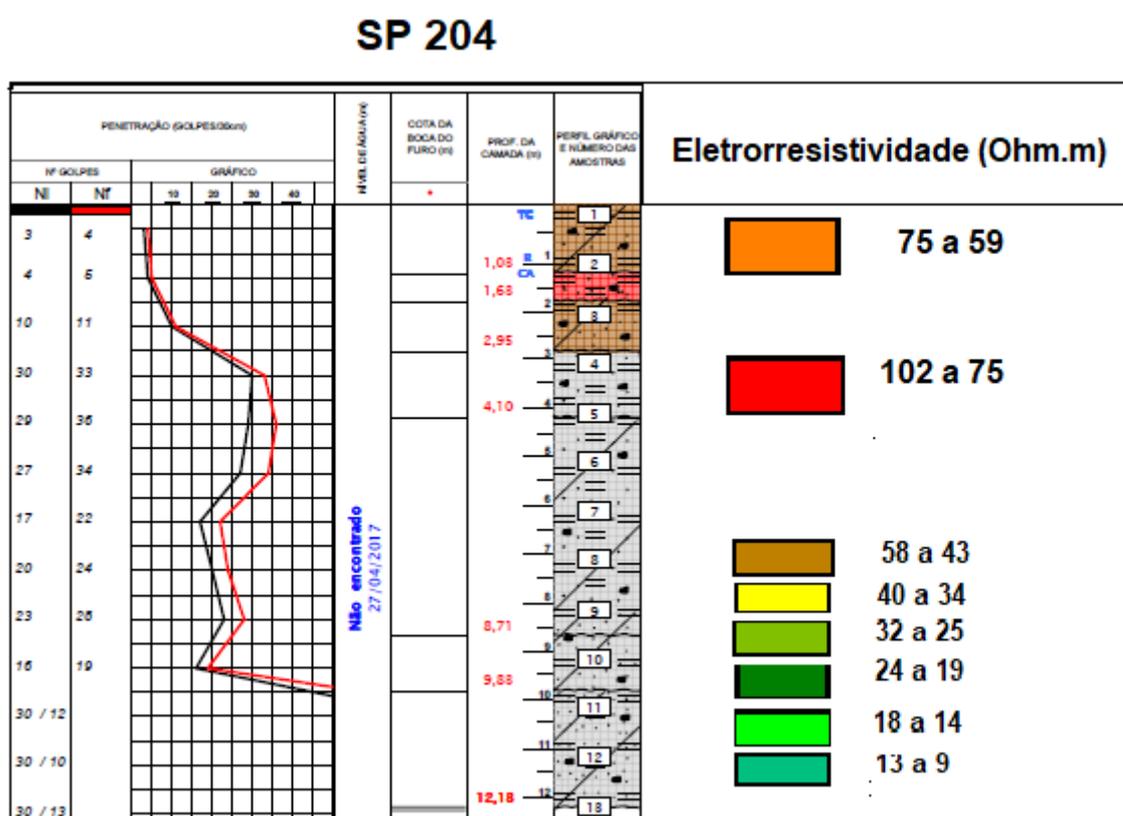


Figura 5.9 – Integração de ensaio SP 204 com a coluna de eletrorresistividade obtida na caminhamento elétrico- Linha 2, no platô. próximo do pé do talude.

SP 205

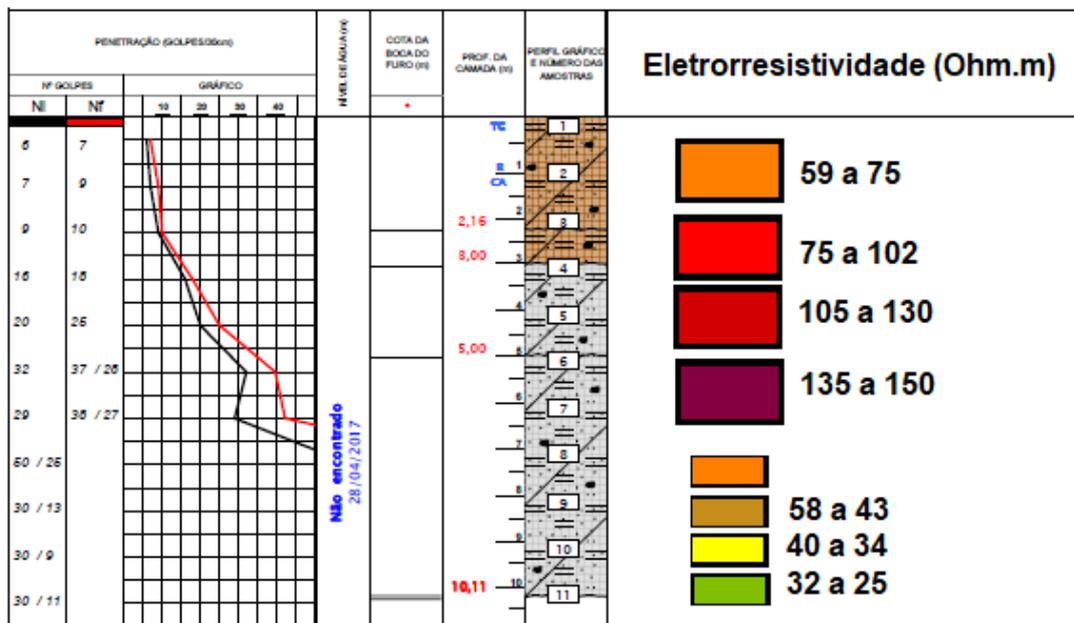


Figura 5.10 – Integração de ensaio SP 205 com a coluna de eletrorresistividade obtida na caminhamento elétrico- Linha 2, no platô, próximo do pé do talude.

SP-206

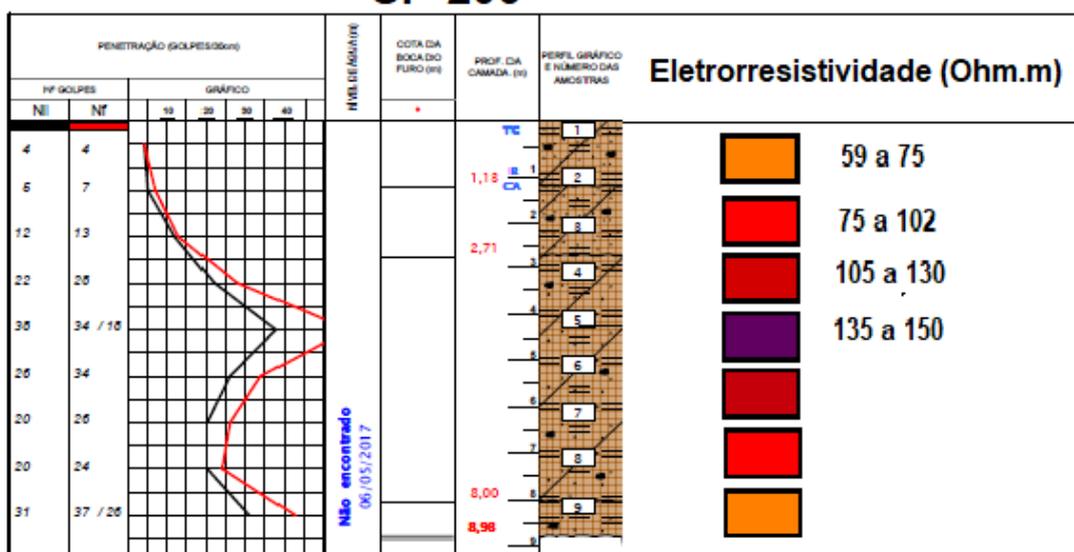


Figura 5.11 – Integração de ensaio SP 206 com a coluna de eletrorresistividade obtida na caminhamento elétrico- Linha 2, no platô, próximo do pé do talude.

5.3 Área III

A Figura 5.12 apresenta os modelos de resistividade elétrica para a área de estudo em conjunto com a locação das 4 sondagens SPT realizadas próximas à mureta da praça do Santo Antônio Além do Carmo (Figura 5.12a) e próximo ao quintal de uma residência (Figura 5.12b), como identificado na Figura 4.22. Os erros RMS encontrados para as seções invertidas foram de 6,1% e 5,7%, respectivamente.

De posse dos dados de eletrorresistividade, das descrições táteis-visuais do solo e dos valores de N_{SPT} , inicialmente foram definidas faixas de valores de eletrorresistividade que guardassem correspondências com as características do solo obtidas das sondagens de simples reconhecimento.

Formou-se então um modelo geoeletrico de subsuperfície com 4 faixas de resistividade: A primeira faixa contempla valores de resistividade entre 0.50 a 25 Ohm.m na Figura 5.12a e 10 a 70 Ohm.m na Figura 5.12b (tonalidades azul escuro a azul claro) e corresponde aos pontos saturados da encosta, sejam por exsudações do esgoto das casas, pelo nível d'água ou então pela camada de aterro saturada.

A segunda faixa está relacionada aos valores de resistividade entre 30 a 300 Ohm.m na Figura 5.12a e 71 a 200 Ohm.m na Figura 5.12b (tonalidade verde claro ao verde musgo) e, correspondem na ordem crescente de resistividade, a camada de aterro (composta de silte arenoso com argila, inconsistente e de resistência fofa a pouco compacta e coloração marrom escura apresentando pedregulhos e entulho) e a transição desta para o solo residual (maduro e jovem), sendo o solo residual maduro composto por silte argiloso a silte arenoso com argila, com presença de matéria orgânica, de compactidade compacta a medianamente compacta e o solo residual jovem possuindo intercalações de silte arenoso e silte argiloso, de consistência dura a média, variegado e de coloração marrom, apresentando pedregulhos.

A terceira faixa está relacionada aos valores de resistividade entre 320 a 1118 Ohm.m na Figura 5.12a e 210 a 471 Ohm.m na Figura 5.12b (tonalidades amarela ao laranja), correspondendo a camada de alteração de rocha, de textura silte arenosa e coloração cinza, onde se encontram pedregulhos e fragmentos de rocha, com resistência compacta.

Finalmente, a faixa de maiores valores de resistividade, de 1200 a 4.500 Ohm.m na Figura 5.12a e 472 a 1000 Ohm.m na Figura 5.12b (tonalidade vermelha a roxa), está relacionada a rocha sã granulítica, de cor cinza, a qual apresenta diferentes graus de fraturamento, portando os valores de resistividade aumentam à medida que a rocha encontra-se menos fraturada e mais próxima da rocha sã.

Em comparação com os Caminhamentos Elétricos da Área II, é possível observar que os valores de resistividades em profundidade, principalmente, quando chegam a camada de alteração de rocha, são bem maiores do que encontrado na outra área. Essa diferença se deve a geologia do local, composta por solos residuais e alteração de rocha proveniente do embasamento cristalino granulítico de Salvador. A composição mineralógica deste solo é rica em minerais que são, na sua maioria, ótimos isolantes elétricos, como quartzo e mica.

A diferença de profundidade do embasamento na encosta do Capistrano foi o principal alvo de investigação geotécnica para a execução do projeto de revitalização da encosta. Com a execução dos caminhamentos elétricos, pôde ser confirmado nas seções em 2D, que o embasamento se encontra mais raso no modelo de resistividade da Figura 5.12A e mais profundo no modelo da Figura 5.12B.

Como foi observado durante a visita ao local e no dia da aquisição, existe uma grande quantidade de entulho na encosta, sobretudo entulho de materiais de construção civil além de resíduos de coleta domiciliar (plástico, vidro, madeira, entre outros). Estes materiais, encontrados na superfície da encosta e também enterrados, foram detectados nas seções geoeletricas como anomalias de alta resistividade na superfície, isso porque a grande maioria são como excelentes isolantes elétricos, tendo sua resistividade variando de acordo com o material.

Finalmente, deve-se notar nas seções geoeletricas anomalias de baixa resistividade que são condizentes com pontos saturados da encosta correspondendo a pontos de lançamento de concentrado de esgoto e águas pluviais na superfície da encosta devido a grande parte da tubulações domiciliares se encontrarem furadas e com vazamentos, ocasionando o encharcamento do terreno, a saturação do solo e aumentando o risco de deslizamento.

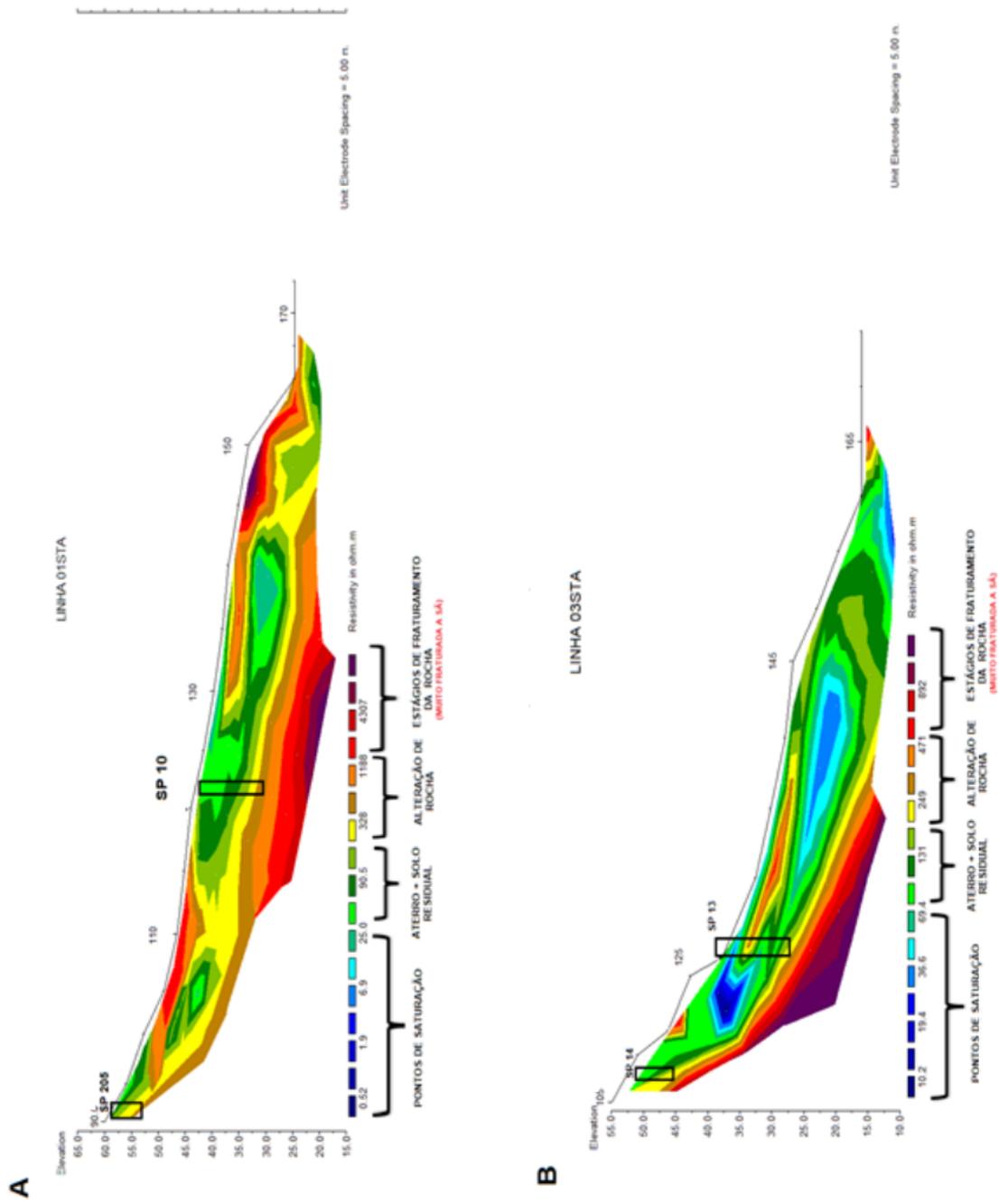


Figura 5.12 – A) Caminhamento Elétrico (CE 01) realizado na Praça do Santo Antônio Além do Carmo. (B) Caminhamento elétrico (CE 03), realizado a partir do quintal de uma casa.

5.3.1 Análise Qualitativa

São apresentadas imagens integrando as sondagens SPT com a coluna de resistividade elétrica na estaca em que se posicionou a sondagem com o objetivo de observar a correlação entre a propriedade física e o N_{SPT}

A Figura 5.13 e a Figura 5.14 correspondem as estacas SP 205 e SP 10, respectivamente, posicionadas na área correspondente à CE 01.

De acordo com o resultado da amostragem em SP 205, é encontrado um silte arenoso com pedregulhos, de coloração marrom escuro, sendo identificado como a camada de provável aterro até 2,0 metros. A compactidade dessa camada varia de muito fofa a fofa e possui valores de resistividades entre 100 a 250 Ohm.m

A partir de 2,0 metros, é encontrada uma camada de silte arenoso, variegado, com alteração de rocha. Apesar da resistência ter aumentado ligeiramente (pouco compacta), a sondagem é finalizada em 3,13 metros, registrando um aumento nos valores de resistividade para o intervalo entre 250 a 328 Ohm.m.

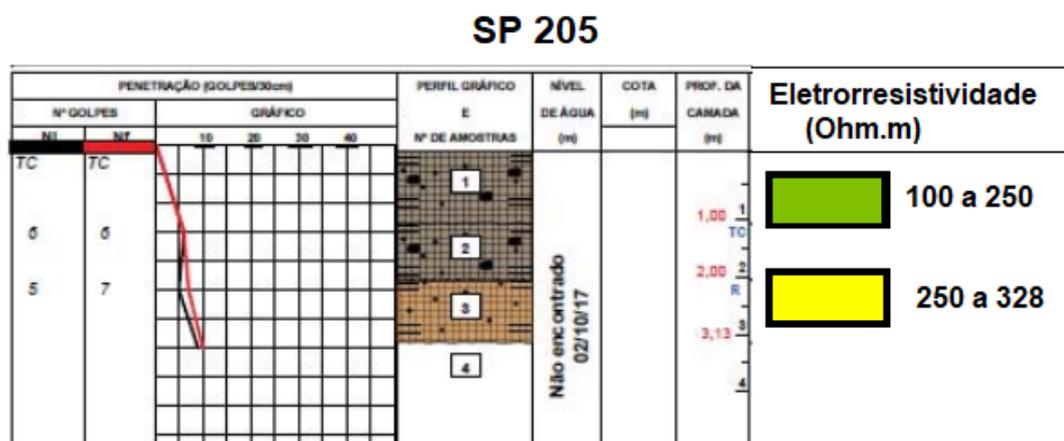


Figura 5.13 – Integração do ensaio SPT com a coluna de resistividade elétrica obtida na CE 01, na posição da estaca SP-205.

Na sondagem SP 10, até 1,97 metros foi encontrada uma camada de composição também silte arenosa, com a presença de argila, matéria orgânica e pedregulhos, de coloração marrom escura. Esta camada foi interpretada também como o provável aterro, de compactidade fofa. Comparando os valores de resistividade da primeira camada em

SP 10

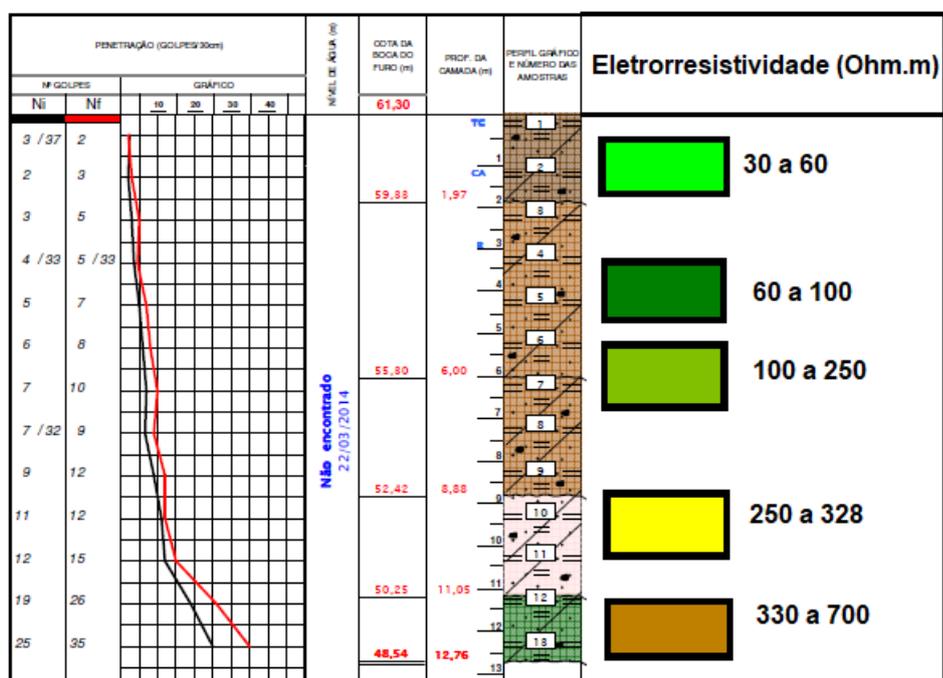


Figura 5.14 – Integração do ensaio SPT com a coluna de resistividade elétrica obtida no CE 01, na posição da estaca SP-10.

SP 205 e em SP 10, conclui-se que os valores de resistividade nesta camada são menores (30 a 60 Ohm.m), possivelmente sendo influenciados pela presença de argila e matéria orgânica.

Entre 1,97 e 6,0 metros, a amostragem revelou uma camada composta de silte arenoso apresentando pedregulhos e blocos, com maior compactação (pouco compacto) e maiores valores de resistividade 60 a 95 Ohm.m. Esta camada pode ser caracterizada como solo residual maduro.

Sotoposta a essa camada de solo residual maduro, é encontrado o solo residual jovem, na profundidade entre 6,0 a 8,8 metros. A composição é também de silte arenoso com argila e pedregulho, variegado (marrom) e medianamente compacta. Os valores de resistividade também aumentam, entre 100 e 250 Ohm.m.

Entre 8,0 e 11,05 metros, o solo residual jovem aumenta ligeiramente sua resistência (de 12 para 15 golpes) e sua coloração varia de marrom para cor de rosa. Os valores de resistividade também aumentam, na ordem de 250 a 328 Ohm.m.

A partir de 11,05 metros é encontrado silte arenoso com alteração de rocha, variegado (verde) e de compactidade compacta com valores de resistividade entre 330 a 700 Ohm.m. A sondagem é finalizada em 12,76 metros.

A Figura 5.15 e a Figura 5.16 correspondem, respectivamente, as estacas SP 14 e SP 13, localizadas na área correspondente à Linha 03.

Em SP 14 é encontrado um material composto por silte arenoso com argila, com pedregulhos e entulho, de coloração marrom escuro, identificada como sendo o provável aterro. Essa camada persiste até 1,97 metros e possui compactidade fofa, com valores de resistividade entre 70 e 95 Ohm.m.

A partir de 1,97 até 3,98 metros é encontrada uma camada de silte argiloso com areia e pedregulhos, de coloração marrom e consistência mole a média, sendo identificada como sendo solo residual maduro e com valores de resistividade entre 95 a 131 Ohm.m.

Entre 3,98 e 6,14 metros é encontrada uma camada de silte arenoso com argila e pedregulhos, de coloração rosa. A compactidade dessa camada aumenta (medianamente compacta) em relação à camada anterior e pode ser identificada como sendo o solo residual jovem. O aumento na resistência é acompanhado por um aumento na resistividade, com valores entre 132 a 200 Ohm.m.

Sotoposta a essa camada, foi encontrado silte arenoso com fragmentos de rocha alterada e mica, de coloração marrom, sendo correspondente ao solo de alteração de rocha. Com compactidade medianamente compacta e valores de resistividade entre 200 a 250 Ohm.m. A sondagem é finalizada em 7,68 metros.

SP 14

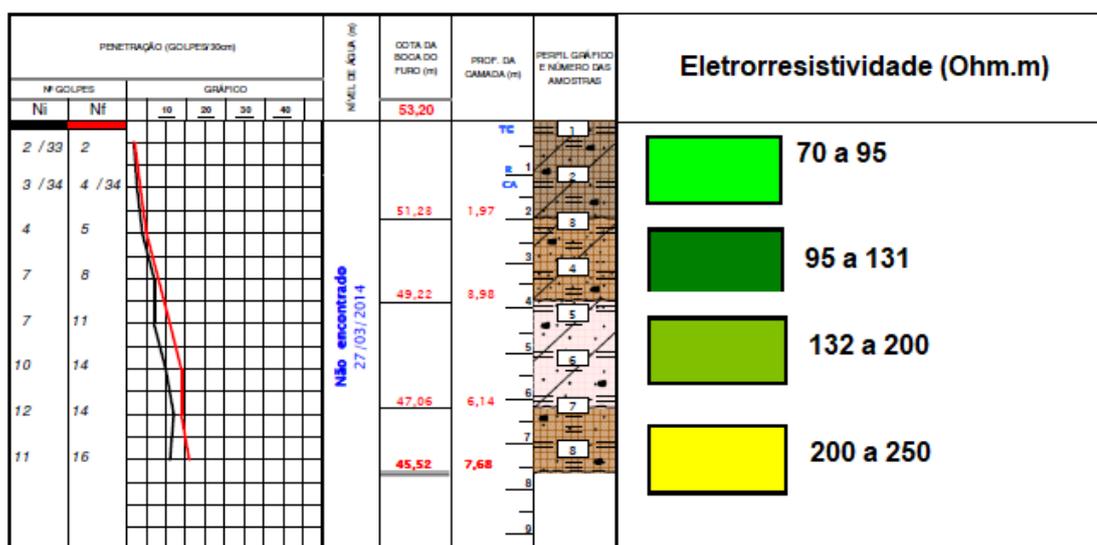


Figura 5.15 – Integração do ensaio SPT com a coluna de resistividade elétrica obtida na Linha 03, na posição da estaca SP-14.

SP 13

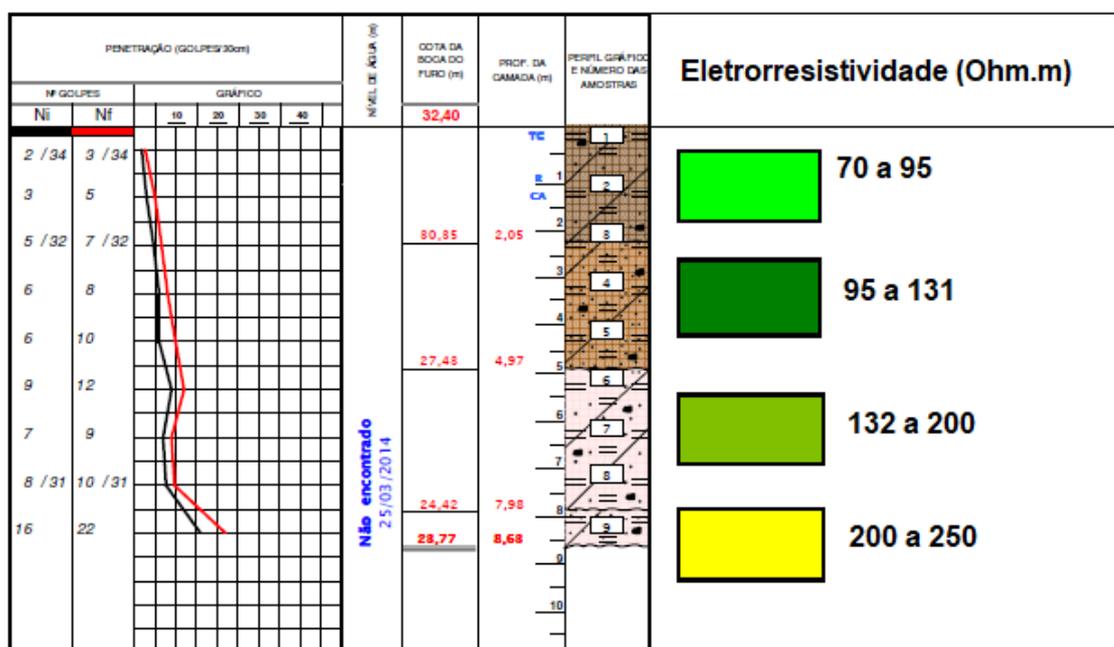


Figura 5.16 – Integração do ensaio SPT com a coluna de resistividade elétrica obtida na Linha 03, na posição da estaca SP-13.

Em SP 13, a camada de provável aterro se estende até aproximadamente 2,05 metros, possuindo composição semelhante à primeira camada de SP 14: silte arenoso com argila, pedregulhos e entulho, de coloração marrom escura. A resistência dessa camada vai de fofa a pouco compacta e possui valores de resistividade entre 70 a 95 Ohm.m.

Entre 2,05 e 4,97 metros é encontrada uma camada de silte argiloso com areia e pedregulhos, de coloração marrom. A consistência dessa camada sofre um aumento (média) e é acompanhado por um aumento nos valores de resistividade da ordem de 95 a 131 Ohm.m. Esta camada pode ser identificada como um solo residual maduro.

Sotoposta a esta camada e até 7,98 metros, foi encontrado novamente o silte arenoso com argila e com pedregulhos, variegado (cor de rosa), de compactidade medianamente compacta, tendo o número de golpes sofrido uma ligeira diminuição. Os valores de resistividade estão entre 132 a 200 Ohm.m e esta camada se caracteriza como um solo residual jovem.

A partir de 7,98 metros é encontrada uma camada composta por solo argiloso com areia, pedregulhos e mica, de coloração rosa e de compactidade compacta. O aumento de resistência é acompanhado de aumento nos valores de resistividade da ordem de 200 a 250 Ohm.m e esta camada se caracteriza como alteração de rocha. A sondagem é finalizada em 8,63 metros.

5.4 Correlação entre valores de N_{SPT} e resistividade elétrica

Para estabelecer a correlação entre valores de N_{SPT} e resistividade elétrica em cada área de estudo foram desenvolvidos, a princípio, diagramas de dispersão individuais para cada uma das SPTs presentes nesta pesquisa.

Posteriormente, para cada área, foram adotadas as estratégias de agrupar dados de sondagens próximas umas das outras e que representassem materiais de composições semelhantes em um mesmo diagrama, o que possibilitou definir para cada tipo de solo uma relação situ-específica representada pela equação de regressão linear.

Finalmente, foi observada, através da análise dos coeficientes de determinação, qual estratégia adotada garantiu uma melhor correlação entre as variáveis estudadas.

5.4.1 Área I

As quatro sondagens presentes nesta área (Figura 5.1) foram divididas inicialmente em dois diagramas de dispersão. O critério adotado foi agrupar as sondagens que estavam próximas umas das outras e descreviam materiais de composição semelhantes. Dessa forma, os valores de N_{SPT} das sondagens E-56 e E-60 e seus respectivos valores de resistividade elétrica foram agrupados no digrama da Figura 5.17 e o mesmo foi feito para as sondagens E-62 e E-64 no diagrama da Figura 5.18.

No primeiro gráfico é possível identificar uma correlação positiva entre as variáveis analisadas, sendo a equação de regressão dada por $y = 0,093x + 2,75$ e o seu coeficiente de determinação (R^2)=0,97.

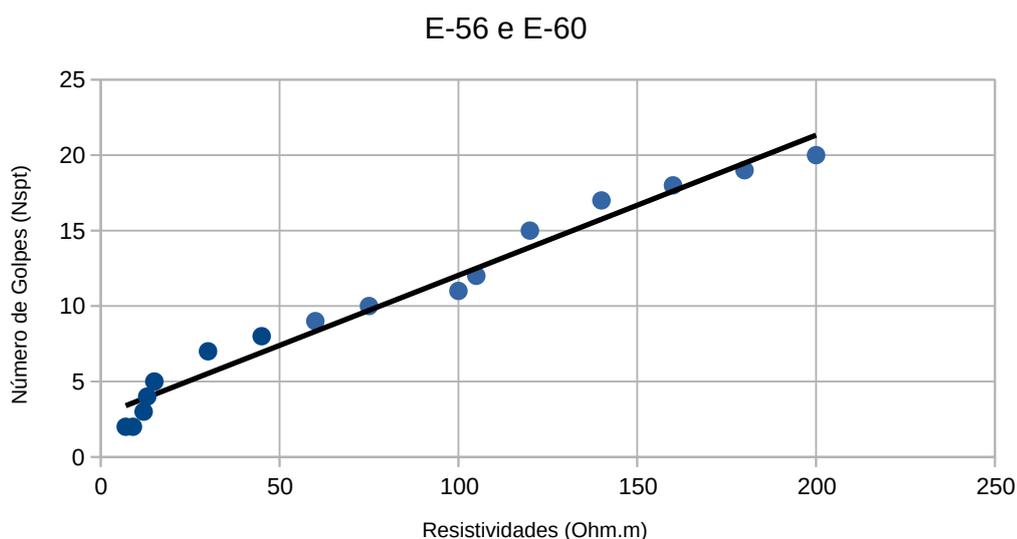


Figura 5.17 – Diagrama de dispersão entre o Número de Golpes e Resistividades referente às estacas E-56 e E-60.

No segundo diagrama também é constatada uma correlação positiva entre as variáveis nestes locais sendo a equação de regressão dada por $y = 0,01x + 7,08$, com coeficiente de determinação (R^2)= 0,54. Nota-se pela diferença nos valores de coeficientes de determinação desta equação que esta correlação é mais fraca do que a encontrada para as sondagens SP E-56 e SP E-60.

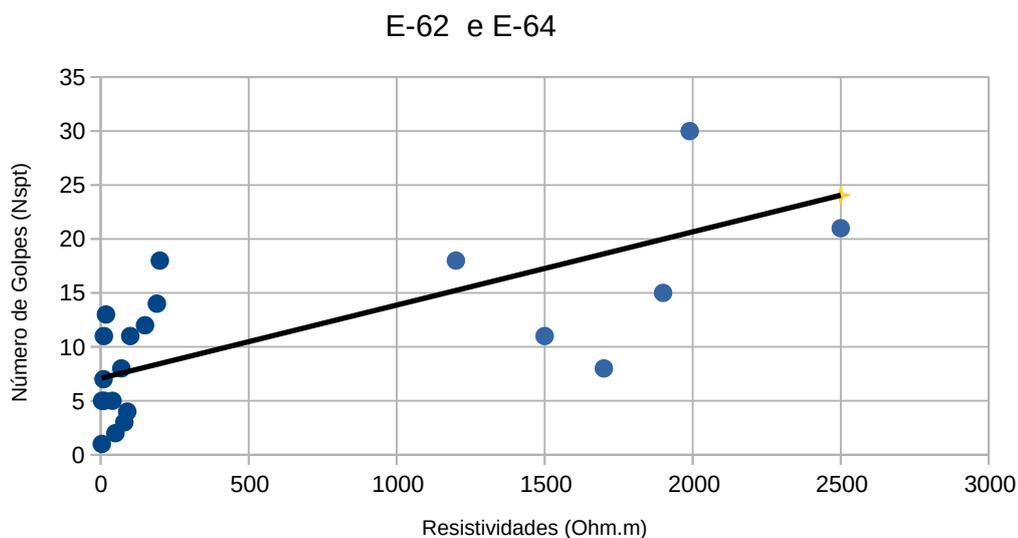


Figura 5.18 – Diagrama de dispersão entre o Número de Golpes e Resistividades referente às estacas E-62 e E-64.

É possível observar a existência de dois grupos de pontos no diagrama anterior, os quais possuem valores extremos de N_{SPT} resistividade elétrica. O primeiro grupo possui resistividades de 3 a 200 Ohm.m e N_{SPT} de 1 a 18 e o segundo grupo, resistividades de 1200 a 2000 Ohm.m e N_{SPT} de 18 a 30.

Essa grande variação nos valores das variáveis representa dois materiais de composições distoantes, os quais são atravessados pelas sondagens E-64 e E-64.

O primeiro material (que possui baixos valores de resistividade e N_{SPT}) corresponde a argila mole e com matéria orgânica e o segundo representa o solo saprólítico composto por silte arenoso com pedregulhos e fragmentos da rocha granulítica alterada.

Uma possível explicação para a diminuição do coeficiente de determinação na correlação das sondagens E-62 e E-64 é o fato da área I estar associada a zona de mangue (planície fluvial) que tem como principal característica a presença de solos salinos com variação de salinidade em profundidade.

As variações de resistividade elétrica do material descrito acima como argila mole, saturada e rica em matéria orgânica podem refletir as variações de salinidade na água salobra, responsável por saturar o solo.

Como visto na seção 3.1, a correlação entre resistividade elétrica e o N_{SPT} é afetada pela salinidade do fluido de saturação em profundidade pois somente a resistividade elétrica é sensível a mudança desse parâmetro.

Como esta área se caracteriza por ser uma zona alagada e portanto muito influenciada pelo nível d'água foram gerados diagramas de dispersão agrupando os valores de N_{SPT} provenientes das sondagens E-56, E-60, E-62, E-64 e seus respectivos valores de resistividade elétrica de acordo com a posição em relação ao N.A. Dados que representassem materiais de composição semelhantes, localizados acima do N.A, foram agrupados no diagrama da Figura 5.19 e, localizados abaixo do N.A, no diagrama da Figura 5.20.

No diagrama da Figura 5.19 são apresentadas duas tendências de comportamento que foram identificadas como sendo o solo argiloso saturado rico em matéria orgânica (pontos com valores de N_{SPT} entre 0 e 6 e valores de resistividades entre 3 a 12 Ohm.m) e a camada de aterro (com valores de N_{SPT} entre 3 a 10 e valores de resistividade entre 20 a 95 Ohm.m).

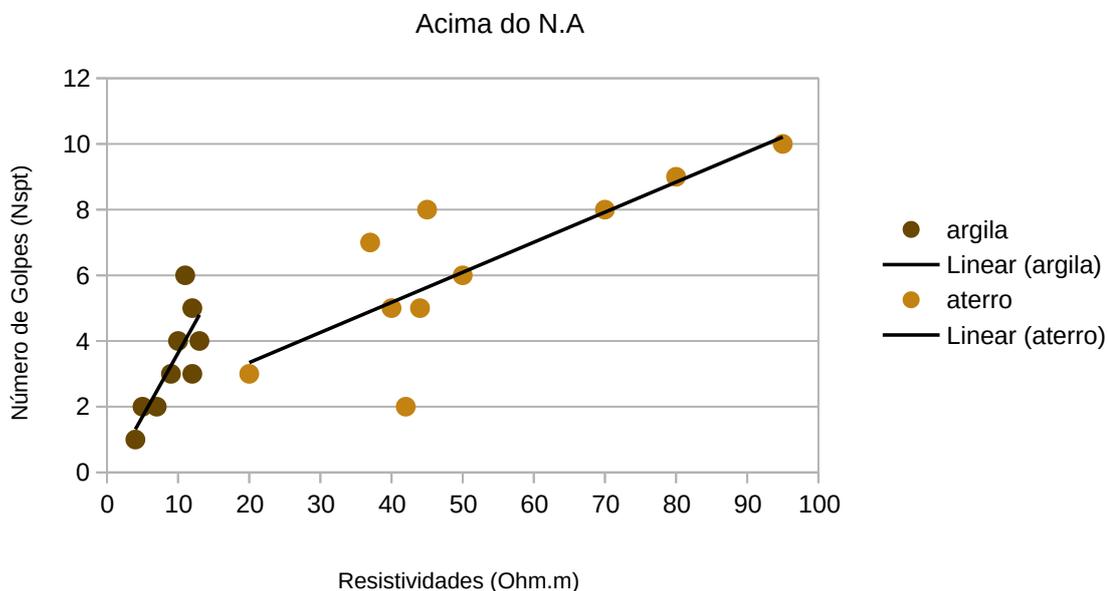


Figura 5.19 – Diagrama de dispersão que agrupa os dados das sondagens da área I com relação a posição acima do nível d'água.

Para a camada de aterro composta por solo silte argiloso com areia fina e média com pedregulhos foi encontrada uma correlação positiva entre as variáveis em análise,

sendo representada pela equação de regressão linear dada por $y = 0,09x + 1,50$, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,64.

Para a camada de argila siltosa com areia fina e média e pedregulhos foi também estabelecida uma correlação positiva, representada pela equação de regressão linear dada por $y = 0,38x - 0,24$ e coeficiente de determinação (R^2) de 0,63.

No diagrama da Figura 5.20 foram apresentadas outras duas tendências de comportamento, identificadas como sendo a camada de silte arenoso (com valores de N_{SPT} entre 10 e 20, aproximadamente, e valores de resistividade elétrica entre 100 a 250 Ohm.m) e o saprolito de origem granulítica (com valores de N_{SPT} entre 19 e 26, aproximadamente, e valores de resistividade entre 1200 a 2500 Ohm.m).

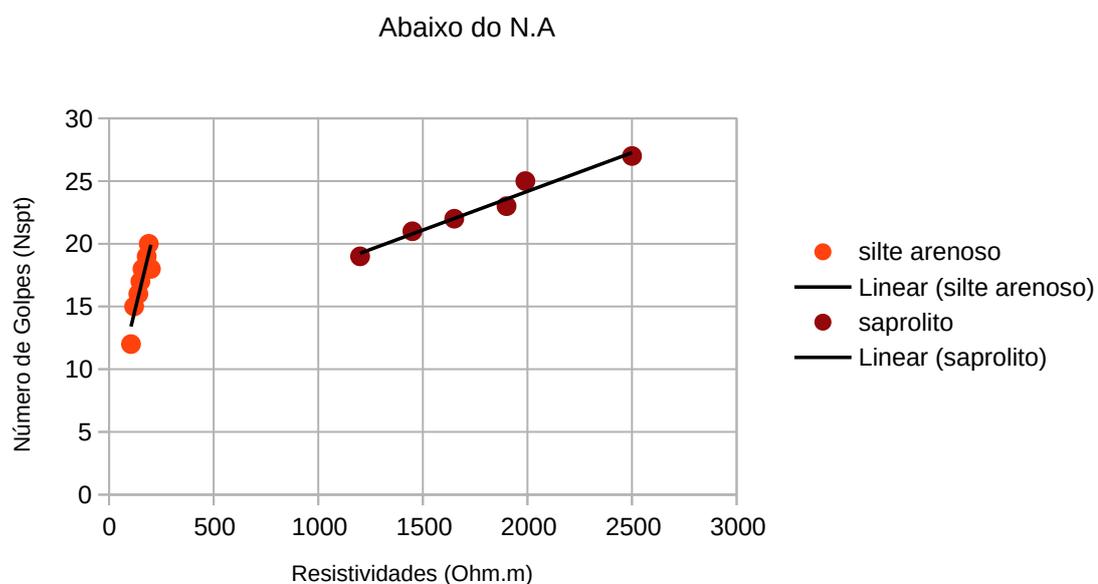


Figura 5.20 – Diagrama de dispersão que agrupa os dados das sondagens da área I com relação a posição abaixo do nível d'água.

Com relação à camada de silte arenoso a areia fina e média com pedregulhos foi estabelecida uma correlação positiva entre as variáveis em estudo, representada pela equação de regressão linear dada por $y = 0,07x + 6,20$ e com coeficiente de determinação (R^2) de 0,83.

Finalmente para o solo saprolítico, composto por silte arenoso com pedregulhos e fragmentos de rocha granulítica, foi encontrada também uma correlação positiva, repre-

sentada pela equação de regressão linear dada por $y = 0,006x + 11,38$ e com coeficiente de determinação (R^2) de 0,97.

Portanto, é possível notar que a correlação entre o N_{SPT} e a resistividade elétrica é fortemente influenciada pelo nível d'água. Os coeficientes de determinação são menores para solos parcialmente a totalmente saturados com água salobra, comportamento observado por SUDHA *et al.* (2009). À medida que a porosidade diminui e a compactação aumenta em profundidade, o grau de relacionamento entre as variáveis estudadas também aumenta.

De acordo com os resultados é possível notar que foram encontrados maiores valores de R^2 entre os valores de N_{SPT} e resistividade elétrica quando a estratégia adotada foi agrupar os dados de todas as sondagens da área I em dois diagramas de dispersão, levando em consideração a posição dos dados com relação ao N.A do que quando foi feita a tentativa de agrupar os dados das sondagens que estavam próximas umas das outras e que atravessavam materiais de composição semelhantes.

5.4.2 Área II

Foram criados inicialmente dois diagramas de dispersão para representar os dados da área II. A estratégia adotada foi agrupar os dados das sondagens SP 201 e 202, as quais estavam localizadas próximas, uma da outra, na crista do talude (Figura 4.22) e que pela descrição do boletim de sondagem atravessavam materiais de composição semelhante no diagrama da Figura 5.21. Seguindo a mesma filosofia, os dados das sondagens SP 204, SP 205 e SP 206, localizadas no platô do talude foram agrupadas em outro diagrama (Figura 5.22).

Na Figura 5.21 é possível notar que diferentemente dos outros gráficos apresentados até então temos uma correlação negativa entre o número de golpes e os valores de resistividade elétrica. A equação de regressão linear para essa correlação é dada por $y = -0,24x + 29,11$, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,71.

A Figura 5.22 apresenta uma correlação novamente positiva entre as variáveis estudadas, com equação de regressão linear dada por $y = 0,25x - 7,70$ e com coeficiente de determinação (R^2) de 0,98.

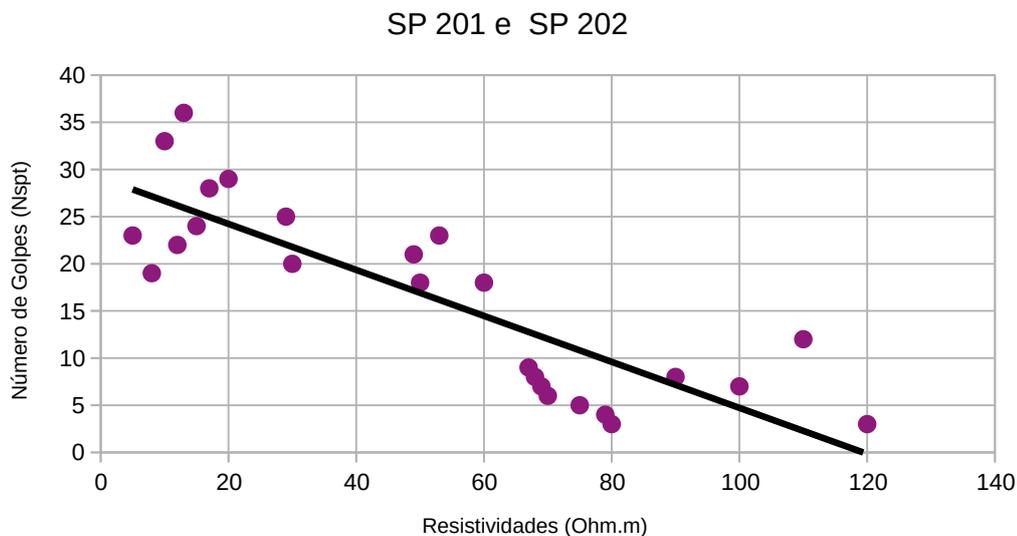


Figura 5.21 – Diagrama de dispersão que agrupa dados das sondagens SP 201 e SP 202, além de valores de resistividades provenientes do caminhamento elétrico I realizado na crista do talude.

A correlação negativa encontrada na Figura 5.21 já era esperada ao observar a análise qualitativa individual dessas sondagens que concluiu que o N_{SPT} e a resistividade elétrica são grandezas que variam de forma inversa. Este fenômeno pode ser explicado pela mineralogia da rocha mãe, o folhelho, o qual possui grande concentração de minerais trilaminares, de textura argilosa, alta superfície específica e capacidade de troca catiônica (CTC).

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) da argila forma uma nuvem de íons adicionais em cada partícula do argilomineral, facilitando o fluxo de corrente e gerando baixos valores de resistividade elétrica. Com a transição do solo massapê para a rocha folhelho alterada/fraturada a sã, a resistência à penetração do material aumenta, à medida que os valores de resistividade elétrica diminuem.

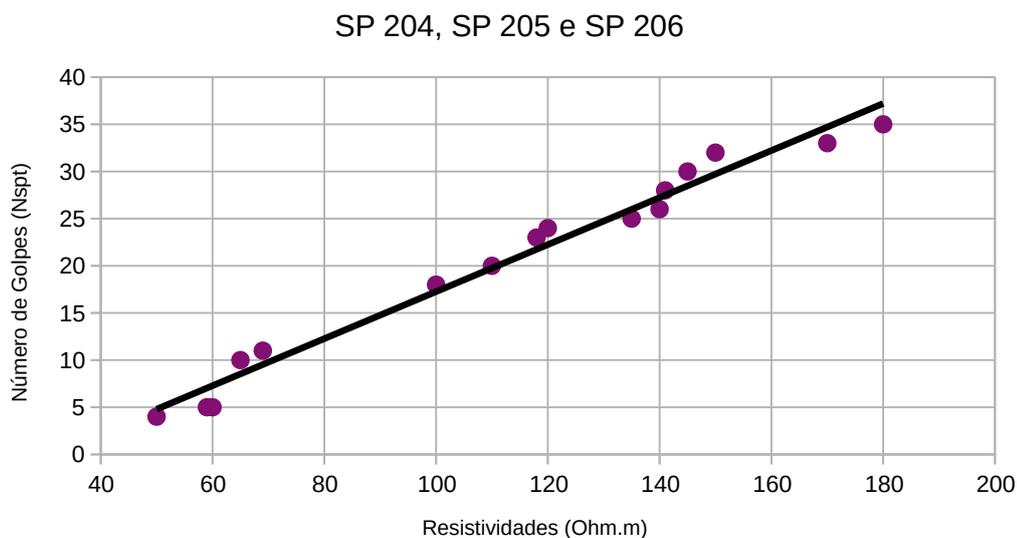


Figura 5.22 – Diagrama de dispersão que agrupa dados das sondagens SP 204, SP 205 e SP 206, além de valores resistividades provenientes do caminhamento elétrico II realizado no platô do talude.

Como é possível notar na Figura 5.6, a zona onde estão localizadas as sondagens SP 204, SP 205 e SP 206 no CE 02 se caracteriza por ter altos valores de resistividade e valores crescentes de N_{SPT} . Foi observado na análise qualitativa a presença de um material composto por silte arenoso com argila e fragmentos de rocha alterada com altos valores de resistividade e N_{SPT} nesta região.

Devido ao fato de terem sido encontradas correlações negativa e positiva no momento em que as sondagens foram agrupadas seguindo o critério de atravessarem materiais de composição semelhantes, foi adotada a estratégia de criar diagramas de dispersão para cada tipo de solo encontrado na área II.

Primeiramente, na camada de aterro descrita como sendo composta de silte arenoso com argila a silte argiloso (Figura 5.23) é encontrada uma correlação positiva, com a equação de regressão linear dada por $y = 0,76x - 39,00$ e coeficiente de determinação (R^2) de 0,77.

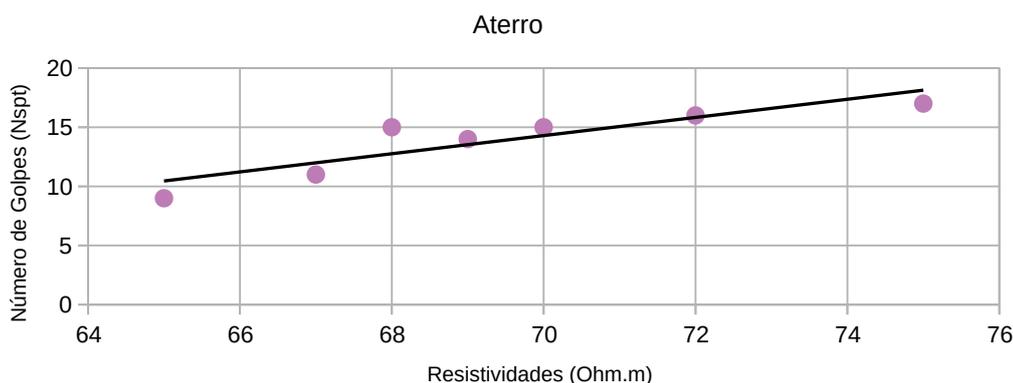


Figura 5.23 – Diagrama de dispersão referente a camada de aterro da área II.

Para o silte arenoso com argila e fragmentos de rocha alterada, identificado no início como matacão, (Figura 5.24) tem-se uma correlação positiva com a equação de regressão linear dada por $0,20x - 0,19$ e coeficiente de determinação (R^2) de 0,90.

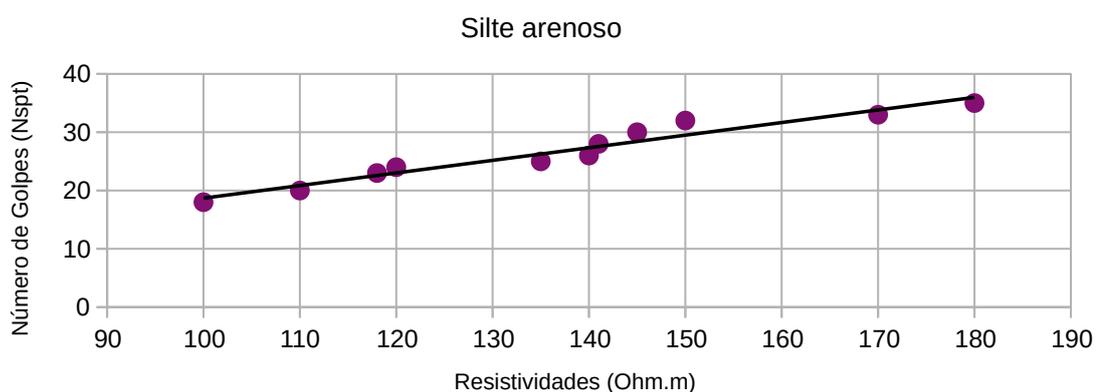


Figura 5.24 – Diagrama de dispersão referente ao silte arenoso com argila e fragmentos de rocha alterada.

Finalmente, os dados referentes ao perfil de alteração indo da camada saprolítica até a camada de folhelho alterado foram agrupados em um só diagrama (Figura 5.25). Da mesma forma que na Figura 5.21, a correlação encontrada é negativa, o que ressalta a influência de teores significativos de minerais trilaminares como reportado por Simões e Costa Filho (1981) no diagrama da Figura 5.22. A equação de regressão linear é dada por $y = -0,14x + 27,80$ com coeficiente de determinação (R^2) de 0,82.

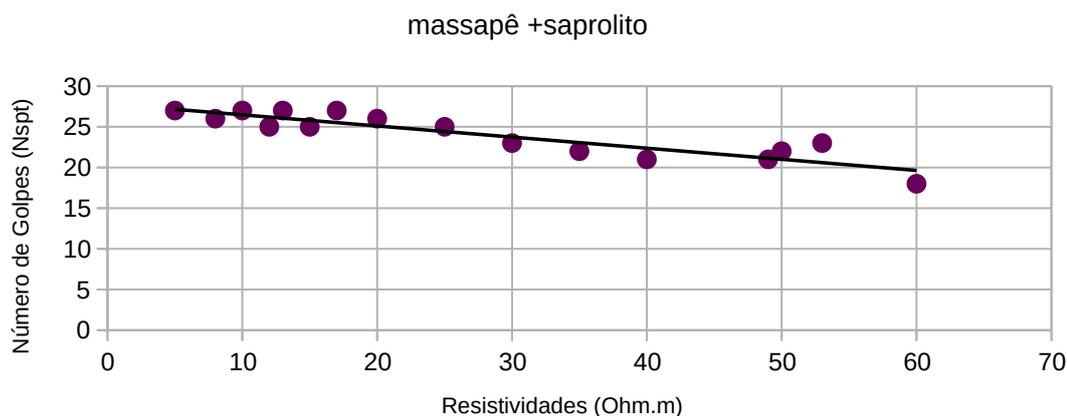


Figura 5.25 – Diagrama de dispersão referente a camada de massapê e saprolito (folhelho).

De acordo com análise dos resultados, é possível obter maiores valores de R^2 quando a estratégia adotada para agrupar os dados é a criação de diagramas de dispersão para cada tipo de solo, possibilitando comprovar que a correlação entre as variáveis exibe comportamento diferenciado apenas para o solo massapê e saprolito.

5.4.3 Área III

Na área III os dados das sondagens SP 205, SP 10, SP 14 e SP 13 foram divididos em dois diagramas de dispersão adotando a estratégia de agrupar dados de materiais com composição semelhantes. Na Figura 5.26 tem-se o diagrama referente às sondagens SP 205 e SP 10 e os seus respectivos valores de resistividade elétrica provenientes do CE 01 e na Figura 5.27 tem-se o diagrama referente às sondagens SP 14 e SP 13 e os respectivos valores de resistividade elétrica provenientes do CE 03.

De acordo com diagrama da Figura 5.26 uma correlação positiva entre o N_{SPT} e os valores de resistividade elétrica foi estabelecida, cuja equação de regressão linear é dada por $y = 0,05x + 0,21$ e coeficiente de determinação (R^2) de 0,90.

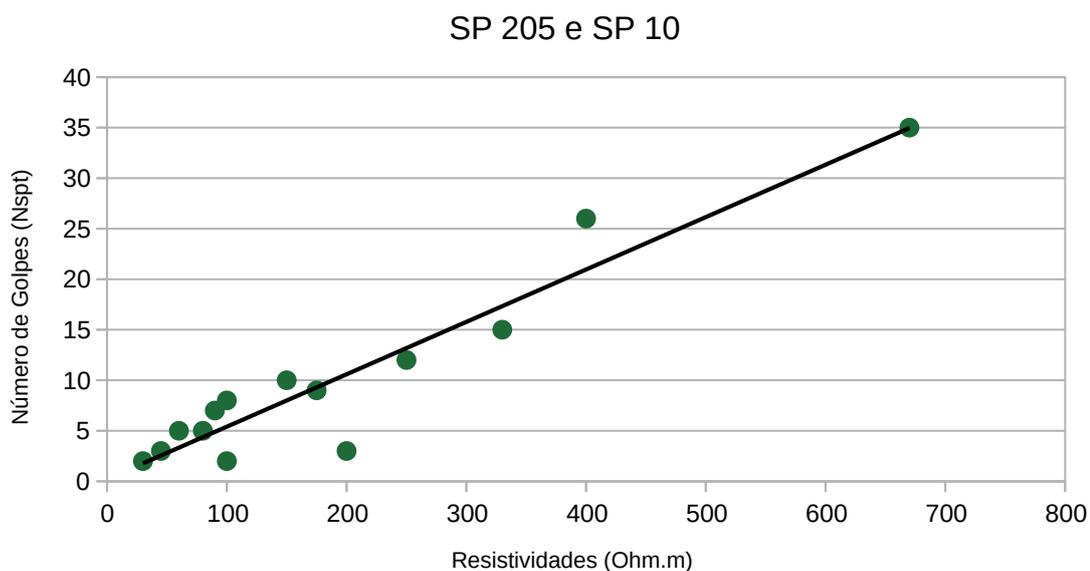


Figura 5.26 – Diagrama de dispersão que agrupa dados das sondagens SP 205 e SP 10 além dos valores de resistividade elétrica provenientes do CE 01 realizado na Praça.

Para o diagrama da Figura 5.27 uma correlação positiva entre as variáveis em estudo também foi estabelecida, cuja equação de regressão linear é dada por $y = 0,094x - 4,61$ com coeficiente de determinação (R^2) de 0,86.

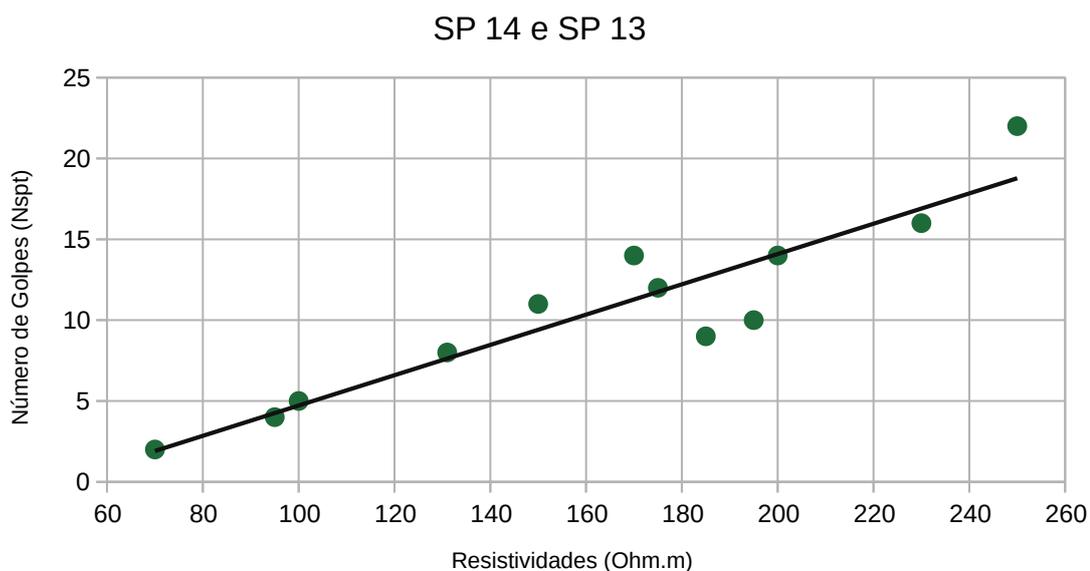


Figura 5.27 – Diagrama de dispersão que agrupa dados das sondagens SP 14 e SP 13 além de valores resistividades provenientes do CE 03 realizado no quintal da casa.

Para o caso da Área III, devido a semelhança no comportamento obtido em termos de NSPT x resistividade elétrica, todas as sondagens foram agrupadas em um só diagrama (Figura 5.28). Conforme se pode observar, obtém-se uma correlação positiva entre os valores de NSPT e os valores de resistividade elétrica. A equação de regressão linear para a área III é dada por $y = 0,04x + 1,94$ com coeficiente de determinação (R^2) de 0,97.

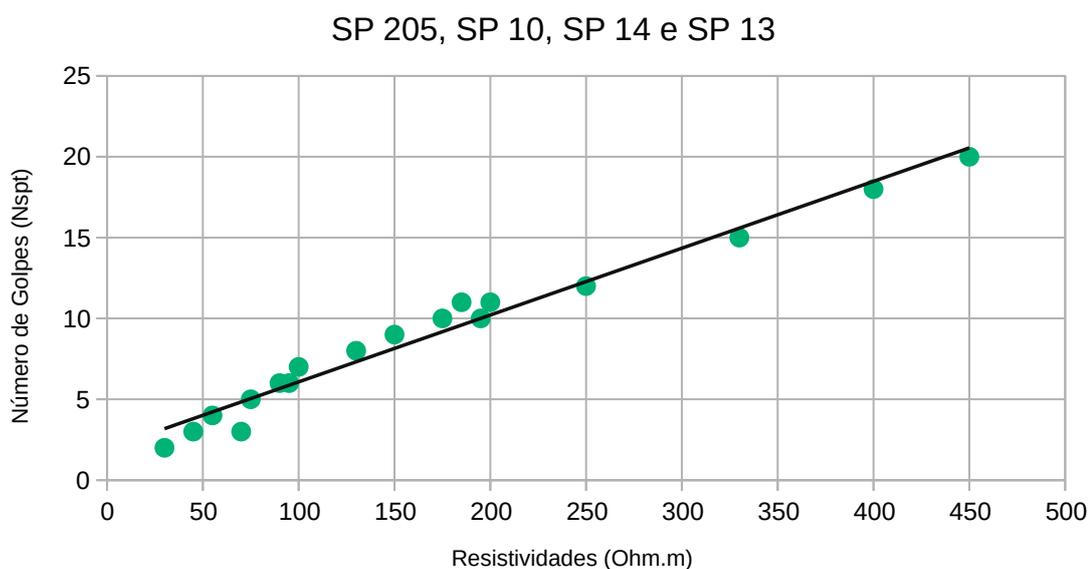


Figura 5.28 – Diagrama de dispersão agrupando todas as sondagens da área III.

Apesar dos bons resultados de ajuste obtidos para a Área III, como realizado para as duas áreas anteriores, foi adotado o procedimento de agrupar os dados para cada tipo de solo encontrado na área.

Na camada superficial inconsistente, saturada (presença de vazamentos na linhas de esgoto) e composta por silte arenoso com argila, pedregulhos, entulhos e restos vegetais, identificada como sendo o aterro foi estabelecida uma correlação positiva entre o N_{SPT} e os valores de resistividade elétrica (Figura 5.29) A equação de regressão linear é dada por $y = 0,08x - 0,28$ com coeficiente de determinação (R^2) de 0,95.

Por fim, os dados referentes ao solo residual (silte argiloso com areia a silte arenoso com argila) foram agrupados com os dados do solo saprolito (alteração de rocha granulítica) em um único diagrama (Figura 5.30) e desta forma foi encontrada uma correlação

positiva com equação de regressão linear dada por $y = 0,05x - 1,85$ e coeficiente de determinação (R^2) de 0,95.

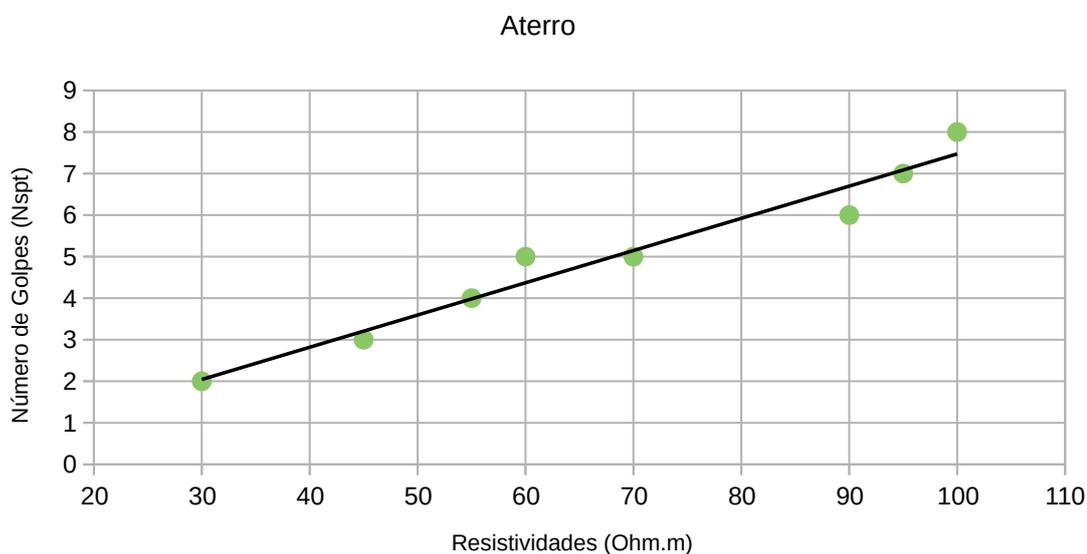


Figura 5.29 – Diagrama de dispersão referente à camada de aterro da área III.

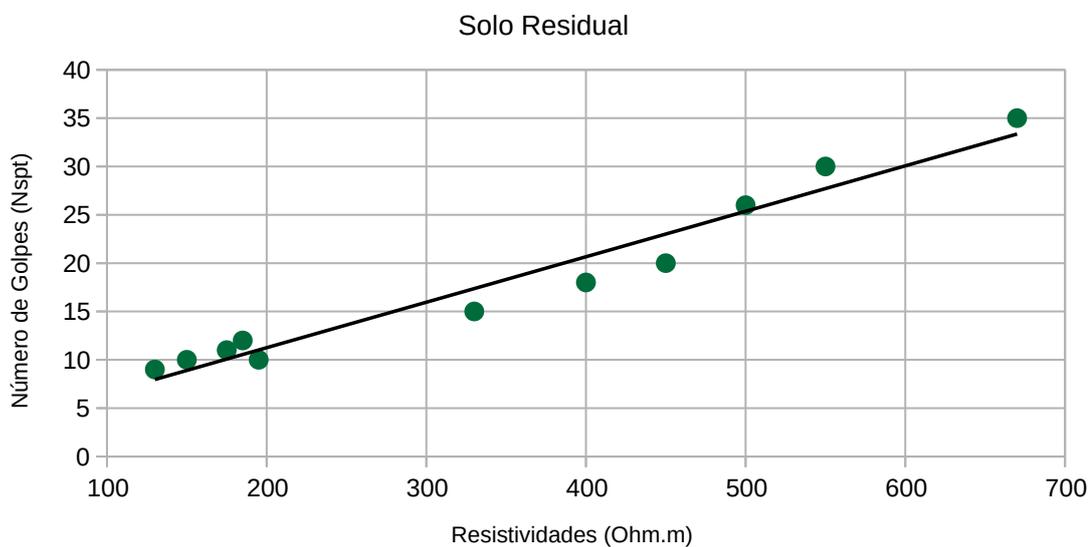


Figura 5.30 – Diagrama de dispersão referente ao solo residual e saprolito de origem granulítica.

De acordo com os resultados encontrados é possível notar que não houve aumento nos valores de R^2 entre o N_{SPT} e resistividade elétrica quando foi adotada a estratégia de

agrupar os dados das sondagens por tipo de solo em diagramas de dispersão individuais como aconteceu para a área II, possibilitando que os dados de todas as sondagens fossem agrupados em um único diagrama de dispersão com R^2 de 0,97.

Os dados provenientes dos diagramas para cada solo encontrado nas áreas de estudo desta pesquisa foram sintetizados na Tabela 5.1, onde é possível observar os valores dos coeficientes das equações de regressão linear, a descrição de cada tipo de solo, o coeficiente de determinação, a posição com relação ao nível d'água, a faixa N_{SPT} e, quando pertinente, a rocha-mãe.

Tabela 5.1 – Quadro-Resumo com todas as informações provenientes dos diagramas de dispersão para cada um dos solos encontrados nesta pesquisa.

Área	Coef. Angular	Coef. Linear	Descrição do solo	Coef. de Determinação	Posição com relação ao N.A	Faixa N_{spt}	Rocha-mãe
I	0,38	-0,24	Argila siltosa com areia fina e matéria orgânica (ARGILA MOLE)	0,63	Acima	$1 < N_{spt} < 6$	
I	0,09	1,50	Silte argiloso com areia fina e média com pedregulhos (ATERRO)	0,64	Acima	$6 < N_{spt} < 10$	
I	0,07	6,20	Silte arenoso a areia fina e média com pedregulhos	0,83	Abaixo	$12 < N_{spt} < 18$	
I	0,006	11,38	Silte arenoso com pedregulhos e fragmentos de rocha (SAPROLITO)	0,97	Abaixo	$19 < N_{spt} < 27$	Granulito
II	0,76	-39,00	Composição variando de silte arenoso com argila a silte argiloso (ATERRO)	0,77	Acima	$9 < N_{spt} < 17$	
II	0,20	-0,19	Silte arenoso com argila e fragmentos de rocha alterada (SILTE ARENOSO)	0,90	Acima	$18 < N_{spt} < 35$	Bolsão de material arenoso
II	-0,14	27,80	Argila siltosa (massapê) e folhelho alterado a decomposto até a rocha são (SAPROLITO)	0,82	Abaixo	$18 < N_{spt} < 27$	Folhelho
III	0,08	-0,28	Camada superficial inconsistente, saturada, silte arenoso com argila, pedregulhos, entulho e restos vegetais (ATERRO)	0,95	Acima	$N_{spt} < 5$	
III	0,05	1,85	Silte argiloso com areia a silte arenoso com argila a solo de alteração de rocha (SOLO RESIDUAL+SAPROLITO)	0,95	Abaixo	$N_{spt} > 15$	Granulito

5.4.4 Análise do comportamento dos coeficientes das equações de regressão

Como observado por SUDHA *et al.* (2009), os coeficientes da equação de regressão para um determinado tipo de solo refletem a composição litológica, a variação da textura e o conteúdo de argila.

Para verificar se esses resultados também poderiam ser observados neste estudo foram analisadas, através da Tabela 5.1, as possíveis correlações entre os valores dos coeficientes angular e linear com os fatores apontados acima.

5.4.4.1 Coeficiente Linear

Foram plotados diagramas de dispersão com os valores dos coeficientes lineares das relações situ-específicas encontradas na Tabela 5.1 e o respectivo valor de $N_{SPT\text{médio}}$ de cada Faixa de N_{SPT} (Figura 5.31) e Resistividade Média (Figura 5.32).

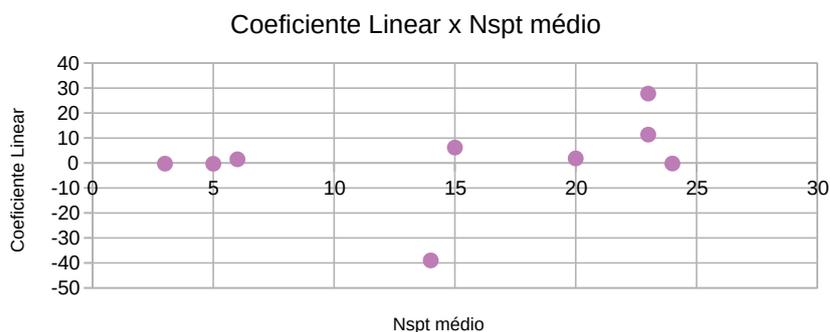


Figura 5.31 – Diagrama de Dispersão entre o Coeficiente Linear e $N_{SPT\text{médio}}$

No entanto, os diagramas mostraram que não foi possível estabelecer uma correlação entre as variáveis analisadas.

Além disso, analisando a Tabela 5.1 não foram encontradas correlações envolvendo este coeficiente e a variação da composição litológica, textura ou conteúdo de argila.

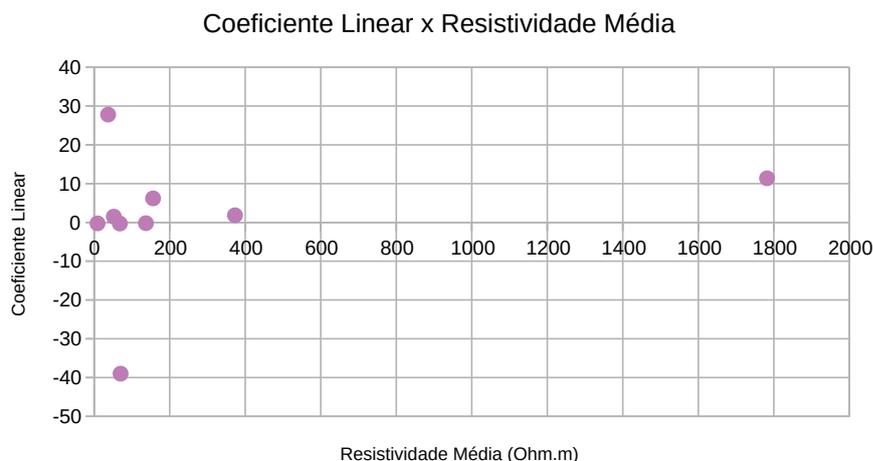


Figura 5.32 – Diagrama de Dispersão entre o Coeficiente Linear e a Resistividade Média

5.4.4.2 Coeficiente Angular

A respeito dos coeficientes angulares das relações situ-específicas encontradas na Tabela 5.1 foi possível observar que:

- Valores negativos de coeficiente angular indicaram, neste caso, ocorrência de transição do solo residual para a rocha folhelho enquanto que valores baixos do coeficiente angular, porém positivos, são indicativos de transição de um solo residual para rocha granulito;
- Para uma mesma área, quanto maior o N_{SPT} menor o coeficiente angular, podendo concluir que são grandezas que variam de forma inversa;
- O único valor de coeficiente angular negativo encontrado nesta pesquisa representa o caso especial do solo massapê, evidenciando a influência da ocorrência de teores significativos de minerais trilaminares, como reportado por Simões e Costa Filho (1981), de textura argilosa e alta superfície específica nos valores do coeficiente angular;
- Embora não tenham sido feitas análises granulométricas dos solos apresentados, pela descrição tátil-visual dos resultados de sondagens pode-se afirmar que frações mais grossas do solo possuem menores valores de coeficientes angulares e frações mais finas, maiores valores.

Como realizado para os coeficientes lineares, foram plotados diagramas de dispersão com os valores dos coeficientes angulares das relações situ-específicas encontradas na Tabela 5.1 e o respectivo valor de $N_{SPT\text{médio}}$ (Figura 5.33) e resistividade média (Figura 5.34). Deve-se salientar que os valores correspondentes à transição do massapê para o folhelho foram excluídos desta análise pois destoaram dos valores para outros tipos de solo.

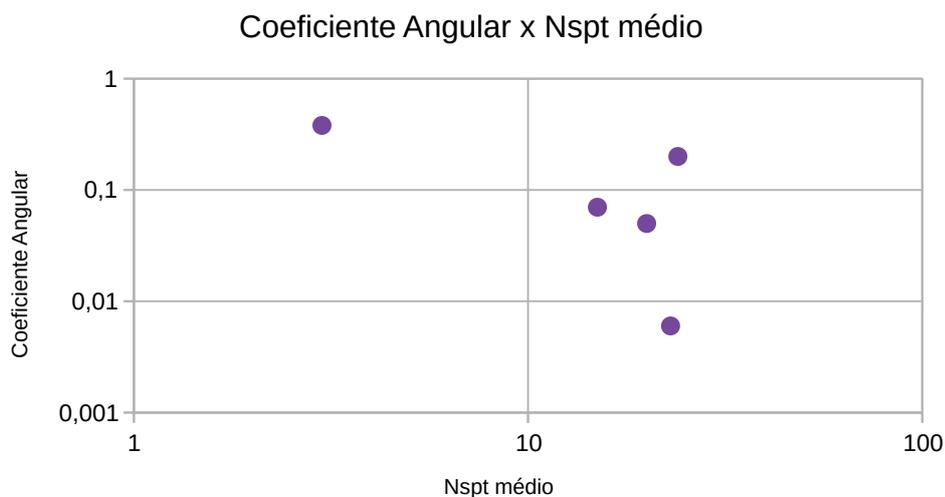


Figura 5.33 – Diagrama de Dispersão entre o Coeficiente Angular e $N_{SPT\text{médio}}$.

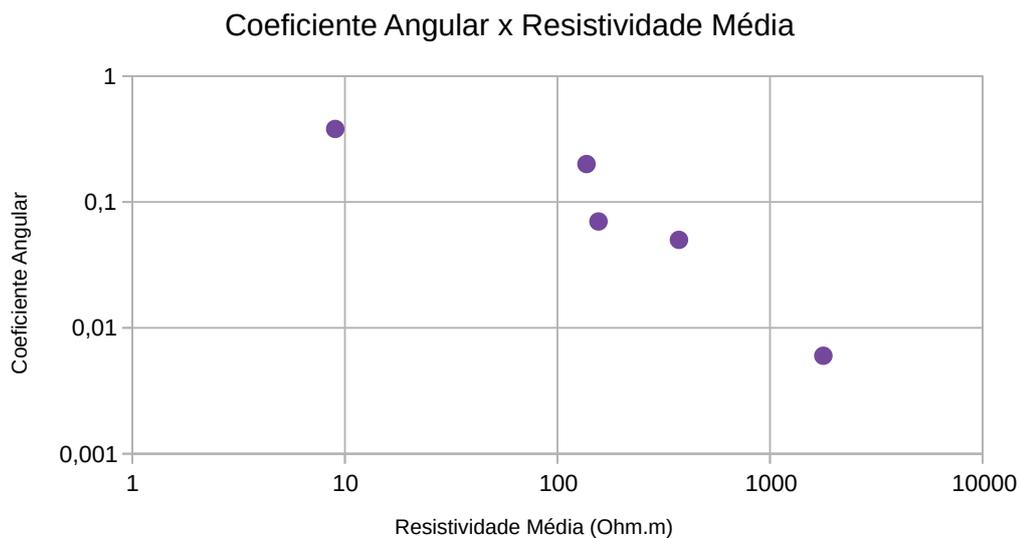


Figura 5.34 – Diagrama de Dispersão entre o Coeficiente Angular e a Resistividade Média.

Observando a Figura 5.33 e a Figura 5.34 conclui-se que existe uma correlação inversa entre o coeficiente angular e o $N_{SPT_{medio}}$, contudo a dispersão observada na Figura 5.33 é maior do que no diagrama da Figura 5.34.

Para os dados apresentados na Figura 5.34 foram realizadas duas tentativas de ajuste da curva dos dados experimentais. A primeira tentativa (Figura 5.35) representa os resultados obtidos com a Equação 5.1:

$$f(x) = a \cdot e^{-b \cdot \ln x} \quad (5.1)$$

Após a realização da regressão utilizando o método dos mínimos quadrados (MMQ) foram encontrados os valores de a e b, assim como o coeficiente de determinação (R^2) do ajuste, sendo a equação dada por $f(x) = 2,437 \cdot e^{-0,676 \cdot \ln x}$ com R^2 de 0,84.

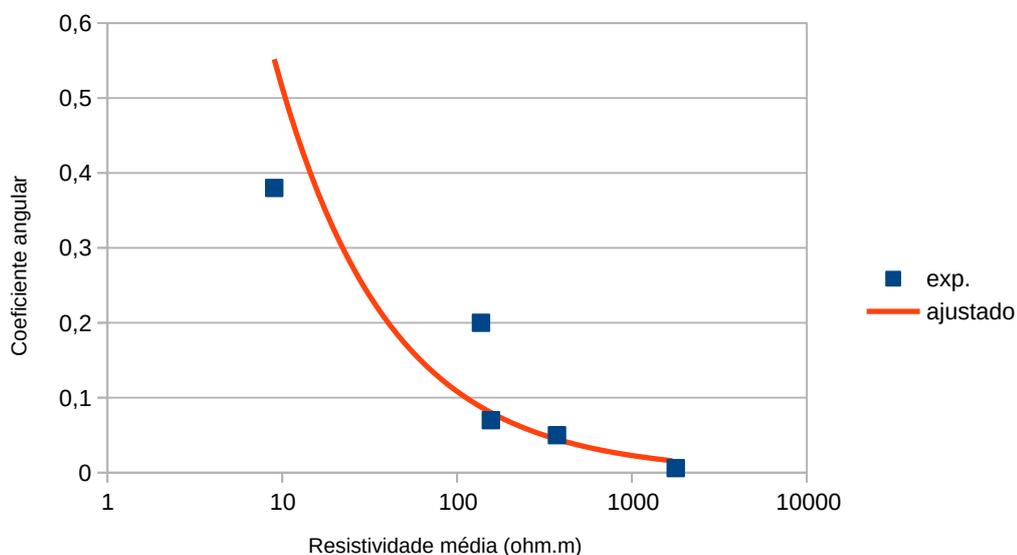


Figura 5.35 – Primeira tentativa de ajuste da curva entre o coeficiente angular e a resistividade média.

A Figura 5.36 apresenta os resultados obtidos com a eq Equação 5.2:

$$f(x) = a \cdot e^{b \cdot x^c} \quad (5.2)$$

Após a realização da regressão foram encontrados os valores de a, b e c, além do coeficiente de determinação (R^2). Através de tentativa e erro chegou-se a equação $f(x) = 1,01 \cdot e^{0,492 \cdot x^{0,3}}$, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,94.

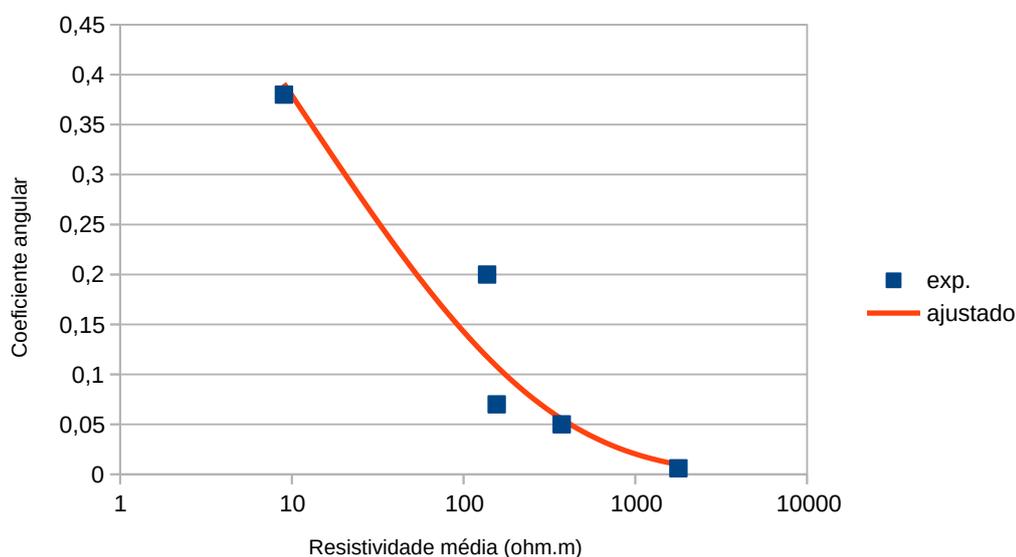


Figura 5.36 – Segunda tentativa de ajuste da curva entre o coeficiente angular e a resistividade média.

Dessa forma, pode-se concluir que a Equação 5.2 é a que melhor se ajusta a curva dos dados experimentais do coeficiente angular e da resistividade média. Além disso, podemos interpretar o comportamento dessa curva para as situações em que temos valor de resistividade igual a zero e tendendo ao infinito.

Para valores de resistividade média iguais a zero, levando em consideração a Equação 5.2, tem-se um valor limite para o coeficiente linear que neste caso é 1,01. Caso a resistividade média possua valores muito elevados, o coeficiente angular previsto pela Equação 5.2 será zero.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi aplicado o método geofísico da eletrorresistividade, utilizando a técnica de caminhamento elétrico (CE) em três diferentes locais da Região Metropolitana de Salvador, os quais possuem características geológicas-geotécnicas distintas, com o intuito de fazer uma análise qualitativa entre os resultados de sondagens SPT e os valores de resistividade elétrica, bem como procurar estabelecer correlações entre N_{SPT} e a resistividade elétrica.

De forma geral, a metodologia aplicada se mostrou como uma alternativa atrativa para a extrapolação das informações litológicas e geotécnicas em cada área pois permitiu a visualização contínua em duas dimensões (x-z) do parâmetro de resistividade elétrica, sensível a variações de porosidade, saturação, litologia e resistividade do fluido de saturação, permitindo atingir maiores profundidades de investigação do que as sondagens SPTs.

A integração das SPTs com as informações geológicas foram essenciais para que fosse possível diferenciar, em cada seção geoeletrica, a geometria das camadas de aterro superficial até a rocha sã, bem como o contato entre litologias diferentes e as variações de elevação do topo do embasamento.

A análise qualitativa mostrou que o N_{SPT} e a resistividade elétrica se comportam como grandezas variando de forma direta na maioria dos solos, aumentando seus valores com o aumento da profundidade. Contudo, na área II, essas grandezas variam de forma inversa. Pode-se concluir que, qualitativamente, a relação entre o N_{SPT} e a resistividade elétrica é influenciada pelo conteúdo de argila presente no local.

A correlação entre o N_{SPT} e a resistividade elétrica permitiu encontrar uma equação da regressão linear para cada tipo de solo (relações situ-específicas). Como reportado por SUDHA *et al.* (2009), o coeficiente de determinação da correlação entre as variáveis sofre diminuição na presença de variações na salinidade do fluido de saturação do solo, sendo este comportamento observado no material argiloso associado a zona de mangue da área I.

Os resultados das análises dos coeficientes das equações de regressão concluíram que apenas o coeficiente angular possui correlação com a composição litológica, textura e o conteúdo de argila do solo, sendo sensível à transição de mineralogia da rocha e a variação da textura em profundidade, tendo as frações mais finas do solo os maiores valores de coeficiente angular e as frações mais grossas, os menores valores.

O único valor de coeficiente angular negativo encontrado nesta pesquisa representa o caso especial da transição do massapê para o folhelho, evidenciando a influência de teores significativos de minerais trilaminares, como reportado por Simões e Costa Filho (1981), de textura argilosa, alta superfície específica e capacidade de troca catiônica nos valores dos coeficientes angulares.

Pode-se concluir que estabelecendo equações de regressão bem definidas para um determinado local pode-se usar essa relação situ-específica com o intuito de prever a variação do N_{SPT} a partir de um caminhamento elétrico e o coeficiente angular da equação pode ser usado para estimar informações de composição litológica, textura e conteúdo de argila para toda uma seção utilizando um furo de sondagem.

Deve-se atentar que a implementação da geofísica para o diagnóstico geotécnico de uma área tem caráter auxiliar, ou seja, apenas a utilização deste método indireto não é suficiente para a completa caracterização geológica-geotécnica. Contudo, o método de eletrorresistividade mostrou, através desse estudo, grande potencial para a extrapolação dos dados das sondagens SPT, sanando a deficiência na completa caracterização estrutural em projetos de engenharia civil.

7 REFERÊNCIAS

- ABNT-NBR-6484. **Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos. Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2001. 17 p.
- ABNT-NBR-7250. **Identificação e descrição de amostras de solos obtidos em sondagens de simples reconhecimento dos solos.** Rio de Janeiro, 1982. 3 p.
- ABNT-NBR-8036. **Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios.** Rio de Janeiro, 1983. 3 p.
- AMARANTE, E. M. S. **Interpretação de seções de resistividade e cargabilidade aparente.** Salvador, Brasil, 2014.
- ARAGÃO, M. Arquitetura, estilos estruturais e evolução da Bacia do Recôncavo. In: . [S.l.]: Boletim do III Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, Rio Claro, 1994. p. 165–167.
- ARAI, M. A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Geologia USP**, v. 6, n. 2, p. 1–6, 2006.
- ARCHIE, G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. **Trans. Am. Inst. Min. Metall. Eng.**, n. 146, p. 54–62, 1942.
- ARIMATHEA, J. O problema da pavimentação nos solos do Recôncavo. **Revista Rodovia**, Maio, 1958.
- BARBOSA, J.; DOMINGUEZ, J. **Texto Explicativo para o Mapa Geológico da Bahia ao Milionésimo. SICM/SGM. Edição Especial Salvador.** [S.l.: s.n.], 1996. 400p p.
- BRAGA, A. C. d. O. **Geofísica aplicada: métodos geelétricos em hidrologia.** [S.l.]: Oficina de Textos - São Paulo, 2016.
- BRAGA, A. C. O. **Métodos de Eletroresistividade e Polarização Induzida aplicados no Estudo da Captação e Contaminação de Água Subterrânea: Uma abordagem metodológica e prática.** 120 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.
- BRAGA, A. C. O.; MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J.; CHANG, H. K. Correlation of Electrical Resistivity and Induced Polarization Data with Geotechnical Survey Standard Penetration Test Measurements. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 4, n. 2, p. 123–130, 1999.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica.** 8ª edição. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2013. 548 p.

CAMAÇARI. **Relatório de Caracterização Física e Socio-Econômica do Município de Camaçari, Volume II (Caracterização Física do Município), Parte integrante do Plano Municipal de Saneamento Básico - PMSB e do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - PGIRS**. [S.l.], 2015.

COSENZA, P.; MARMET, E.; REJIBA, F.; CUI, Y. J.; TABBAGH, A.; CHARLERY, Y. Correlations between geotechnical and electrical data: A case of study at Garchy in France. **Journal of Applied Geophysics**, v. 60, p. 165–178, 2006.

DEGROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. Occam's inversion to generate smooth two-dimensional models from magnetotelluric data. **Geophysics**, v. 55, n. 12, p. 1613–1624, 1990.

EDWARDS, L. S. A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. **Geophysics**, v. 42, n. 5, p. p.1020–1036, 1977.

EKWUE, E.; BARTHOLOMEW, J. Electrical conductivity of some soils in Trinidad as affected by density, water and peat content. **Biosystems Engineering**, v. 108, n. 2, p. 95–103, 2010.

ELBACHÁ, A.T; CAMPOS, L.E.P; BAHIA, R. No Title. In: **Tentativa de correlação entre precipitação e deslizamentos na cidade de Salvador**. [S.l.]: 1ª Conferência Brasileira sobre a Estabilidade de Encostas, 1992. p. V.II: 647–656.

ELLIS, R. G.; OLDENBURG, D. W.; ELLIS, R.G and OLDENBURG, D. W. Applied geophysical inversion. **Geophysical Journal International**, v. 116, p. 5–11, 1994.

EVJEN, H. M. Depth factors and resolving power of electrical measurements. **Geophysics**, v. 3, n. 2, p. 78–95, 1938.

FARAH, F. **Ocupação de Encostas**. São Paulo: Instituto de Pesquisa e Tecnologia (IPT), 2003. 312 p.

FONSECA, J. Estudo da porção mediana da coluna geológica do Recôncavo. **Boletim Interno Petrobrás: Pirex nº 2814**, Salvador, Bahia, 1968.

FUKUE, M.; MINATO, T.; HORIBE, H.; TAYA, N. The micro-structure of clay given by resistivity measurements. **Eng. Geol.**, v. 54, p. 43–53, 1999.

GALLAS, J. D. F. **Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental**. Tese (Doutorado) — Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geométrico na investigação rasa**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo- Instituto de Geociências, 2007.

GANDOLFO, O. C. B.; GALLAS, J. D. F. O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 3, p. 227–235, 2007.

GEOENG. **Anteprojeto de Engenharia de Estabilização de Encostas: Santo Antônio Além do Carmo**. Salvador, 2014. 31 p.

GEOHIDRO. **Plano Diretor de Encostas. Prefeitura Municipal de Salvador. Secretaria Municipal do Saneamento e Infraestrutura Urbana**. [S.l.], 2004. 35 p.

GEOTOMO SOFTWARE. **RES2DINV (v.3.54) and RES3DINV (v.2.14) for Windwos 98/ME/2000/NT/XP. Geoelectrical Imaging 2D & 3D**. [S.l.], 2004. 130 p.

GONÇALVES, J. T. D. Utilização do método de eletrorresistividade para mapear agentes causadores de instabilidade de taludes no Campus da UFBA. 2016.

HALLOF, P. G. **On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements**. Tese (Doutorado) — Cambridge, MIT, 1957.

LIMA, C.; VILAS BOAS, G. MECANISMOS DE TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DOS CONGLOMERADOS DA FORMAÇÃO MARIZAL (CRETÁCIO INFERIOR) NA BACIA DO RECÔNCAVO, BAHIA, BRASIL. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 2, p. 240–246, 1994.

LIMA, O. A. L.; SHARMA, M. M. A grain conductivity approach for shale sandstones. **Geophysics**, v. 55, n. 10, p. 1347–1356, 1990.

LIMA, O. A. L. d. **Propriedades Físicas das rochas - Bases da Geofísica Aplicada**. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf) - Rio de Janeiro, 2014.

LING, C.; XU, Q.; RAN, J.; LV, H. Application of electrical resistivity tomography for investigating the internal structure of a translational landslide and characterizing its groundwater circulation (Kualiangzi landslide, Southwest China). **Journal of Applied Geophysics**, v. 131, p. 154–162, 2016.

LOKE, M. H. **Res2DINV software user's manual**. [S.l.]: University Sains Malaysia, Penang, 1997. 173 p.

LOKE, M. H. **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys**. [S.l.]: Standford: Standford University Press, 2000.

LOKE, M. H.; ACWORTH, I.; DAHLIN, T.; Loke, M. H., Acworth, I., Dahlin, T. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. **Exploration Geophysics**, v. 34, p. 182–187, 2003. ISSN 18347533.

LOKE, M. H.; BARKER, R. D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. **Geophysical Prospecting**, v. 44, p. 499–523, 1996.

MACHADO, S. L.; MACHADO, M. F. C. **Mecânica dos Solos I - Conceitos Introdutórios**. [S.l.]: Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais (Setor de Geotecnia), 2014. 128 p.

MAGNAVITA, L. P.; SILVA, R. R. da; SANCHES, C. P. Guia de Campo da Bacia do Recôncavo, NE do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 13, p. 301–334, 2005.

MENDELSON, K. S.; COHEN, M. H. Effect of grain anisotropy on electrical properties of sedimentary-rocks. **Geophysics**, v. 47, n. 2, p. 257–263, 1982.

MILHOMEM, P.S.; DE MAMAN, E.J.; OLIVEIRA, F.M.; CARVALHO, M.S.S.; SOUZA-LIMA, W. Bacias Sedimentares Brasileiras: Bacia do Recôncavo. **Phoenix**, v. 5, n. 11, 2003.

MUSKAT, M.; EVINGER, H. M. Current penetration in direct current prospecting. **Geophysics**, v. 6, p. 397–427, 1941.

NERY, G. G. **Perfilagem Geofísica de Poços**. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf) - Rio de Janeiro, 2014.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica do Solo - Ensaio de Laboratório**. São Carlos: Gráfica EESC/USP, 1995.

OGILVY, A.; BOGOSLOVSKY, Y.; KUZMINA, E. Geoelectric models in engineering geophysics. **Geophysical Prospecting**, v. 28, p. 945–955, 1980.

OH, S.; SUN, C. Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam. **Env. Geol**, v. 54, p. 31–42, 2008.

OLAYINKA, A. I.; YARAMANCI, U. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. **Journal of Applied Geophysics**, v. 45, p. 63–81, 2000. ISSN 09269851.

OLAYINKA, A. I.; YARAMANCI, U. Smooth and sharp-boundary inversion of two-dimensional pseudosection data in presence of a decrease in resistivity with depth. **European Journal of Environmental and Engineering geophysics**, v. 7, p. 139–165, jun 2002.

Oldenburg, D. W and Li, Y.; OLDENBURG, D.; LI, Y. Inversion of induced polarization data. **Geophysics**, v. 59, n. 9, p. 1327–1341, 1994.

OLIVEIRA JR, T. R. **Geologia do Extremo Nordeste do Cráton do São Francisco**. 126 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1990.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua**. Madrid: Paraninfo, 1972.

PARASNIS, D. S. **Principio de geofisica aplicada. Trad. E. Orellana (Original - 1962)**. Madrid: Ed. Paraninfo, 1970. 208p p.

PELTON, W. H.; RIJO, L.; Swift Jr., C. M. Inversion of two-dimensional resistivity and induced-polarization data. **Geophysics**, v. 43, n. 4, p. 788–803, 1978.

PENTEADO, H. L. B. **Modélisation compositionnelle 2D de la genèse, expulsion et migration du pétrole dans le Compartiment Sud du Bassin de Recôncavo, Brésil.** Tese (Ph.D. Thesis) — Université Pierre et Marie Curie, Paris, FR, 1999.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POPESCU, M.; SERBAN, R. D.; URDEA, P.; ONACA, A. Conventional Geophysical Surveys for landslides investigation: two case studies from Romania. **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences**, v. 11, n. 1, p. 281–291, 2016.

PRESA, E. Parâmetros convenientes para projetos de rodovias em Solo Expansivo. In: **II Seminário Regional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações-NRBA/ABMS.** Salvador, Bahia: [s.n.], 1980. p. 83–106.

ROY, A.; APPARAO, A. Depth of investigation in direct current methods. **Geophysics**, v. 36, n. 5, p. 943–959, 1971.

SASAKI, Y. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. **Geophysics**, v. 54, n. 2, p. 254–262, 1989.

SASAKI, Y. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. **Geophysical Prospecting**, v. 40, p. 453–464, 1992.

SEABRA, G. M. **A presença de flúor nas ágyas subterrâneas da Formação Sergi (Jurássico Superior) da Bacia do Recôncavo no Estado da Bahia, Brasil.** 76 p. Tese (Monografia) — Universidade Federal da Bahia, 2011.

SEN, P. N. Grain shape effects on dielectric and electric properties of rocks. **Geophysics**, v. 42, n. 5, p. 586–587, 1984.

SEN, P. N.; GOODE, P. A.; SIBBIT, A. Electrical conduction in clay bearing sandstones at low and high salinities. **Journal of Applied Physics**, v. 63, n. 10, p. 4832–4840, 1998.

SILVA, C. **Diagnóstico ambiental de áreas de pedreiras abandonadas na cidade de Salvador-BA com ênfase na estabilidade de taludes.** 128 p. Tese (Tese de Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, 2005.

SILVA, J. Solos Grampeados: Comprimentos máximos de grampos nos solos a Leste da Falha de Salvador. **SITIENTIBUS- Revista da Universidade Estadual de Feira de Santana**, n. 35, p. 57–74, 2006.

SILVA, O. B.; CAIXETA, J. M.; MILHOMEM, P.S.; KOSIN, M. D. Bacia do Recôncavo. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 2, p. 423–431, 2007.

SIMÕES, P.; Costa Filho, L. Características Mineralógicas, Químicas e Geotécnica de solos expansivos do Recôncavo Bahiano. In: **Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais para Engenharia, PUCRJ.** [S.l.: s.n.], 1981. p. 569–588.

SOBRAL, H. Contribuição ao estudo de Massapê como solo para construção. Tese para Cátedra de matérias de construção. 1956.

SOBRAL, H.; MENEZES, M. Influência da umidade no comportamento dos massapês. **Publicação do IPTUB**, Novembro, 1962.

SOUZA, L. A. P. As técnicas geofísicas de sísmica de reflexão de alta resolução e sonografia aplicada ao estudo de aspectos geológicos e geotécnicos em áreas submersas. In: **35 Congresso Brasileiro de Geologia**. Belém: [s.n.], 2006. p. 1551–1564.

Souza L, Silva R., I. W.; SOUZA, L. A. P.; SILVA, R.; IYOMASA, W. S. **Investigações Geotécnicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. 165–183 p.

SUDHA, K.; ISRAIL, M.; MITTAL, S.; RAI, J. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigation. **Journal of Applied Geophysics**, v. 67, p. 74–79, 2009.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; KEYS, D. A. **Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University. Press, 1990.

VIEIRA, C. F. C.; PEREIRA, A. M. S.; DIAS, V. M.; Cerqueira Neto, J. X.; SILVA, F. R.; FERREIRA, L. A. G. Caracterização geológico-geotécnica das encostas urbanas do Município de Salvador. **IV COBRAE - Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**, n. i, p. 153–164, 2005.

VOGT, V. {Avaliação Das Propriedades Geotécnicas De Uma Encosta Coluvionar No Oleoduto Araucária-Paranaguá (Olapa) Avaliação Das Propriedades Geotécnicas De Uma Encosta Coluvionar No Oleoduto Araucária-Paranaguá (Olapa)}- Tese de Mestrado. 2012.

XAVIER, F. F. Geofísica Elétrica Aplicada a Geotecnia para investigação de estabilidade de taludes. **VII Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, ABMS, Foz do Iguaçu, PR, CD-ROM.**, 2010.

ZORZI, R. R.; RIGOTI, A. Aplicação de métodos geoeletricos para monitoramento da barragem de concreto da UHE Gov. José Richa. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 64-65, p. 48–58, 2011.