

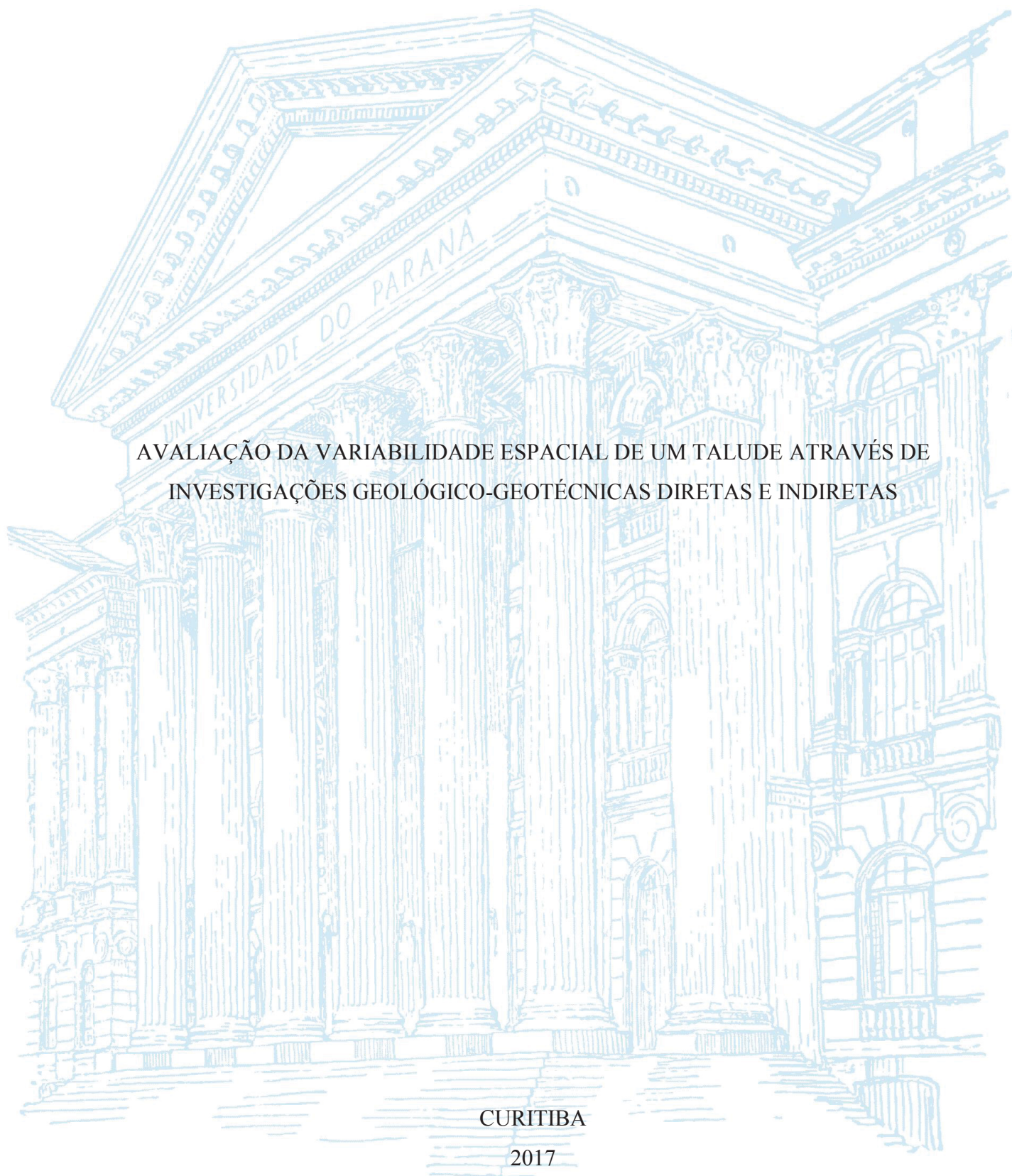
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRESSA DE FÁTIMA DA ROCHA PONTES

AValiação da Variabilidade Espacial de um Talude Através de
Investigações Geológico-Geotécnicas Diretas e Indiretas

CURITIBA

2017



ANDRESSA DE FÁTIMA DA ROCHA PONTES

AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE UM TALUDE ATRAVÉS DE
INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DIRETAS E INDIRETAS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, da Área de Concentração em Geotecnia, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro C. M. Kormann
Coorientadora: Prof^{fa}. Dr^a. Larissa de Brum Passini

CURITIBA

2017

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

P814a Pontes, Andressa de Fátima da Rocha
Avaliação da variabilidade espacial de um talude através de investigações geológico-geotécnicas diretas e indiretas [recurso eletrônico] / Andressa de Fátima da Rocha Pontes. – Curitiba, 2017.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2017.

Orientador: Alessandro C. M. Kormann.
Coorientadora: Larissa de Brum Passini.

1. Geofísica. 2. Taludes (Mecânica do solo). 3. Sondagem. I. Universidade Federal do Paraná. II. Kormann, Alessandro C. M. III. Passini, Larissa de Brum. IV. Título.

CDD: 551

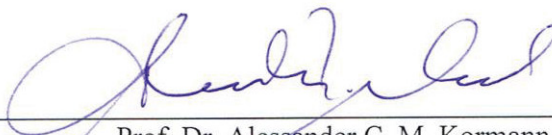
Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE UM TALUDE ATRAVÉS DE INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DIRETAS E INDIRETAS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



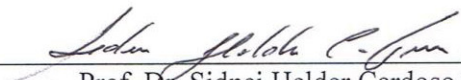
Prof. Dr. Alessandro C. M. Kormann
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil - UFPR

Coorientadora:

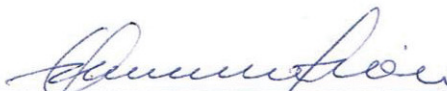


Prof.ª Dr.ª Larissa de Brum Passini
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil - UFPR

Examinadores:



Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil - UFPR



Prof. Dr. Alberto Pio Fiori
Programa de Pós-Graduação em Geologia - UFPR

RESUMO

Esta dissertação contempla estudos envolvendo um talude rodoviário localizado na BR-116, no km 552 PN (Pista Norte), na Serra Pelada, a qual pertencente a cadeia de montanhas da Serra do Mar. A pesquisa iniciou-se com a seleção do local de estudo, pois era necessária uma encosta onde o acesso fosse adequado para a execução dos ensaios e visitas de campo. Com esse propósito, fez-se um mapeamento das declividades dos taludes, na faixa de domínio da rodovia no trecho que liga Curitiba/PR a São Paulo/SP. Foi realizado um levantamento do histórico de complicações geotécnicas deste trecho e visitas de campo. Os aspectos geológicos foram levantados. Após selecionado o talude rodoviário, o solo superficial do local foi analisado por experimentos de laboratório (massa específica real dos grãos, granulometria, limites de Atterberg e sucção) e ensaios de campo (sondagens a percussão e mistas, geofísica e permeabilidade). Os resultados dos ensaios de campo e laboratório foram avaliados através do coeficiente de variação (COV), visando analisar a heterogeneidade do solo dentro das camadas que compõem o talude, por meio dos diferentes ensaios e correlacionar a variabilidade dos resultados provenientes das sondagens diretas e indiretas. Foram delimitadas cinco camadas através dos ensaios de campo. Quatro das cinco camadas de solo que compõem o talude mostraram-se com maior heterogeneidade através da geofísica do que através das sondagens diretas. Sendo o principal objetivo analisar a variabilidade através dos resultados da geofísica. Confrontando os resultados, decorridos dos métodos de investigação de campo, chegou-se a grandes dispersões. Uma vez que os produtos gerados pelas investigações diretas (sondagens a percussão e mistas) e indiretas (geofísica) apresentaram variabilidade sem estabelecerem correspondências diretas, pois os COVs das camadas do talude divergiram de um método de investigação para outro.

Palavras-chave: Talude rodoviário. Sondagem. Geofísica. Coeficiente de variação (COV). Variabilidade espacial.

ABSTRACT

This dissertation includes studies about a slope of the road on the BR-116 highway, in the km 552 (North Road), located in the area denominated Serra Pelada, which belongs to the chain of mountains of Serra do Mar. The research started from the place chosen, because it was necessary a slope with adequate access for executing tests and field visits. With this purpose, a slope mapping inclination was carried out, in the domain strip of the highway in a segment which connects the cities of Curitiba/Paraná and São Paulo/São Paulo, in Brazil, a historical movement data were collected and field visits were conducted. The geological aspects were raised. Then, laboratory experiments were performed with soil samples of the superficial layer, such as specific soil mass, particle size distribution, Atterberg Limits and suction, and field tests, as permeability in situ, direct field investigations and geophysics. The results of field and laboratory tests were evaluated through of the coefficient of variation (COV), aiming to examine soil heterogeneity inside of the slope layers, through different tests and mainly correlating the variability of the results from direct field investigations and indirect surveys. The results of the field investigations methods were confronted, which showed great dispersion. The products generated by direct investigations (drilling) and indirect (geophysics) showed variability without establishing direct correspondences, since the COVs of the slope layers diverged from one method of investigation to the other. Four of the five layers of soil that make up the slope showed more heterogeneous through geophysics than through direct drilling.

Keywords: Slope of the road. Drilling. Geophysics. Coefficient of variation (COV). Spatial variability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – PERFIL DE INTEMPERISMO.....	18
FIGURA 2.2 – PROCESSO DE FORMAÇÃO DE UM COLÚVIO	19
FIGURA 2.3 – DESLIZAMENTO LENTO DE TERRA (RASTEJO): (A) ESQUEMA E (B) EFEITOS DESTES EM UMA ÁREA PRÓXIMA A EAST SUSSEX, NO REINO UNIDO, CHAMADA CHALK GRASSLANDS.....	21
FIGURA 2.4 – FLUXO DE DETRITOS: (A) ESQUEMA E (B) DANOS CAUSADOS POR UMA CORRIDA NA CIDADE DE CARABALLEDA, NA BASE DA CORDILHEIRA DE LA COSTAN, NO LITORAL NORTE DA VENEZUELA	21
FIGURA 2.5 – ESCORREGAMENTO ROTACIONAL: (A) ESQUEMA E (B) FOTOGRAFIA DE UM CASO OCORRIDO NA NOVA ZELÂNDIA E ILUSTRAÇÃO DA DIREÇÃO E O EIXO DA ROTAÇÃO DO ESCORREGAMENTO	22
FIGURA 2.6 – ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL: (A) ESQUEMA E (B) QUE OCORREU EM 2001 NO VALE DO RIO BEATTON, BRITISH COLUMBIA, CANADÁ.....	23
FIGURA 2.7 – QUEDA ROCHOSA: (A) ESQUEMA E (B) QUEDA DE BLOCOS E LASCAS NA ENCOSTA DO VIDIGAL, 1993	24
FIGURA 2.8 – PERFIL DE SONDAGEM SPT DE UM TALUDE	26
FIGURA 2.9 – RESULTADO OBTIDO COM ENSAIOS GEOFÍSICOS	28
FIGURA 2.10 – RELEVÂNCIA DE ENSAIOS DE CAMPO PARA DIFERENTES TIPO DE SOLO	29
FIGURA 2.11 – ESQUEMA BÁSICO DE AQUISIÇÃO DO MÉTODO DA ELETORRESISTIVIDADE	32
FIGURA 2.12 – ESQUEMA DO CAMINHAMENTO ELÉTRICO (ARRANJO DIPOLO- DIPOLO)	33
FIGURA 2.13 - FAIXAS DE VARIAÇÕES NOS VALORES DE RESISTIVIDADE EM SOLOS E ROCHAS	34
FIGURA 2.14 – TIPOS DE FLUXOS DO SOLO PARA O MATERIAL POROSO: (A) FLUXO DE VAPOR E (B) FLUXO CAPILAR.....	35

FIGURA 3.1 – MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO (MDE) DO KM 552 PN	41
FIGURA 3.2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	42
FIGURA 3.3 – LOCALIZAÇÃO DO TALUDE	43
FIGURA 3.4 – TALUDE DO KM 552 PN	43
FIGURA 3.5 – MAPA GEOLÓGICO DA SERRA PELADA DO KM 540 AO 555	45
FIGURA 3.6 – MAPA GEOLÓGICO DA SERRA DO AZEITE DO KM 500 AO 510	46
FIGURA 3.7 – MAPA GEOLÓGICO DA SERRA DO AZEITE DO KM 511 AO 520	46
FIGURA 3.8 – OCORRÊNCIA DE GRANITO ALTO TURVO NO TRECHO	47
FIGURA 3.9 – GNAISSE BANDADO BARRA DO AZEITE NO KM 513+000 PS	49
FIGURA 3.10 – BANDAMENTO DO PARAGNAISSE PRESENTE NO PONTO KM 511+640 PN	50
FIGURA 3.11 – TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS NO ENSAIO DE SONDAGEM MISTA SM-01 MOSTRANDO A ROCHA DE MIGMATITO PRESENTE NO SUBSOLO DO TALUDE SELECIONADO	51
FIGURA 4.1 – RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS	52
FIGURA 4.2 – LOCAIS DE COLETA DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS	54
FIGURA 4.3 – PLANTA DOS LOCAIS DE COLETA DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS	55
FIGURA 4.4 – PICNÔMETRO SENDO PESADO PARA OBTENÇÃO DE P1	56
FIGURA 4.5 – PICNÔMETROS COM AMOSTRA DE NO MÍNIMO 10G (P2)	56
FIGURA 4.6 – PICNÔMETROS NO FOGO	57
FIGURA 4.7 – PICNÔMETROS COM SOLO E ÁGUA DESTILADA EM BANHO DE ÁGUA (P3)	57
FIGURA 4.8 – PICNÔMETROS COM ÁGUA DESTILADA DEIXADOS EM BANHO DE ÁGUA (P4)	58
FIGURA 4.9 – SEQUÊNCIA DE PENEIRAS NO AGITADOR MECÂNICO	59
FIGURA 4.10 – MATERIAL EM REPOUSO NA SOLUÇÃO DE HEXAMEFOSFATO DE SÓDIO	60
FIGURA 4.11 – MATERIAL NO DISPERSOR	61
FIGURA 4.12 – SEDIMENTAÇÃO SENDO REALIZADA	61
FIGURA 4.13 – ARMAZENAMENTO DAS AMOSTRAS	64
FIGURA 4.14 – PREPARO DO SOLO PARA O ENSAIO	65
FIGURA 4.15 – AMOSTRA DE SOLO MOLDADA EM CILINDRO	65

FIGURA 4.16 – APARELHO DE CASAGRANDE COM AMOSTRA PRONTA PARA SER ENSAIADA	66
FIGURA 4.17 – PAPEL FILTRO EMBALADO EM PLÁSTICO ZIP PARA SER LEVADO AO CAMPO.....	68
FIGURA 4.18 – PROCEDIMENTOS DE COLETA PARA ENSAIO DE SUÇÃO COM PAPEL FILTRO: (A) LIMPEZA DO LOCAL PARA RETIRADA DE AMOSTRAS, (B) INSERÇÃO DO ANEL NO SOLO, (C) AMOSTRA SENDO RETIRADA COM AJUDA DA PÁ, (D) MOLDAGEM DA AMOSTRA NO TAMANHO DO ANEL, (E) PROTEÇÃO COM PLÁSTICO FILME, (F) AMOSTRA EMBALADA, (G) AMOSTRAS NA CAIXA DE ISOPOR ENVOLVIDAS PELO PLÁSTICO BOLHA E (H) CAIXA DE ISOPOR COM AS AMOSTRAS PARA SEREM TRANSPORTADAS PARA O LABORATÓRIO.....	69
FIGURA 4.19 – ENSAIO DE SUÇÃO: (A) AMOSTRAS E MATERIAL UTILIZADO, (B) COLETA DO PAPEL FILTRO PARA PESAGEM APÓS ARMAZENAGEM, (C) PESAGEM DO PAPEL FILTRO E (D) INSERÇÃO DO PAPEL FILTRO EM ESTUFA	70
FIGURA 4.20 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE <i>IN SITU</i>	72
FIGURA 4.21 – REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE: (A) EXECUÇÃO DO FURO COM TRADO, (B) TRADO UTILIZADO PARA RETIRADA DO MATERIAL, (C) FURO NO PONTO 01 E (D) FURO NO PONTO 02	73
FIGURA 4.22 – EXECUÇÃO DO ENSAIO: (A) MONTAGEM DO EQUIPAMENTO E (B) INSTALAÇÃO E NIVELAMENTO DO EQUIPAMENTO	74
FIGURA 4.23 – EXECUÇÃO DO ENSAIO: (A) ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO E (B) PREENCHIMENTO DOS TUBOS E DO FURO COM ÁGUA	74
FIGURA 4.24 – DETALHES DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE <i>IN SITU</i> : (A) ALTURA DE PRESSÃO DE 10 CM E (B) ALTURA DE PRESSÃO DE 5 CM.....	75
FIGURA 4.25 – LINHAS DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO REALIZADAS.....	79
FIGURA 4.26 – ESCALA CROMÁTICA UTILIZADA	82
FIGURA 5.1 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS	87

FIGURA 5.2 – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE LL	89
FIGURA 5.3 – CARTA DE PLASTICIDADE.....	90
FIGURA 5.4 – ASPECTOS DA CURVA CARACTERÍSTICA PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLO	91
FIGURA 5.5 – RESULTADO DA SONDAGEM MISTA SM-01	95
FIGURA 5.6 – RESULTADO DA SONDAGEM MISTA SM-02	96
FIGURA 5.7 – RESULTADO DA SONDAGEM MISTA SM-03	96
FIGURA 5.8 – RESULTADO DO CAMINHAMENTO ELÉTRICO LONGITUDINAL	106
FIGURA 5.9 – RESULTADO DO CAMINHAMENTO ELÉTRICO TRANSVERSAL	106
FIGURA 5.10 – PERFIL ESTRATIGRÁFICO INTERPRETADO.....	107
FIGURA 5.11 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 01	108
FIGURA 5.12 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 02.....	109
FIGURA 5.13 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 03.....	109
FIGURA 5.14 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 04.....	110
FIGURA 5.15 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 05.....	110
FIGURA 5.16 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 06.....	111
FIGURA 5.17 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 07.....	111
FIGURA 5.18 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 08.....	112
FIGURA 5.19 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 09.....	112
FIGURA 5.20 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 10.....	113
FIGURA 5.21 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 11.....	113
FIGURA 5.22 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 12.....	114
FIGURA 5.23 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NAS SEÇÕES DE CE 01 A CE 04	116
FIGURA 5.24 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NAS SEÇÕES DE CE 05 A CE 07	117
FIGURA 5.25 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 08.....	118
FIGURA 5.26 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NAS SEÇÕES CE 09 E CE 10	118
FIGURA 5.27 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 11.....	119
FIGURA 5.28 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 12.....	119

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – PRODUTOS DO INTEMPERISMO E SUA ROCHA DE ORIGEM	19
TABELA 2.2 – MÉTODOS GEOFÍSICOS E SUAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES	30
TABELA 4.2 – LOCAIS ONDE FORAM REALIZADAS AS COLETAS DE AMOSTRAS INDEFORMADAS	55
TABELA 4.1 – CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE SOLO	63
TABELA 4.3 – TEXTURA E CATEGORIA DA ESTRUTURA DO SOLO	76
TABELA 4.4 – AMPLITUDE DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA ENSAIOS GEOTÉCNICOS	83
TABELA 5.1 – RESULTADOS DO ENSAIO DE UMIDADE RELATIVA DO SOLO	86
TABELA 5.2 – RESULTADO DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS	86
TABELA 5.3 – RESUMO DO RESULTADO DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA	87
TABELA 5.4 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA OS VALORES DA GRANULOMETRIA	88
TABELA 5.5 – RESULTADOS DO ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE	89
TABELA 5.6 – RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LL E LP	89
TABELA 5.7 – ÍNDICE DE ATIVIDADE DAS ARGILAS	90
TABELA 5.8 – DADOS OBTIDOS PARA H1 EM 5 CM NO PONTO 01	92
TABELA 5.9 – DADOS OBTIDOS PARA H2 EM 10 CM NO PONTO 01	92
TABELA 5.10 – DADOS OBTIDOS PARA H1 EM 5 CM NO PONTO 02	93
TABELA 5.11 – DADOS OBTIDOS PARA H2 EM 10 CM NO PONTO 02	93
TABELA 5.12 – RESULTADO DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE IN SITU	94
TABELA 5.13 – VALORES TÍPICOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLOS SATURADOS	94
TABELA 5.14 – DADOS DAS SONDAGENS REALIZADAS	95
TABELA 5.15 – VALORES DE COV PARA CADA CAMADA DE CADA SONDAGEM	98
TABELA 5.16 – VALORES DE COV PARA CADA CAMADA	99

TABELA 5.17 – COV PARA CADA CAMADA DE CADA SONDAGEM DAS SONDAGENS SPT (2011)	101
TABELA 5.18 – COV PARA CADA CAMADA DAS SONDAGENS SPT	103
TABELA 5.19 – RESULTADO DO COV EM CADA CAMADA DO TALUDE	105
TABELA 5.20 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA GEOFÍSICA NAS SEÇÕES DE CE 01 A CE 06	114
TABELA 5.21 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA GEOFÍSICA NAS SEÇÕES DE CE 07 A CE 12	114
TABELA 5.22 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS CAMADAS PARA A GEOFÍSICA COM INTERPREÇÃO DIRETA DO ENSAIO	115
TABELA 5.23 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS SEÇÕES DA GEOFÍSICA DE CE 01 A CE 06	120
TABELA 5.24 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS SEÇÕES DA GEOFÍSICA DE CE 07 A CE 12	120
TABELA 5.25 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS CAMADAS PARA A GEOFÍSICA COM BASE NAS SONDAGENS DIRETAS.....	121

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
2.2	SOLOS RESIDUAIS	17
2.3	SOLOS COLUVIONARES	19
2.4	MOVIMENTOS DE MASSA.....	20
2.4.1	Escoamentos	21
2.4.2	Escorregamentos	22
2.4.3	Subsidências	24
2.5	MÉTODOS DIRETOS DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA	25
2.5.1	Sondagem Mista	26
2.6	MÉTODOS INDIRETOS DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA	27
2.6.1	Geofísica.....	28
2.7	PARÂMETROS HIDRÁULICOS DOS SOLOS	34
2.7.1	Retenção de Água.....	34
2.7.2	Permeabilidade	36
2.8	VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS DOS SOLOS	37
2.9	CONCEITOS BÁSICOS DE ESTATÍSTICA	38
3.	ÁREA DE ESTUDO.....	40
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	40
3.2	DEFINIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	40
3.3	LOCALIZAÇÃO.....	42
3.4	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-LITOLÓGICA.....	44
3.4.1	Serra Pelada	47
3.4.2	Serra do Azeite	48
3.4.3	Talude km 552 PN (Serra pelada)	51
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	52

4.2	ENSAIOS DE LABORATÓRIO	53
4.2.1	Caracterização	53
4.2.2	Sucção pelo Método do Papel Filtro	66
4.3	ENSAIOS DE CAMPO.....	71
4.3.1	Permeabilidade <i>in Situ</i>	71
4.3.2	Sondagens Mistas (Sondagem direta)	77
4.3.3	Geofísica (Sondagem indireta).....	79
4.4	Coeficiente de variação	83
5.	RESULTADOS.....	85
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	85
5.2	ENSAIOS DE LABORATÓRIO	85
5.2.1	Caracterização	85
5.2.2	Sucção pelo Método do Papel Filtro	91
5.3	ENSAIOS DE CAMPO.....	92
5.3.1	Permeabilidade <i>in Situ</i>	92
5.3.2	Sondagens a Percussão e Mistas (Sondagens diretas).....	94
5.3.3	Geofísica (Sondagem indireta).....	105
6.	CONCLUSÕES	122
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	122
6.2	ENSAIOS DE LABORATÓRIO	122
6.3	ENSAIOS DE CAMPO.....	123
6.4	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
	REFERÊNCIAS	126
	ANEXO A – SONDAgens.....	131
	ANEXO B – GEOFÍSICA.....	135

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os solos são naturalmente heterogêneos e devido aos seus processos de formação e de intemperismo, os mesmos se alteram de maneira continua. Variabilidades pertinentes aos seus parâmetros e de suas camadas são vistas em todos os lugares.

Nesse contexto, alguns autores, tais como Phoon e Kulhawy (1999a), Phoon e Kulhawy (1999b) e Duncan (2000), estudaram o coeficiente de variação dos parâmetros do solo, através de ensaios de laboratório e de campo, ou seja, fazendo o uso de métodos diretos de investigação. As investigações por métodos indiretos, por exemplo a geofísica, são muito utilizadas no meio geotécnico. Também apresentam variabilidade em seus resultados, mas na bibliografia não são encontrados estudos para o coeficiente de variação para estes métodos, nem correlações que comparam a dispersão dos valores dentro de uma camada para diferentes ensaios.

Assim, propõe-se nesta dissertação de mestrado, a análise da variabilidade das propriedades do solo e de seus parâmetros, como também das camadas que compõem um talude rodoviário, com enfoque principal nos resultados da geofísica. Sendo que neste trabalho utilizou-se o método de eletrorresistividade, pois este método foi o que melhor se enquadrou ao local da pesquisa.

Tal talude está localizado no km 552 Pista Norte (PN) da BR-116, na Serra Pelada, a qual pertencente à cadeia de montanhas da Serra do Mar, situado na cidade da Barra do Turvo, no estado de São Paulo.

A presente dissertação faz parte de um estudo financiado pela concessionária Autopista Régis Bittencourt, o qual se desenvolve ao longo da extensão da rodovia Régis Bittencourt (BR-116), trecho da Serra do Mar PR-SP relacionado à gestão da segurança de taludes rodoviários.

1.2 OBJETIVOS

Entre os objetivos desta dissertação de mestrado está à avaliação da variabilidade espacial de um talude e das propriedades do solo que o compõem, com suporte de análises estatísticas da investigação geotécnica, a qual contempla ensaios de campo e de laboratório.

Para alcançar o objetivo foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- A caracterização geotécnica do solo do talude através dos ensaios de laboratório (granulometria, índices físicos e limites de Atterberg);
- Análise das propriedades hidráulicas pelos ensaios de sucção em laboratório e de permeabilidade *in situ*.
- Definição da estratigrafia do talude;
- Mensuração das propriedades físicas do solo através dos resultados dos ensaios de laboratório;
- Por fim, analisar o resultado da variabilidade das camadas do talude, provindo da geofísica (método indireto de investigação geotécnica) por meio da resistividade elétrica e das sondagens a percussão e mistas (método direto de investigação geotécnica) considerando as informações das camadas obtidas a cada metro, sendo as mesmas comparadas entre si.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

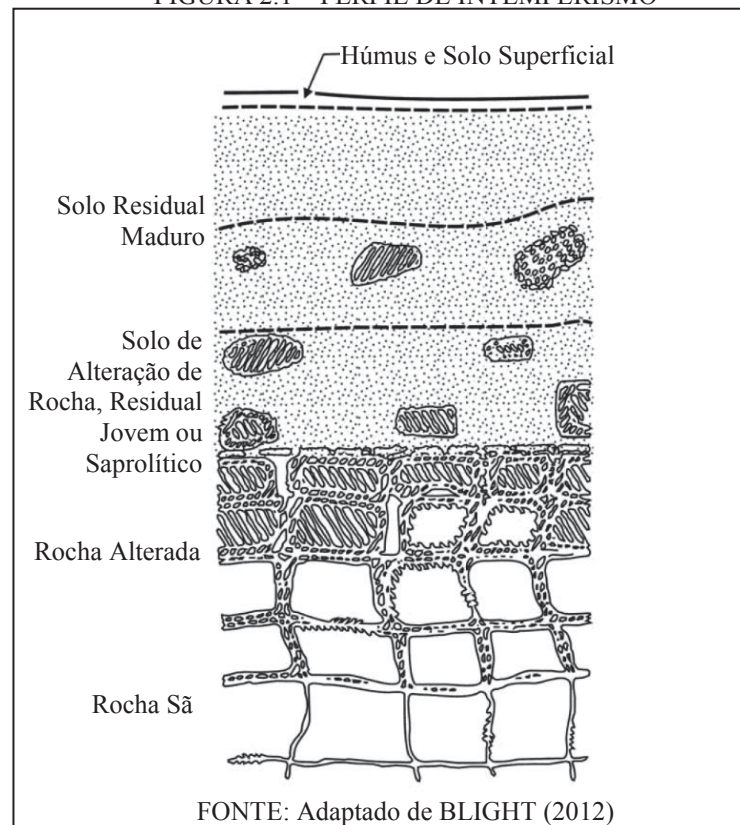
Este capítulo traz inicialmente uma breve explicação sobre os solos residuais e coluvionares. Logo em seguida são abordados os tipos de movimentos de massa e na sequência são descritos os métodos diretos e indiretos de investigação geotécnica, seguidos dos parâmetros hidráulicos do solo. Ainda, abordou-se a variabilidade dos parâmetros geotécnicos. E, por fim, são abordados conceitos relevantes quanto a análises estatísticas, tópicos estes que embasam esta dissertação.

2.2 SOLOS RESIDUAIS

A definição de solo residual varia de um país para outro, mas geralmente é dada como um material derivado dos processos, *in situ*, de intemperismo e decomposição de maciços rochosos ou fragmentos destes que se encontram em seu local de origem. Esses processos de intemperismo são físicos, químicos e biológicos. Assim, os fatores climáticos, biológicos, químicos, topográficos, temporais e a rocha de origem contribuem para a formação dos solos residuais. Tornando o processo de formação do perfil de um solo residual complexo, difícil de entender e de generalizar (BLIGHT, 2012).

A decomposição da rocha forma os horizontes, conforme a profundidade e a intensidade do intemperismo, uma vez que ele é maior nas camadas mais superficiais e estas vão se transformando em solo. Assim no perfil de intemperismo as camadas mais profundas são formadas pela rocha inalterada (rocha sã), sobreposta por um horizonte de rocha alterada, onde identifica-se o avanço do intemperismo ao longo das fraturas ou em regiões com minerais menos resistentes, entre esta e o solo tem-se a rocha totalmente alterada (solo de alteração de rocha, residual jovem ou saprolítico), mais intemperizado, mas que ainda preserva as características da rocha mãe e alguns minerais não decompostos, e sobrejacente a ela encontra-se o solo residual ou solo residual maduro, conforme mostrado na FIGURA 2.1 (CHIOSSI, 1979; VAZ, 1996; GERSCOVICH, 2012).

FIGURA 2.1 – PERFIL DE INTEMPERISMO



Vaz (1996) afirma que o clima define o número de horizontes e a espessura do solo residual e a rocha matriz determina a estruturação mineralógica do solo derivado, uma vez que essa composição é determinante para a granulometria, plasticidade e tipo de argilo-mineral presente no solo, porquanto a rocha de origem caracteriza predominantemente o comportamento geomecânico dos solos residuais.

Todos os tipos de rocha podem formar um solo residual, dado que a sua composição provém do tipo e da composição mineralógica da rocha de origem (CHIOSSI, 1979). Na TABELA 2.1 tem-se um resumo com exemplos do produtor de intemperismo da rocha mãe.

TABELA 2.1 – PRODUTOS DO INTEMPERISMO E SUA ROCHA DE ORIGEM

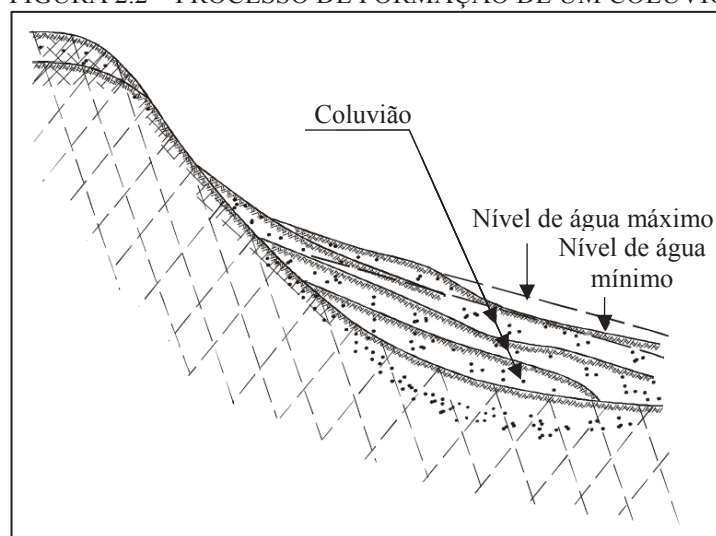
Tipo de rocha	Tipo de solo
Basalto	Argiloso
Quartzito	Arenoso
Filitos	Argiloso
Arenito	Arenoso
Granito	Micáceo arenoargiloso
Calcário	Argiloso
Gnaiss e Micaxistos	Siltoso e micáceo

FONTE: Adaptado de CHIOSSI (1979) e MASSAD (2010)

2.3 SOLOS COLUVIONARES

A ABNT (1995) através da NBR 6502 define colúvio como o depósito de solos predominantemente originados pela ação da gravidade. Massad (2010) caracteriza o solo coluvionar como sendo o solo residual que foi transportado pela ação da gravidade, mas que ainda está próximo ao seu local de origem, como nos escorregamentos, sendo denominado também de coluvião ou ainda tálus. Geralmente esses solos são encontrados no pé de encostas e podem ser constituídos de solos misturados com blocos de rocha. Vários escorregamentos sucedidos ao longo do tempo formam esse tipo de solo (FIGURA 2.2).

FIGURA 2.2 – PROCESSO DE FORMAÇÃO DE UM COLÚVIO



FONTE: Adaptado de DEERE E PATTON (1971) *apud* MASSAD (2010)

Schilling (1993) definiu em seu trabalho o colúvio como sendo a camada formada por solo e/ou fragmentos de rocha localizados no pé e ao longo da encosta, transportados das cotas mais altas, pela ação da gravidade e das águas. O autor explicou, que este processo de formação se origina devido a ação intensa das águas superficiais e subterrâneas, que escoam ao longo da encosta, o que contribui para a ocorrência de erosões e escorregamentos, complementou ainda que, esses escorregamentos deslocam a massa terrosa e rochosa para as cotas inferiores da encosta.

Segundo Gerscovich (2012), no Brasil o colúvio também é denominado tálus, quando blocos rochosos de dimensões significativas ficam acumulados. A autora afirma que em campo, muitas vezes, é complicado distinguir a transição entre a camada de colúvio e o solo residual, pois a ação do intemperismo tende a desmanchar as feições geológicas, deixando a camada visualmente homogênea.

2.4 MOVIMENTOS DE MASSA

Segundo Gerscovich (2012), qualquer deslocamento de uma quantidade de volume de solo é denominado: movimento de massa. Na literatura encontram-se diversos tipos de mecanismos de instabilidade de massas, propostos por diferentes autores. Os principais critérios adotados nas classificações são a velocidade e o mecanismo do movimento, o tipo de material, as deformações, a geometria e a presença de água.

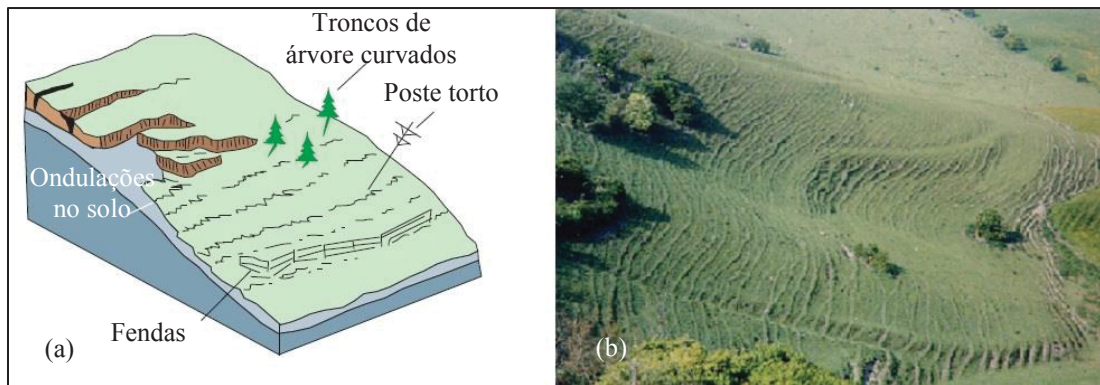
Esses movimentos de massa foram classificados de diversas maneiras. Freire (1965), citado por Guidicini e Nieble (1984), apresentou a classificação de Magalhães, pois a proposta dele buscou unificar e harmonizar as noções essenciais contidas nas obras de diversos especialistas. Dividindo-os em quatro grandes grupos: escorregamento, rastejo, corrida e queda.

No Brasil os mais frequentes e principais tipos de movimento de massa, foram abordados por Augusto Filho (1992). O autor relacionou as características do movimento com tipo de material envolvido e geometria da encosta. Os tipos de movimento apresentados foram: escoamentos, escorregamentos e subsidências (AUGUSTO FILHO, 1992 *apud* GERSCOVICH, 2012).

2.4.1 Escoamentos

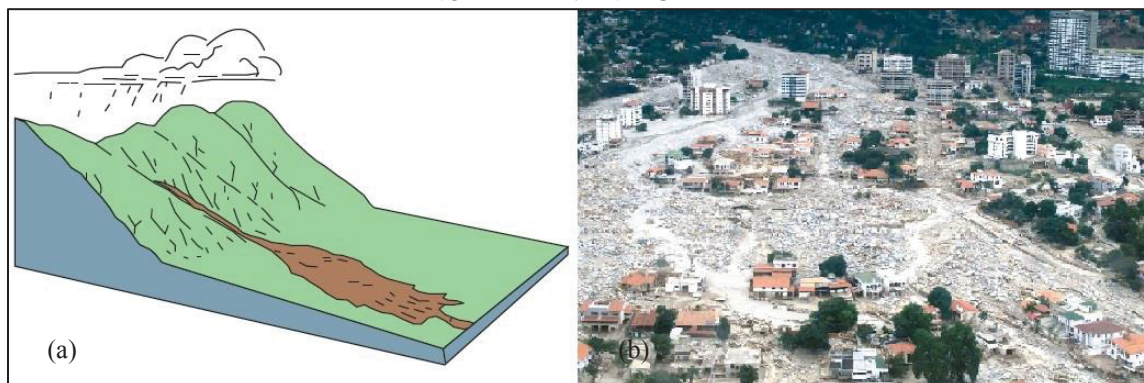
Escoamentos para Guidicini e Nieble (1984), são movimentos contínuos de massa, apresentando ou não uma superfície de ruptura definida. Eles acontecem tanto de forma lenta: rastejos (escoamento plástico), quanto rápida: corridas (escoamento fluido-viscoso). Esses escoamentos podem ser visualizados nas FIGURAS a seguir. Sendo que, a FIGURA 2.3 (a) consiste em um esquema de deslizamento lento e a FIGURA 2.3 (b) uma foto mostrando os efeitos. Já a FIGURA 2.4 (a) e (b) esquematiza e mostra uma foto, respectivamente, do escoamento rápido.

FIGURA 2.3 – DESLIZAMENTO LENTO DE TERRA (RASTEJO): (a) ESQUEMA e (b) EFEITOS DESTES EM UMA ÁREA PRÓXIMA A EAST SUSSEX, NO REINO UNIDO, CHAMADA CHALK GRASSLANDS



FONTE: Adaptado de HIGHLAND e BOBROWSKY (2008)

FIGURA 2.4 – FLUXO DE DETRITOS: (a) ESQUEMA e (b) DANOS CAUSADOS POR UMA CORRIDA NA CIDADE DE CARABALLEDA, NA BASE DA CORDILHEIRA DE LA COSTAN, NO LITORAL NORTE DA VENEZUELA



FONTE: HIGHLAND e BOBROWSKY (2008)

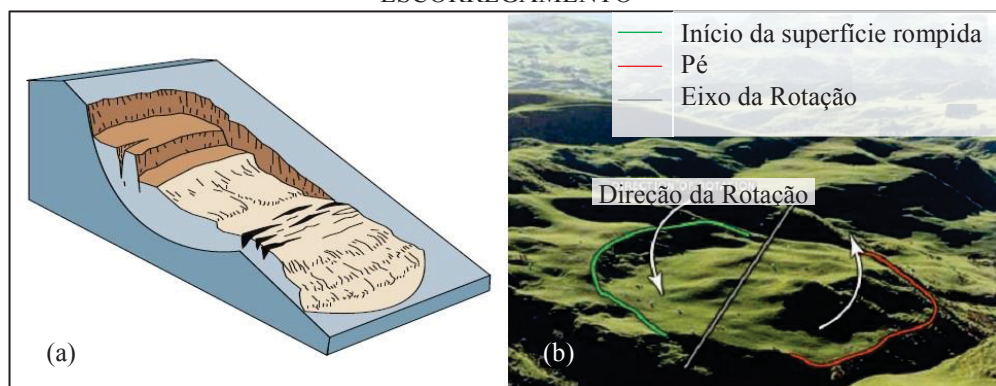
2.4.2 Escorregamentos

Conforme Gerscovich (2012) o escorregamento é um movimento de massa com superfície bem definida e rápida, sendo que a ruptura se dá na superfície de menor resistência. Os escorregamentos são subdivididos em três grupos: rotacionais, translacionais e quedas, conforme apresentados a seguir.

2.4.2.1 Escorregamentos rotacionais

Guidicini e Nieble (1984) descreveram os escorregamentos rotacionais, aqueles em que a superfície de escorregamento está sempre contida no material do terreno e o colapso da massa ocorre por ruptura em torno de um centro de arco, sendo que a força responsável pela abertura é geralmente o peso da cunha, enquanto a resistência ao cisalhamento ao longo do círculo de ruptura é a força resistente. Na natureza a fratura segue o caminho de menor resistência, ou seja, a cunha se desloca pelo plano de escorregamento, isto é, aquele plano que, em relação a qualquer outro plano, tem a menor resistência à separação dessa cunha. São movimentos catastróficos, causados pelo deslizamento súbito do solo residual e coluvial que recobre a rocha, ao longo de uma superfície qualquer de ruptura, ou ao longo da própria face da rocha. É apresentado na FIGURA 2.5 (a) um esquema de escorregamento rotacional e na FIGURA 2.5 (b) uma fotografia mostrando esse tipo de escorregamento e a direção do eixo do escorregamento.

FIGURA 2.5 – ESCORREGAMENTO ROTACIONAL: (a) ESQUEMA e (b) FOTOGRAFIA DE UM CASO OCORRIDO NA NOVA ZELÂNDIA E ILUSTRAÇÃO DA DIREÇÃO E O EIXO DA ROTAÇÃO DO ESCORREGAMENTO

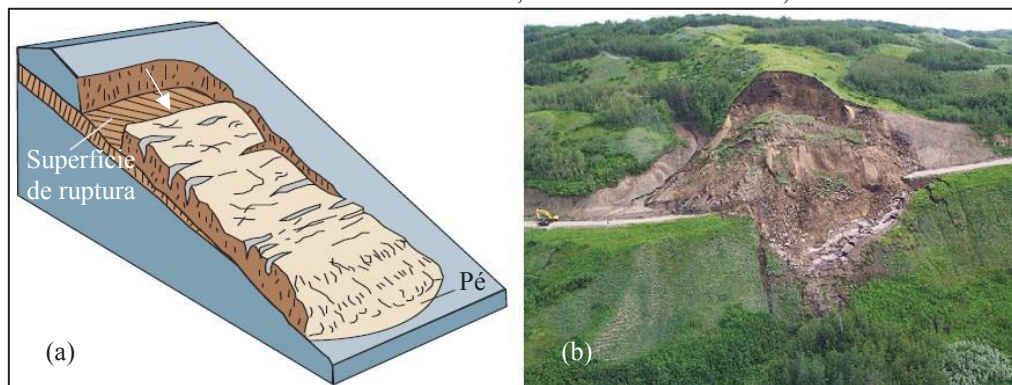


FONTE: Adaptado de HIGHLAND e BOBROWSKY (2008)

2.4.2.2 Escorregamentos translacionais

Caracterizam-se pelas descontinuidades ou planos de fraqueza, sendo muito comum em mantos de colúvio de pequena espessura, acima do embasamento rochoso. Sendo que a ruptura pode se apresentar em formato de cunha delimitada por um ou mais planos, quando as camadas de menor resistência não são paralelas à superfície do talude, ou quando os planos de fraqueza se cruzam. Em solos relativamente homogêneos, a superfície tende a ser circular. Se a superfície tiver um aspecto mais achatado na direção vertical ou horizontal, é por que a anisotropia com relação à resistência tem significância (GERSCOVICH, 2012). O esquema de escorregamento translacional encontra-se representado na FIGURA 2.6 (a) e na FIGURA 2.6 (b) tem-se uma fotografia de um escorregamento translacional ocorrido no Canadá.

FIGURA 2.6 – ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL: (a) ESQUEMA e (b) QUE OCORREU EM 2001 NO VALE DO RIO BEATTON, BRITISH COLUMBIA, CANADÁ



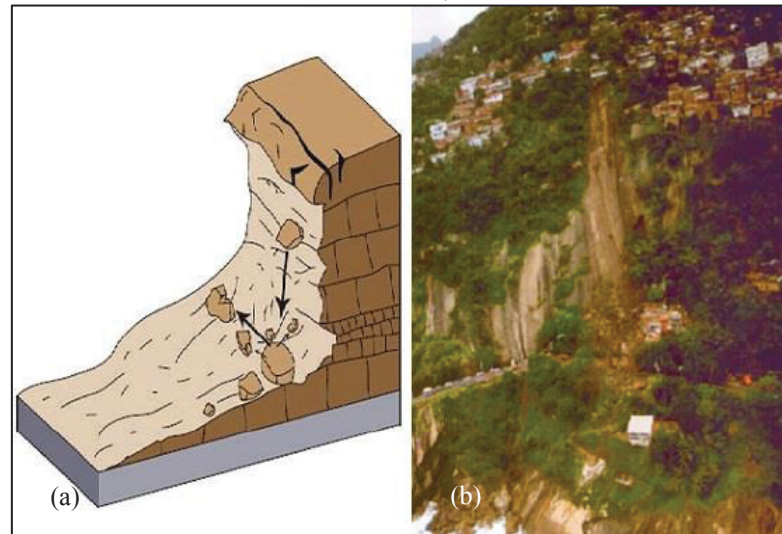
FONTE: Adaptado de HIGHLAND e BOBROWSKY (2008)

2.4.2.3 Quedas

- Queda de blocos

Os blocos de rocha, que foram deslocados do maciço por intemperismo, caem, devido a ação da gravidade. Sendo esse um dos processos de formação de depósitos de tálus (GUIDICINI e NIEBLE, 1984). A FIGURA 2.7 (a) ilustra o esquema de queda e a FIGURA 2.7 (a) traz uma fotografia de queda de blocos e lascas na encosta do Vidigal no de 1993 na cidade do Rio de Janeiro/RJ.

FIGURA 2.7 – QUEDA ROCHOSA: (a) ESQUEMA e (b) QUEDA DE BLOCOS E LASCAS NA ENCOSTA DO VIDIGAL, 1993



FONTE: (a) HIGHLAND e BOBROWSKY (2008) (b) PENHA (2000)

- Queda de detritos

É uma transição entre a queda de blocos e os escorregamentos propriamente ditos. Tratando-se da queda relativamente livre de reduzidas massas de fragmentos terrosos ou rochosos, não consolidados ou pouco consolidados, em movimentos de pequena magnitude (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

2.4.3 Subsidiências

Quando o movimento de massa é essencialmente um deslocamento vertical, é denominado subsidência, pode ser tanto contínuo como instantâneo (GERSCOVICH, 2012).

2.4.3.1 Subsidiências propriamente ditas

Subsidiências são causadas pelo efeito de adensamento das camadas, devido à remoção de alguma fase sólida, líquida ou gasosa do substrato. Podem ocorrer por processos naturais ou pela ação humana, não sendo comuns no Brasil (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

2.4.3.2 Recalques

Recalques são movimentos verticais de uma estrutura provocados pelo próprio peso ou pela deformação do subsolo por outro agente. Os recalques também podem aparecer pela remoção de confinamento lateral por escavações próximas a estruturas, bombeamento de água em escavações próximas, rebaixamento do lençol freático (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

2.4.3.3 Desabamentos

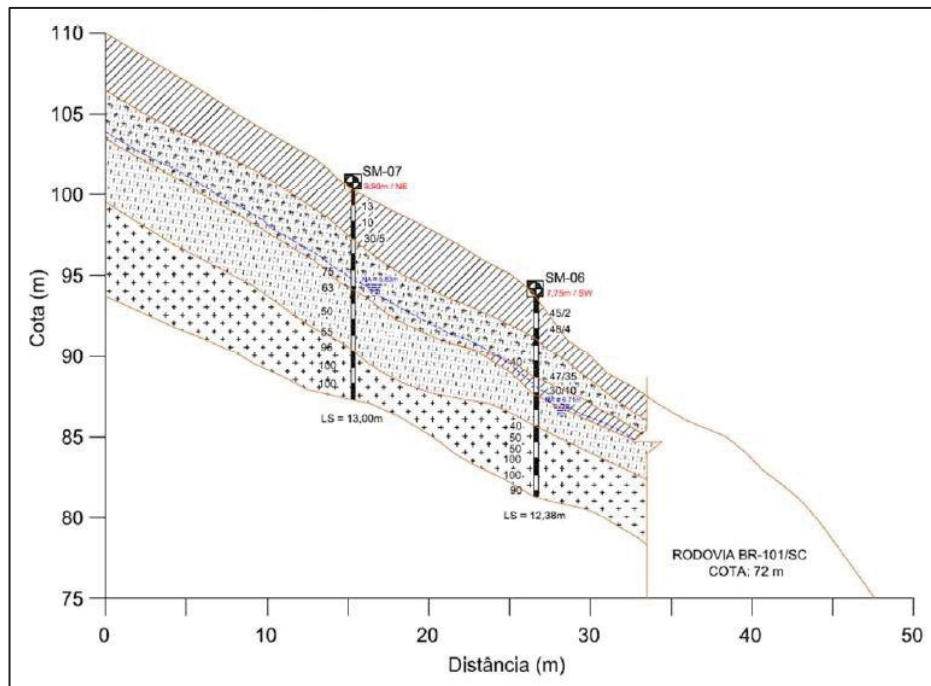
Guidicini e Nieble (1984) definem desabamentos como subsidências bruscas, provocadas pela ruptura ou remoção total, ou parcial do substrato. São causados por trabalhos subterrâneos de mineração ou por processo natural de dissolução de rochas e substâncias como calcários, dolomitos, gipsita e sal. No Brasil, próximo a Ponta Grossa (Paraná), são encontradas algumas depressões ocorridas pelo processo natural.

2.5 MÉTODOS DIRETOS DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

Schnaid (2012) aponta que dentre as diversas formas de investigação geotécnica disponíveis, as técnicas mais comumente utilizadas envolvem o uso de métodos diretos de ensaios tais como: sondagens a trado, percussão e rotativa. As técnicas diretas apresentam como vantagens o fornecimento de parâmetros diretos do solo (sem o uso de correlações), permitindo ainda uma amostragem em profundidades pré-definidas. Entretanto, segundo Gandolfo *et al.* (2008), a principal limitação dessas técnicas está associada ao fato de seus resultados representarem características pontuais dos locais onde foram realizadas.

Essa limitação dos métodos diretos de investigação geotécnica pode ser observada na FIGURA 2.8. Nesse exemplo, verifica-se que a configuração das camadas entre os furos de sondagem é estimada e pode não representar a estratigrafia exatamente como a real. Pontualmente têm-se as informações precisas das camadas, porém entre os pontos de sondagens não é possível ter certeza de como as camadas estão se comportando, podendo conter bolsões de outros materiais que não estão representados no desenho.

FIGURA 2.8 – PERFIL DE SONDAGEM SPT DE UM TALUDE



FONTE: PRETTO (2014)

2.5.1 Sondagem Mista

A sondagem mista é a combinação da sondagem a percussão em solo e de sondagem rotativa em rocha, utilizada quando o subsolo do terreno é composto por rochas, matacões, alterações de rocha de elevada resistência.

Para Schnaid (2009) dos vários métodos de investigação do solo praticados atualmente em todo o mundo, o SPT (*Standard Penetration Test* – Ensaio de penetração padrão) continua sendo o mais popular e amplamente utilizado em ensaios de campo. Principalmente recomendado para solos granulares e outras condições do local em que é difícil obter amostras para testes no laboratório ou para executar outros testes *in situ*, o SPT vem sendo usado para exploração preliminar em, praticamente, qualquer condição de terreno. Além disso, oferece a avaliação das propriedades do solo, parâmetros para projetos de fundação e nível do lençol freático. A simplicidade, baixo custo e robustez do seu método de condução de um amostrador-padrão até o fundo do solo, a partir de um furo, explica parcialmente a sua ampla aceitação.

Os procedimentos de ensaios de sondagem são normatizados pelas ASTM (*American Society for Testing and Materials* – Sociedade Americana de Ensaio e Materiais) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), fundamentado nas normas D 1586 ASTM (2011), internacionalmente, e NBR 6484 ABNT (2001). No Brasil, estas descrevem o método de

execução de sondagens de simples reconhecimento de solos, com SPT, para aplicações em Engenharia Civil.

As finalidades dos experimentos de SPT são a determinação dos tipos de solo e as suas profundidades de ocorrência, a posição do nível de água e os índices de resistência à penetração (N) a cada metro.

A sondagem a percussão é um tipo de investigação do subsolo, sendo utilizado, segundo Hachich *et al.* (1998), quando se pretende conhecer:

- O tipo de solo atravessado através da retirada de uma amostra deformada, a cada metro perfurado, ou seja, definir a estratigrafia do solo;
- A resistência (N) oferecida pelo solo à cravação do amostrador padrão, a cada metro perfurado;
- A posição do nível ou dos níveis d'água, quando encontrados durante a perfuração.

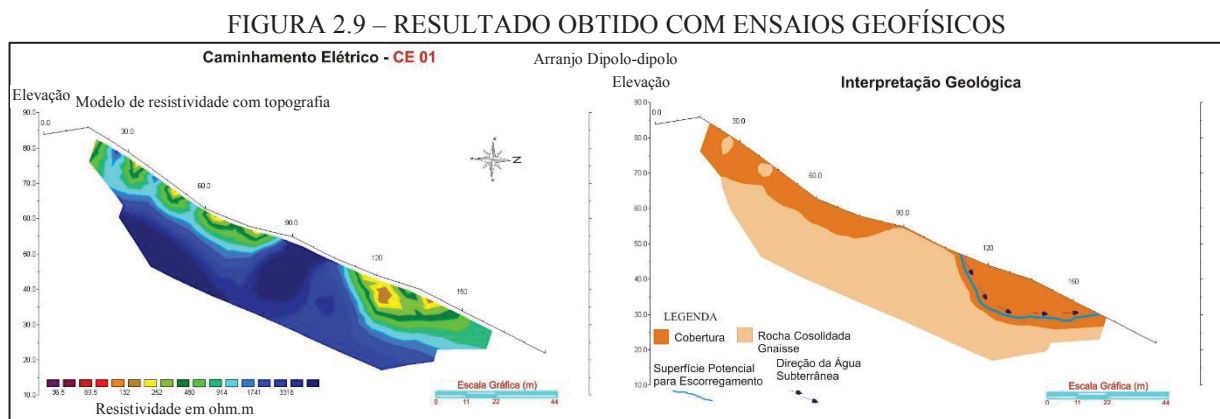
DEINFRA (1994) definiu sondagem rotativa como um método de investigação geológico-geotécnica que consiste no uso de um conjunto moto-mecanizado, com o objetivo de obter testemunhos de materiais rochosos, contínuas e com formato cilíndrico, como consequência da perfuração dada basicamente por forças de penetração e rotação que, conjugadas, atuam com poder cortante.

2.6 MÉTODOS INDIRETOS DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

WSDOT (2015) afirma que os ensaios que envolvem perfurações *in situ* e laboratoriais são normalmente os principais meios utilizados para obter informações do subsolo. Porém, outros meios de obtenção de dados de subsuperfície devem ser considerados para fornecer uma imagem mais completa das condições desta e para ajudar a reduzir os custos de exploração. Desse modo, as técnicas geofísicas (método indireto de investigação geotécnica) também devem ser consideradas para, por exemplo, preencher lacunas entre os furos e para, potencialmente, reduzir os custos envolvidos.

2.6.1 Geofísica

Para Souza e Gandolfo (2012) a geofísica é uma ciência que desenvolve técnicas de investigação indireta utilizando conceitos físicos, com aplicação em geologia e geotecnia. Indicada quando se deseja conhecer a estratigrafia em áreas maiores, pois a partir dela geram-se informações que ampliam o conhecimento da área do projeto, minimizando os riscos inerentes e as ambiguidades dos modelos interpretativos gerados. Marinho (2005) também afirma que a geofísica a partir do uso dos princípios básicos da física, permite estudar as propriedades físicas dos solos e das rochas. Apontando que para a engenharia geotécnica existem vários métodos geofísicos para se obter informações importantes, tais como: métodos elétricos, magnéticos, sísmicos, dentre outros. A FIGURA 2.9 traz um exemplo de perfil estratigráfico obtido a partir do perfil de caminhamento elétrico gerado através do resultado de um ensaio de geofísica.



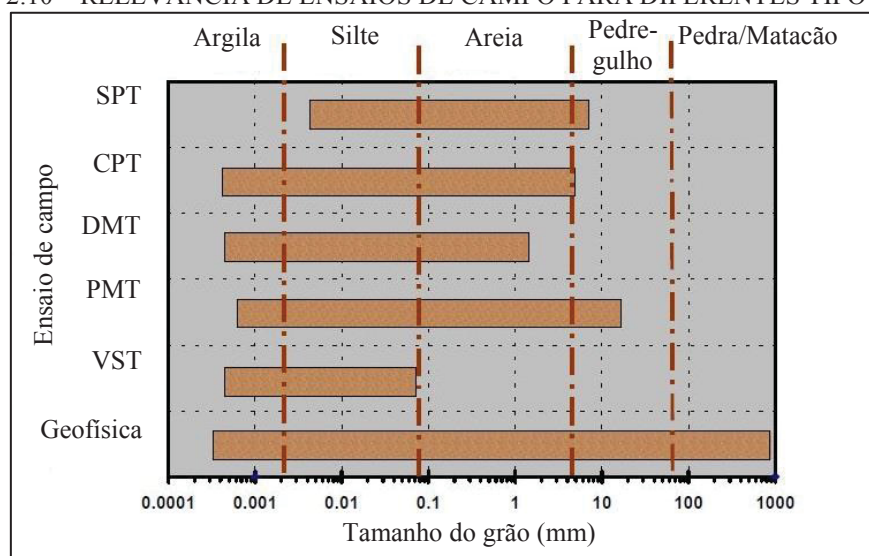
FONTE: XAVIER (2006)

WSDOT (2015) destaca que a geofísica é especialmente útil para definir a estratigrafia geológica e pode ser útil para definir determinadas propriedades. Segundo o autor, ela deve ser utilizada em combinação com informação de métodos diretos de exploração, tais como SPT, CPT, entre outros, para determinar a estratificação dos materiais do subsolo, o perfil do topo do substrato rochoso e sua qualidade, profundidade do lençol freático, limites das camadas do solo, presença de vazios e depósitos anômalos. Assim, pode-se utilizar métodos geofísicos de investigação tanto preliminarmente à realização de sondagens diretas, visando a determinação dos melhores locais para a realização dessas perfurações, como no período posterior a essas sondagens, auxiliando no entendimento da estratigrafia em grandes áreas.

Mayne (2006) destacou que uma abordagem integrada deve ser adotada para estudar o terreno pelo qual a geofísica (método não destrutivo) é usada pela primeira vez para ter uma boa seleção da localização das sondas, que por sua vez ajudam na escolha e orientação dos ensaios de perfurações no solo, ensaios mais caros e laboriosos, para obter amostras indeformadas para testes controlados de laboratório com o triaxial e o cisalhamento simples. Assim, um modelo do solo versátil e bem calibrado ligaria estes aspectos gerando uma estrutura racional e consistente.

Mayne *et al.* (2002) apontaram que os ensaios geotécnicos de campo como o SPT, CPT (*Cone Penetration Test* – ensaio de cone), CPTu (*Piezocone Penetration Test* – ensaio de piezocone), DMT (*Dilatometric Marchetti Test* – ensaio dilatométrico), PMT (*Pressuremeter Ménard Test* – ensaio pressiométrico) e VST (*Vane Shear Test* – Vane teste), são métodos semi-diretos de investigação para obter informações do solo sob várias situações de carga e condições de drenagem. Estes testes são complementares e devem ser usados em conjunto com geofísica para desenvolver uma compreensão das formações do solo e de rocha natural que compõem a área do projeto. Sendo que a aplicabilidade geral do método de ensaio depende, em parte, dos tipos de solo encontrados durante a investigação no local, como mostrado na FIGURA 2.10 a seguir. A relevância de cada teste também depende do tipo de projeto e seus requisitos. Em geral, os métodos geofísicos também podem ser aplicados às massas de rocha alterada e formações rochosas fraturadas. Uma importante observação que se tem a partir dessa comparação é que a geofísica pode ser aplicada para qualquer tipo de solo.

FIGURA 2.10 – RELEVÂNCIA DE ENSAIOS DE CAMPO PARA DIFERENTES TIPO DE SOLO



FONTE: MAYNE, CHRISTOPHER e DEJONG (2002)

Mayne *et al.* (2002) garantiram que existem vários tipos de ensaios geofísicos que podem ser usados para criar perfis estratigráficos e no delineamento de geometrias de subsuperfície. Estes incluem a medição de ondas mecânicas (sísmica de refração, entre furos de sondagem, ao longo do furo e ensaio de análise espectral de onda de superfície), bem como técnicas eletromagnéticas (resistividade, eletromagnético, magnético e de radar). As ondas mecânicas são adicionalmente úteis para a determinação das propriedades elásticas dos meios em subsuperfície. Os ensaios geofísicos não alteram as condições do solo e, portanto, são classificados como não destrutivos, e vários são realizados ao nível da superfície (denominados não-invasivos).

Desse modo, a geofísica pode ser aplicada através de diferentes métodos, sendo importante um estudo prévio para escolha da técnica mais adequada e compatível com as condições de campo e os objetivos. Na TABELA 2.2 estão resumidos alguns métodos geofísicos e suas principais aplicações conforme apresentado por Reynolds (1998).

TABELA 2.2 – MÉTODOS GEOFÍSICOS E SUAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Método Geofísico	Propriedade física dependente	Aplicações									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gravimétrico	Densidade	P	P	s	s	s	s	!	!	s	!
Magnético	Susceptibilidade	P	P	P	s	!	m	!	P	P	!
Refração sísmica	Módulo de elasticidade; densidade	P	P	m	P	s	s	!	!	!	!
Reflexão sísmica	Módulo de elasticidade; densidade	P	P	m	s	s	m	!	!	!	!
Resistividade	Resistividade	m	m	P	P	P	P	P	s	P	m
Potencial espontâneo	Diferença de potencial	!	!	P	m	P	m	m	m	!	!
Polarização induzida	Resistividade; potência	m	m	P	m	s	m	m	m	m	m
Eletromagnético (EM)	Condutância; indutância	s	P	P	P	P	P	P	P	P	m
Radar de penetração do solo	Permissividade	!	!	m	P	P	P	s	P	P	P

FONTE: REYNOLDS (1998)

Onde:

P = método principal;

s = método secundário;

m = pode ser utilizado, mas não é a melhor abordagem;

(!) = não aplicável

Aplicações:

1. Exploração de hidrocarbonetos (carvão, gás, óleo)
2. Estudos geológicos regionais (áreas acima de centenas de km)
3. Exploração / desenvolvimento de depósitos minerais
4. Investigações locais de engenharia
5. Investigações hidrogeológicas
6. Detecção de cavidades na subsuperfície
7. Mapeamento de plumas de contaminação e lixiviados
8. Localização e definição de objetos metálicos enterrados
9. Arqueologia
10. Geofísica forense

De acordo com Kearey, Brooks e Hill (2009), ensaios envolvendo eletromagnetismo não devem ser realizados nas proximidades de objetos metálicos que possam perturbar o campo magnético local, tais como linhas férreas, veículos, estradas, cercas, edificações entre outros.

Segundo Dourado *et al.* (2003) a técnica GPR (*Ground Penetrating Radar*), ou Radar de Penetração no Solo ou ainda Georadar, utiliza-se de ondas eletromagnéticas de alta frequência (ondas de rádio), na faixa de 10 a 1000 MHz, para estudo de estruturas subsuperficiais. Esta técnica tem se mostrado muito eficiente, quando aplicada em condições geológicas e geofísicas favoráveis, ou seja, em locais que possuam rochas com resistividades elétricas altas.

O método da resistividade elétrica baseia-se no fato de, em geral, solos diferentes apresentarem resistividades elétricas distintas. O princípio de funcionamento deste método fundamenta-se no estudo do campo elétrico de potenciais, criado artificialmente pela introdução no terreno de uma corrente elétrica e as diferenças de potenciais são medidas na superfície. Partindo da finalidade deste estudo, onde a determinação da resistividade elétrica dos locais prospectados, num ponto ou em vários pontos da superfície do terreno, é possível identificar as diferentes camadas ao longo da profundidade no local sondado (KEAREY, BROOKS e HILL, 2009).

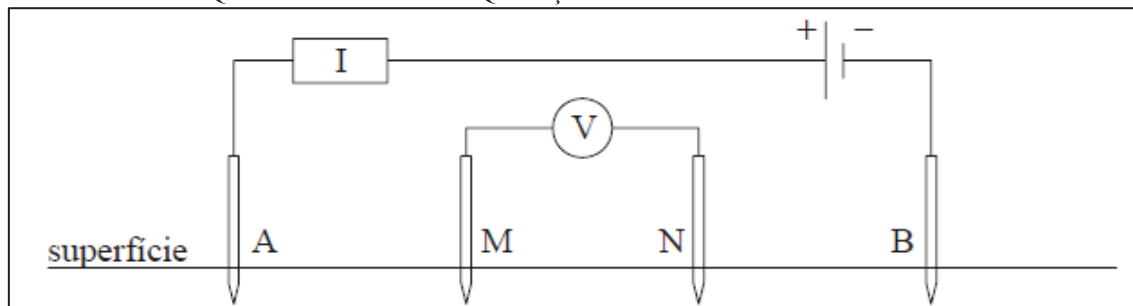
Samouëlian *et al.* (2005) também destacam a importância da prospecção de resistividade elétrica, afirmando que este é um método muito atrativo para a caracterização do solo. Ao contrário das sondagens diretas, onde há perfuração pontual e amostragem, a

resistividade elétrica não é destrutiva e pode fornecer medições em uma ampla região. As aplicações são numerosas, como a determinação do horizonte do solo e heterogeneidades específicas. Permitindo melhorar a compreensão da estrutura do solo e é utilizada em campos variados, inclusive na engenharia civil.

Mayne, Christopher e DeJong (2002) caracterizam a resistividade como uma propriedade elétrica fundamental dos materiais sólidos, que pode ser usada para avaliar os tipos de solo, variações de fluido nos poros e as alterações em meios de subsuperfície, a qual é medida em ohm-metros. Usando pares ou conjuntos de eletrodos embutidos na superfície do solo, o ensaio de resistividade mede a diferença de potencial elétrico da corrente aplicada em um dos eletrodos e chegando em outro. Sendo que o espaçamento entre os eletrodos regula a profundidade alcançada pela resistividade e a interpretação é afetada pelo tipo de matriz utilizada (Wenner, dipolo-dipolo, Schlumberger).

Gandolfo e Gallas (2007) explicam que o método da eletrorresistividade consiste basicamente na injeção de uma corrente (I) no solo por um par de eletrodos (denominados de A e B) e a medida da diferença de potencial (V) resultante da passagem desta corrente por intermédio de outro par de eletrodos situados nas proximidades (denominados M e N) (FIGURA 2.11).

FIGURA 2.11 – ESQUEMA BÁSICO DE AQUISIÇÃO DO MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE

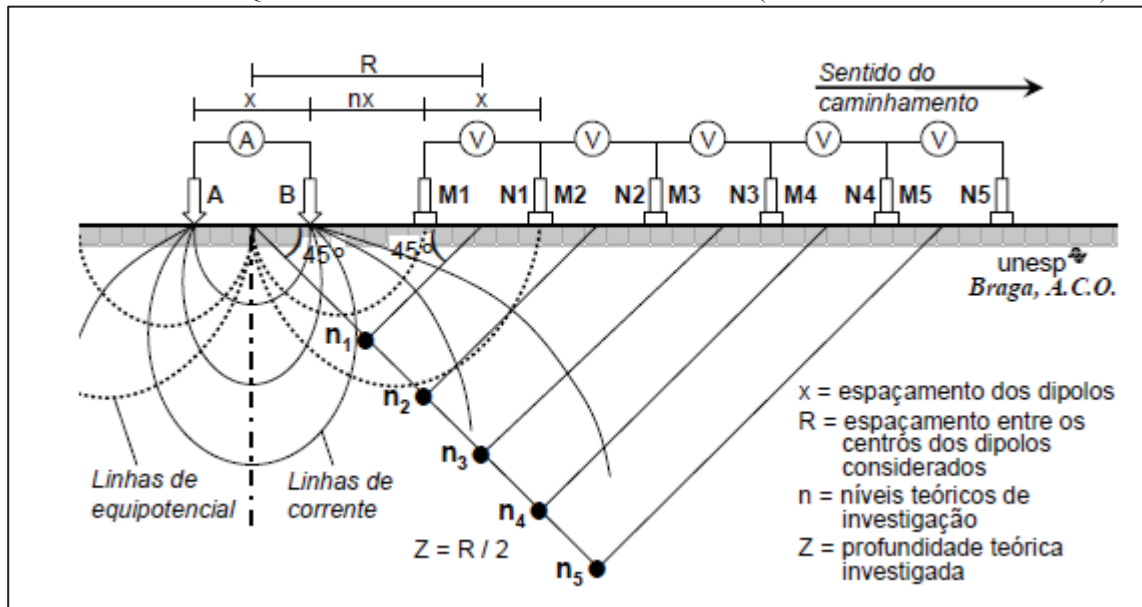


FONTE: GANDOLFO (2007)

Braga (2006) relata que ensaio é desenvolvido ao longo de perfis previamente estaqueados, com uma distância igual a X . As medidas são feitas a várias profundidades de investigação, denominadas níveis, e são atribuídas na intersecção das linhas que partem a 45° dos centros AB e MN, como representado na FIGURA 2.12. Após a disposição do arranjo no terreno, e obterem-se as leituras pertinentes, todo o arranjo é deslocado para a estaca seguinte e efetuadas as leituras correspondentes, continuando-se este procedimento até o final do perfil a ser levantado. Os dados obtidos são plotados nas posições dos níveis e interpolados, gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente. A interpretação desses dados pode ser efetuada

tanto em perfis como em mapas, onde a interpretação é feita de forma qualitativa podendo posteriormente ser processadas (quantificadas) através da inversão 2D dos dados de campo por programas adequados, para então, pode-se obter uma seção geoeletrica real.

FIGURA 2.12 – ESQUEMA DO CAMINHAMENTO ELÉTRICO (ARRANJO DIPOLO-DIPOLO)

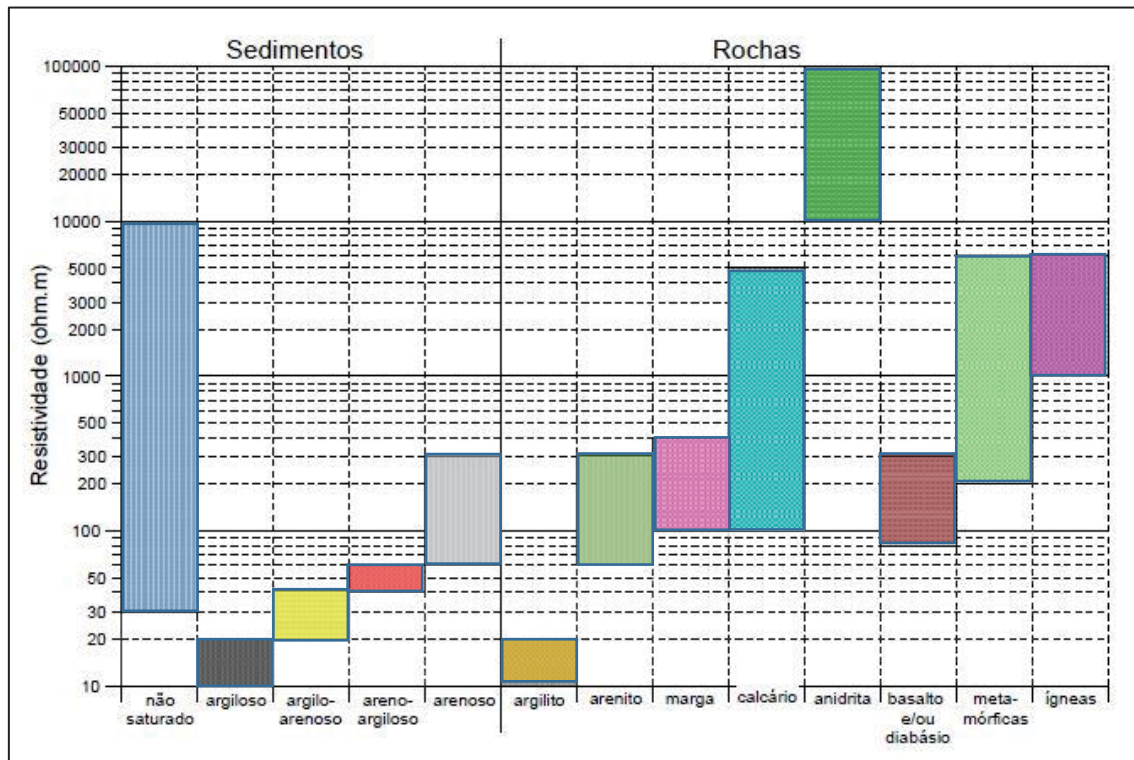


FONTE: BRAGA (2006)

Kearey, Brooks e Hill (2009) explicam que a partir da eletrorresistividade é possível obter de forma indireta os valores de resistividade elétrica das camadas geológicas de subsuperfície, bem como estimar a litologia, a profundidade e a espessura desses estratos. Sendo as duas principais metodologias para esse tipo de levantamento geofísico a técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e de Caminhamento Elétrico (CE).

Um mesmo tipo litológico pode apresentar uma grande faixa de variação nos valores de resistividade, como apresentado na FIGURA 2.13 onde se tem as variações típicas, nos valores de resistividade para os sedimentos (não saturados e saturados) e para as rochas.

FIGURA 2.13 - FAIXAS DE VARIAÇÕES NOS VALORES DE RESISTIVIDADE EM SOLOS E ROCHAS



FONTE: BRAGA (2006)

Neste item foram abordados aspectos da geofísica na geotecnia. No item 4.3.3, Geofísica (Sondagem indireta), estão descritos os procedimentos para a realização do ensaio e a teoria da resistividade elétrica.

2.7 PARÂMETROS HIDRÁULICOS DOS SOLOS

2.7.1 Retenção de Água

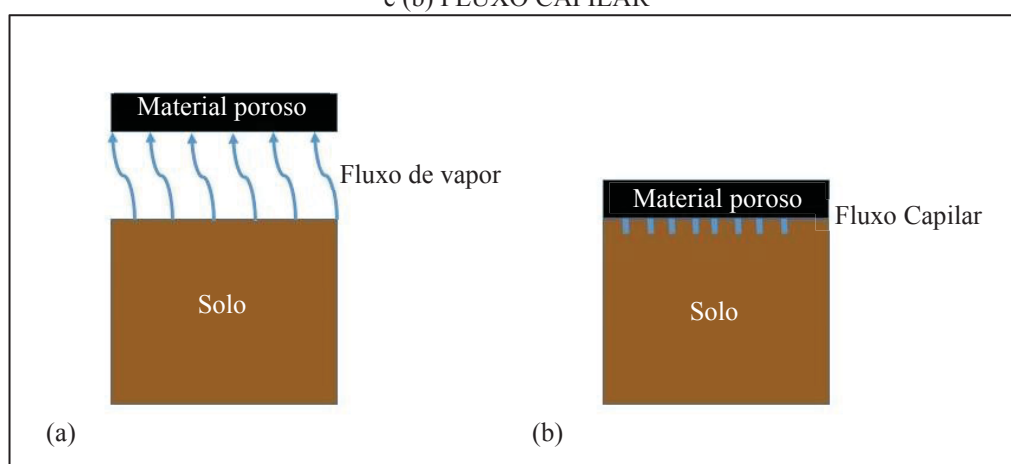
Marinho (2005) descreve a sucção como a energia com que um elemento poroso retém água quando está livre para se mover. Sendo que a mineralogia, a densidade e a umidade do solo são responsáveis substancialmente por esta aversez por água. A pressão negativa na água intersticial influencia vigorosamente as tensões que controlam o comportamento dos solos não saturados, e em algumas ocasiões também as dos solos saturados. Esta pressão é dada pela diferença entre a pressão atmosférica e a pressão na água, denominada de sucção matricial. Tem-se que a sucção em solos é composta de duas partes, a sucção matricial e a sucção osmótica.

Krahn e Fredlund (1971) descreveram a sucção total como sendo a soma da sucção matricial e osmótica. A sucção matricial é a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água, que é medida quando uma solução de água, de mesma composição química que o solo, possui alguma umidade e está em contato com esta solução aquosa, através de uma membrana permeável, que entra em equilíbrio com a pressão de vapor. Para medir a sucção osmótica a água deve ser pura e a membrana semipermeável.

Fredlund e Rahardjo (1993) interpretaram que a sucção matricial está relacionada com capilaridade e adsorção, ao arranjo estrutural dos elementos do solo, e que a sucção osmótica com a composição química presente na água entre as partículas deste.

Marinho (1994) descreveu a sucção total como aquela que é obtida quando o fluxo de água entre o sistema medição e o solo é de vapor, onde as moléculas de água têm que vencer as forças capilares no solo e fortuitamente forças osmóticas, as quais agem devido à presença de sais, escapando da água de poro. Para isso acontecer deixa-se um espaço de ar entre o solo e o material poroso, pois este atua como barreira para os sais e permite apenas o fluxo de vapor (FIGURA 2.14 (a)). A sucção é total, uma vez que forças, osmóticas e capilares, que retêm a molécula de água, estarão incorporadas. Já a sucção matricial é medida quando o fluxo ocorre apenas por capilaridade, pois nessa situação a água passa pelas partículas de solo e pelas fibras do material poroso sem perder continuidade, isso implica no contato entre os dois componentes do sistema (FIGURA 2.14 (b)).

FIGURA 2.14 – TIPOS DE FLUXOS DO SOLO PARA O MATERIAL POROSO: (a) FLUXO DE VAPOR e (b) FLUXO CAPILAR



FONTE: ADAPTADO DE MARINHO (1994)

Fundamentando-se na literatura verifica-se que caracterização do solo usando sucção é a melhor maneira de compreender o equilíbrio de umidade dos solos. Marinho (1994) afirmou

que dependendo do tipo de solo e do projeto geotécnico analisado, o solo deverá reagir distintamente em relação ao ganho ou à perda de umidade. Marinho (2005) afirmou que a técnica do papel filtro é com certeza a mais simples de todas as técnicas para se medir sucção.

Marinho (1994) explicou que o método do papel filtro baseia-se no princípio de que um solo que possua umidade, quando colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de absorver água, ou seja com umidade menor, faz com que esse material absorva água do solo até que o equilíbrio de pressão do sistema seja alcançado.

2.7.2 Permeabilidade

Fredlund e Rahardjo (1993) explanaram que a aplicação das leis de fluxo para problemas de engenharia requer a quantificação das propriedades hidráulicas de um solo. O coeficiente de permeabilidade, k , na lei de Darcy e o coeficiente de difusão, D , na lei de Fick são exemplos de propriedades hidráulicas. Estas propriedades devem ser determinadas utilizando técnicas que foram verificadas experimentalmente, a fim de se obter uma análise de fluxo da água fiável em um solo não saturado. Para Terzaghi, Peck e Mesri (1996) ensaios de campo e de laboratório podem ser realizados para se obter este parâmetro.

Das (2007) explanou que o estudo do fluxo de água em solos permeáveis permite avaliar e quantificar os mecanismos de infiltração e percolação sob diversas condições hidráulicas ou níveis de sucção, auxiliando no entendimento de problemas envolvendo estruturas de terra sujeitas a forças de percolação. Isso ocorre devido aos vazios presentes nos solos, por onde a água pode fluir de um ponto para outro, tornando-os permeáveis.

Os fatores do solo que influenciam na permeabilidade foram apresentados por Pinto (2006). Ele relatou que esta age proporcionalmente ao índice de vazios do solo, que o grau de saturação atua na permeabilidade do solo, pois um solo não saturado tem menor coeficiente de permeabilidade do que de um solo totalmente saturado, porém a diferença não é muito grande. Constatando ainda que em solos residuais, por suas estruturas serem compostas por macroporos, a água percola com maior facilidade, os solos sedimentares explicam a anisotropia, como as partículas destes solos tendem a ficar com suas maiores dimensões orientadas na posição horizontal, nessa direção a permeabilidade é maior e, sobretudo, porque as diversas camadas decorrentes da sedimentação apresentam permeabilidades diferentes.

2.8 VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS DOS SOLOS

Phoon e Kulhawy (1999b) relataram que estatísticas de inúmeras propriedades do solo contidas na literatura geotécnica não são adequadas para o uso geral, principalmente porque elas foram determinadas a partir da variabilidade total das análises assumindo implicitamente muitas incertezas. No entanto, a variabilidade geotécnica é mais complexa e resulta de muitas origens diferentes de incertezas. A contribuição da variabilidade, dos erros de medição e dos modelos assumidos são as causas para a incerteza total das propriedades do solo e que o projeto depende claramente das condições do local, nível dos equipamentos, controle de procedimento e da precisão do modelo de correlação. Portanto, as estatísticas de propriedade do solo, que são determinadas a partir de análises de variabilidade total, só podem ser aplicadas ao conjunto específico de circunstâncias (condições do local, técnicas de medição, modelos de correlação) das quais as propriedades do solo no projeto foram derivadas.

Phoon *et al.* (2006) destacam que podem ser definidos três níveis de heterogeneidade do solo: a heterogeneidade estratigráfica, heterogeneidade litológica e a variabilidade inerente do solo. A estratigráfica resulta dos processos geológicos e geomorfológicos. Estratigrafias podem ser extremamente complexas e heterogêneas. A heterogeneidade litológica, pode se manifestar, por exemplo, sob a forma de finas camadas mais moles entre outras camadas mais duras ou a inclusão de bolsões de outro tipo de solo, dentro de uma massa de solo relativamente uniforme. E a variabilidade inerente do solo é a variação das propriedades espaciais de um local para outro dentro de uma massa de solo que podem ser, até mesmo, consideradas como homogêneas para fins geotécnicos.

El-Ramly (2001) explica que uma propriedade do solo é constante ou tem pouca variação em posições próximas, porém o mesmo não se aplica a grandes distâncias, pois com aumento da distância a heterogeneidade do mesmo torna-se significativa, ou seja, a variabilidade espacial não é um processo aleatório, uma vez que é controlado por uma correlação, entre os parâmetros do solo e a sua posição no espaço. Assim, a variabilidade espacial está associada às heterogeneidades inerentes que os parâmetros do solo apresentam em locais diferentes, mesmo em depósitos homogêneos.

2.9 CONCEITOS BÁSICOS DE ESTATÍSTICA

Uma forma prática de considerar a variabilidade, tanto espacial como dos parâmetros do solo, é aplicando-se conceitos básicos de estatística como a média, o desvio padrão e coeficiente de variação. A seguir tem-se uma breve explicação destas medidas.

- Média

A média de um conjunto de dados observados é a soma de todos os valores e o número total de observações, dada pela equação (2.1).

$$\bar{x} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} \quad (2.1)$$

Onde:

$\bar{x}$ é a média;

x_1 é o primeiro elemento da amostra;

x_n é o último elemento da amostra;

n é a quantidade de elementos da amostra.

- Desvio Padrão

O desvio padrão é uma das medidas de dispersão, as quais traduzem a variação de um conjunto de dados em torno da média, ou seja, a variabilidade dos resultados obtidos. Ele é utilizado para verificar quanto os resultados se concentram próximos ou não da tendência central de um conjunto de observações. Quantificando, assim, a tendência que os resultados de uma experiência aleatória têm para se concentrarem em determinados valores (Morais, 2005).

O desvio padrão indica a dispersão dos dados dentro da amostra, isto é, o quanto os dados em geral diferem da média. A grande vantagem do desvio padrão é que este possibilita analisar a variabilidade na mesma escala em que os dados foram medidos (Anjos *et al.*, 2009).

O desvio padrão é a raiz quadrada da variância, sendo que esta é a medida que dá o grau de dispersão de probabilidade em torno da média. Estes são calculados pelas equações (2.2) e (2.3), variância e desvio padrão, respectivamente (Correa, 2003).

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2.2)$$

$$\sigma = \sqrt{S} \quad (2.3)$$

Onde:

S é a variância;

x_i é o elemento;

σ é o desvio padrão.

- Coeficiente de Variação

Para Anjos *et al.* (2009) coeficiente de variação é a comparação entre a variação do desvio padrão com a média, através da razão entre eles conforme a equação (2.4), o qual geralmente é multiplicado por 100 para dar o resultado em porcentagem (%). O coeficiente de variação é usado para comparar dados de diferentes grandezas.

$$COV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2.4)$$

Onde:

COV : coeficiente de variação.

Harr (1987) citado por Phoon *et al.* (2006) forneceu uma regra de grande importância, pela qual os coeficientes de variação abaixo de 10% são considerados como de baixa dispersão, entre 15% e 30% moderada e maior do que 30% de alta.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo traz a localização da área de estudo e como foi a escolha desta, a qual corresponde a uma encosta inserida na Serra do Mar, suas principais características, estando entre elas a caracterização geológica/litológica da região do talude. Estes estudos fazem parte de um projeto que se desenvolve ao longo da extensão da rodovia Régis Bittencourt (BR-116), na qual são estudadas as encostas dos trechos pertencentes à Serra do Azeite (km 500 ao 522) e à Serra Pelada (km 540 ao 555). Como parte das etapas deste projeto de pesquisa, foram levantados os principais taludes nessas localidades, através da comparação das características geométricas, do histórico de escorregamentos, além de análises de mapas de declividade. Por meio desse processo, chegou-se à escolha do talude do km 552+000 PN para serem realizadas campanhas de investigações geológico-geotécnicas.

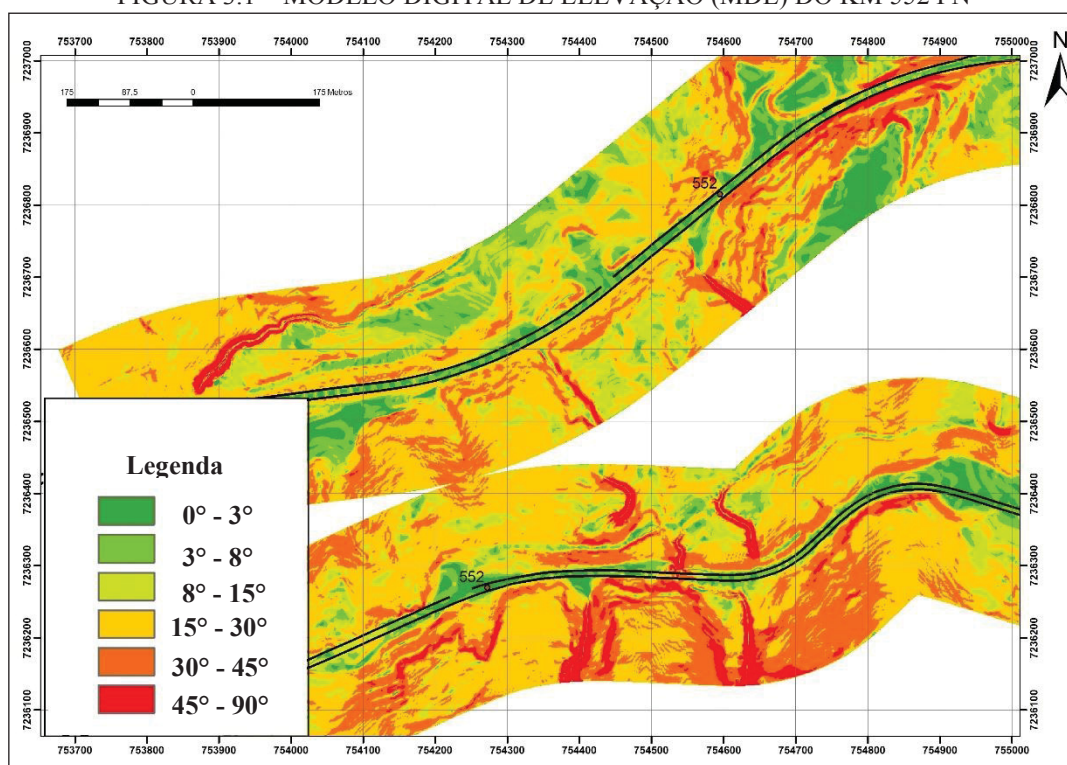
3.2 DEFINIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

Inicialmente, levantaram-se os históricos de ocorrências de movimentos de massa na rodovia Régis Bittencourt, com 284 registros, dentro do trecho que interliga São Paulo/SP a Curitiba/PR, tendo aproximadamente 400 km de extensão sob concessão da Autopista Régis Bittencourt. A partir disto, foram selecionados locais para a realização de estudos geológico-geotécnicos (com a realização de investigações diretas e indiretas) e monitoramento através da instalação de equipamentos.

Nesse levantamento, observou-se que, proporcionalmente à extensão, a maioria dos deslizamentos e os principais registros se encontravam dentro das duas serras: a Serra Pelada e a Serra do Azeite, justificando o foco do projeto de pesquisa nessas regiões.

Em paralelo ao levantamento de ocorrências, foram elaborados Modelos Digitais de Elevação (MDE), mapas criados a partir de ferramentas do software ArcGIS, conforme apresentado na FIGURA 3.1.

FIGURA 3.1 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE) DO KM 552 PN



A geração dos MDE's tem como base arquivos de uma restituição aerofotogramétrica em escala 1:1.000, com curvas de nível de 1 em 1 m, ortofotos ao longo da faixa de domínio da rodovia e o traçado da hidrografia da área. Inserindo estes dados no *software* ArcGIS e através da ferramenta de interpolação "*Topo to raster*" obtém-se os MDE's do trecho especificado. Em relação à resolução do modelo, considerou-se a resolução de 1 metro para o tamanho do pixel no processo de interpolação, de acordo com o critério de equidistância das curvas de nível (HENGL, 2006).

Para a representação da declividade, as mesmas foram separadas em seis níveis: 0° a 3°, 3° a 8°, 8° a 15°, 15° a 30°, 30° a 45° e 45° a 90°. Os valores que representam uma declividade baixa encontram-se em verde, moderada em amarelo e alta em vermelho conforme a legenda na FIGURA 3.1. Depois de obtidos os MDE's e definidos os intervalos de análise, confeccionou-se os mapas de declividade por meio da ferramenta "*Slope*", do *software* ArcGIS.

Com base nos registros de ocorrências e com a visualização dos trechos de maior declividade, foram inseridos os pontos de interesse no Google Earth, separados por áreas e analisadas, ainda em escritório, onde foram destacados os pontos para visitas de campo, verificando: as características geométricas (através da ferramenta de perfil de elevação), os acessos aos locais e a logística para realizar os ensaios geológico-geotécnicos e implantação do monitoramento.

Depois do trabalho em escritório os locais selecionados foram visitados, pelos integrantes do projeto juntamente com uma equipe da geologia, a qual coletou informações referentes aos fatores geológicos condicionantes no processo de infiltração de água ao longo das encostas. A geologia da região será apresentada no item 3.4 deste capítulo.

Após as visitas de campo, onde foram analisados os locais quanto ao acesso para futuras visitas, instalação de equipamentos e realização de ensaios *in situ*, definiu-se 3 locais para a realização dos estudos específicos, sendo que o talude do km 552 PN, por seus históricos de movimento de massa e maior acessibilidade de equipamentos para ensaios, foi o escolhido para a execução de sondagens mistas e geofísica, sendo este talude o foco dessa dissertação.

3.3 LOCALIZAÇÃO

O talude escolhido está localizado na Serra Pelada, a qual pertencente à cadeia de montanhas da Serra do Mar, situado na cidade da Barra do Turvo, no estado de São Paulo. A base deste talude encontra-se na rodovia Régis Bittencourt, a qual o intercepta no km 552 Pista Norte (PN). Cabe destacar a importância econômica, turística e logística desta via, pois ela é principal meio de ligação entre as regiões Sul e Sudeste do país (FIGURAS 3.2 e 3.3).

FIGURA 3.2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

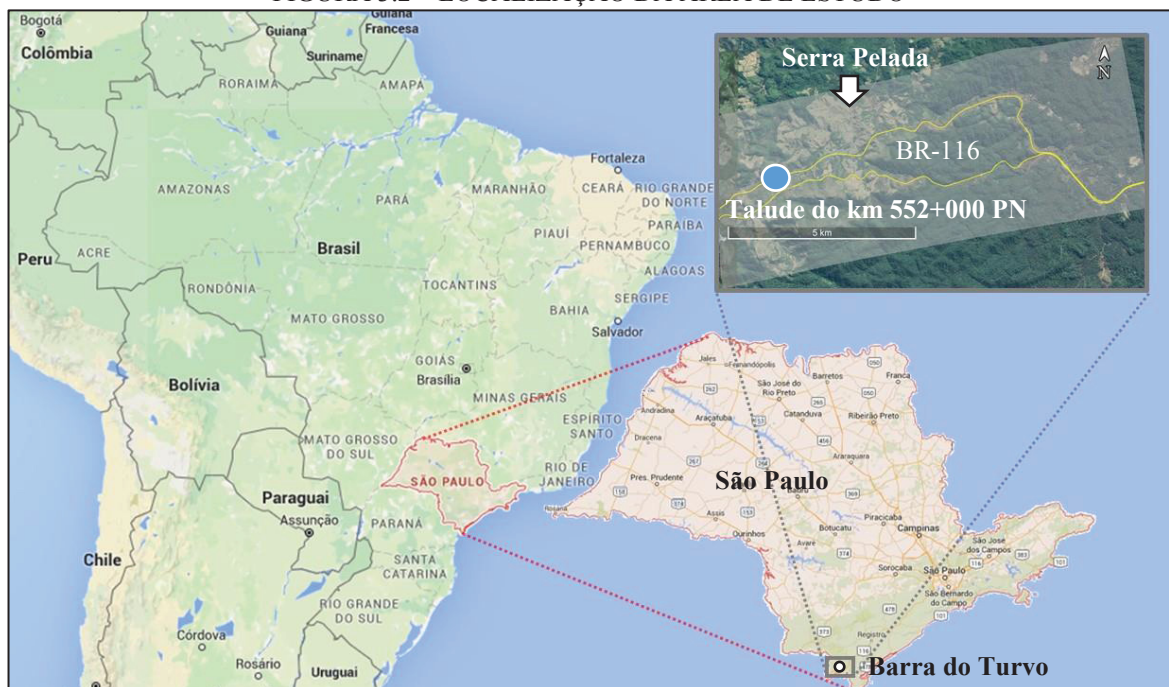


FIGURA 3.3 – LOCALIZAÇÃO DO TALUDE



Como características geométricas, o talude selecionado possui 300 m de extensão e altura de 232 m. A rodovia atravessa-o na elevação de 720 m. O talude possui cinco patamares bem definidos, devido a obras de estabilização que foram realizadas previamente (FIGURA 3.4).

FIGURA 3.4 – TALUDE DO KM 552 PN



3.4 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-LITOLÓGICA

Quanto aos aspectos geológicos, na área de interesse da presente dissertação existem dois grandes domínios que a caracterizam: as baixadas litorâneas, constituídas principalmente por depósitos sedimentares cenozóicos recentes, com idades de até 120.000 anos, e as serranias costeiras, constituídas por rochas cristalinas antigas (ígneas e metamórficas), com idades de 2.200 a 60 milhões de anos (CBH-RB, 2011).

As rochas mais antigas (2.200 a 540 Ma) são principalmente gnaisses, xistos, filitos, quartzitos e rochas calcárias, quebradas e dobradas, com alinhamento principalmente ENE, seguidas por granitos (650 a 540 Ma). A desagregação do antigo supercontinente Gondwana e a consequente separação da América do Sul e África causou movimentos que geraram rochas vulcânicas básicas e alcalinas (diques do alinhamento Guapiara e os corpos de rochas alcalinas de Jacupiranga, Juquiá, Pariquera-Açu e Morro de São João). A partir dessa época também se formou o conjunto de serras do Mar e Paranapiacaba (CBH-RB, 2011).

No contexto regional, as rochas do Embasamento Cristalino são representadas pelo Gnaiss Bandado Barra do Azeite e por sequências supracrustais da formação Turvo-Cajati. O Gnaiss Bandado Barra do Azeite (2.200-2.100 Ma) é constituído por ortognaiss bandado, migmatizado em condições de fácies anfibolito alto e milonitizado em condições de fácies xisto-verde, são encontradas no trecho de estudado (FIORI, 2015).

Faleiros *et al.* (2013) descreveram o Gnaiss Bandado Barra do Azeite pertencendo à unidade geológica ao período Paleoproterozoico constituída de biotita e biotita-hornblenda gnaiss bandado migmatítico e milonítico com leitos mesocráticos ricos plagioclásio ou tonalíticos, leucossomas graníticos leucocráticos e bandas e lentes de anfibolito, com lentes de talco xisto e serpentina-talco xisto.

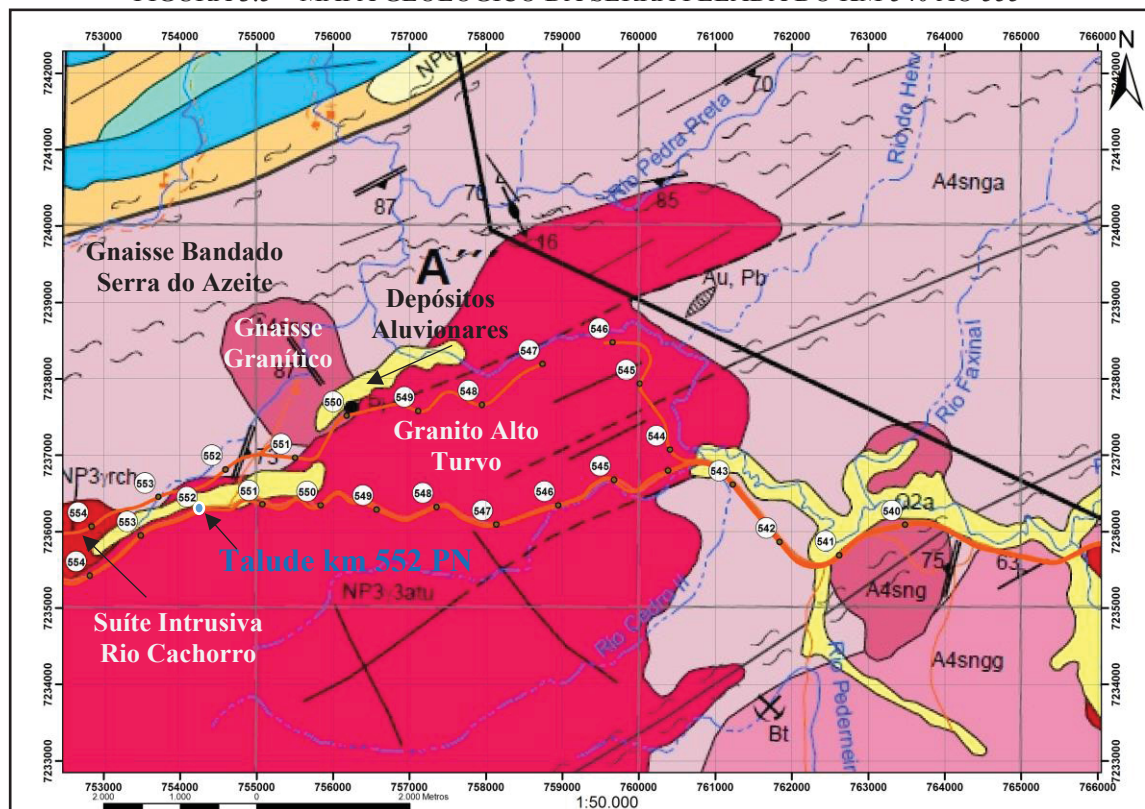
A Formação Turvo-Cajati, tem idade máxima de sedimentação de cerca 850-900 Ma, e é composta por rochas metassedimentares siliciclásticas e carbonáticas metamorfizadas em condições de fácies xisto-verde a granulito. Essa formação é subdividida em três unidades: Unidade de Filito, Unidade de Micaxisto e Unidade Paragnáissica (FIORI, 2015). Próximo à rodovia encontram-se as duas últimas citadas.

Ocorrem ainda, no trecho estudado da rodovia, rochas intrusivas na forma de batólitos graníticos de várias naturezas e formas, incluindo o Granito Alto Jacupiranguinha e o Granito Alto Turvo (FIORI, 2015). Estas observações foram feitas em campo, a partir da interpretação

do Mapa Geológico da região Serra Pelada (folha Eldorado Paulista, SG.22-X-B-VI) elaborado por Faleiros *et al.* (2013).

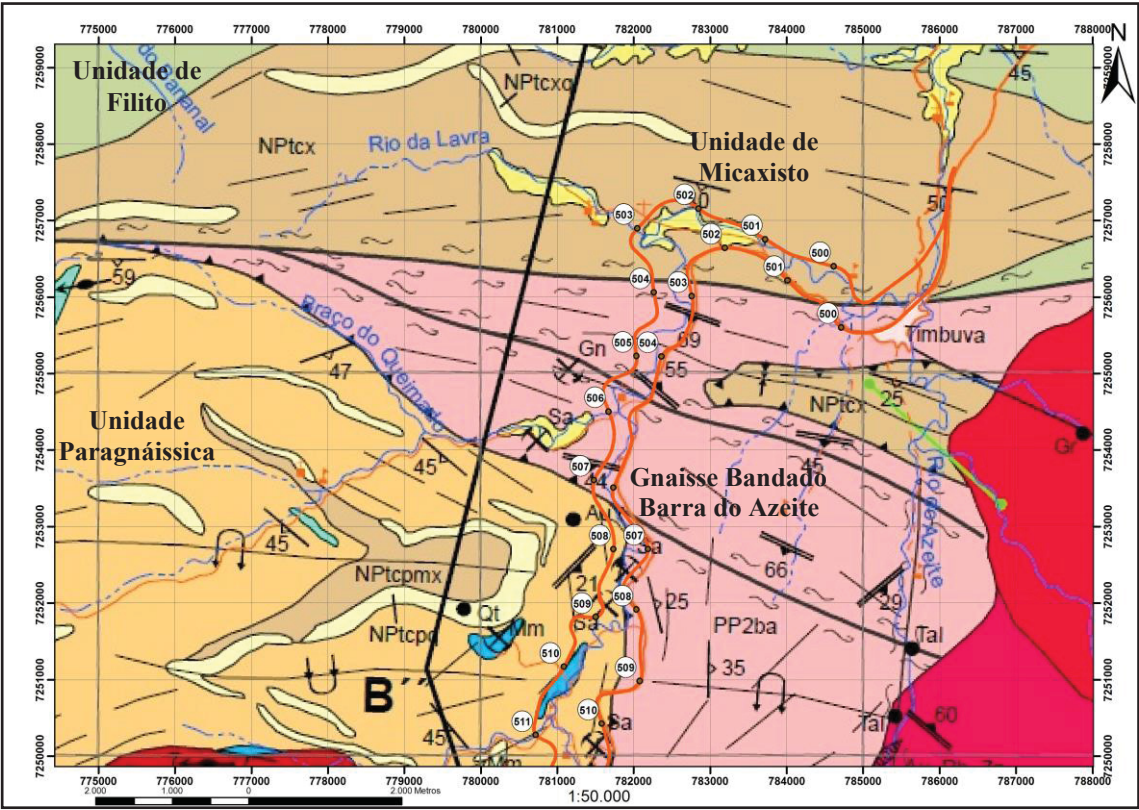
Visando apresentar essas informações mais detalhadamente, o mapa geológico citado acima foi subdividido em três partes, e sobre as subdivisões, foi plotada a rodovia Régis Bittencourt, com os respectivos quilômetros, tanto para a pista norte, como para a pista sul, conforme mostrado nas FIGURAS 3.5 a 3.7.

FIGURA 3.5 – MAPA GEOLÓGICO DA SERRA PELADA DO KM 540 AO 555



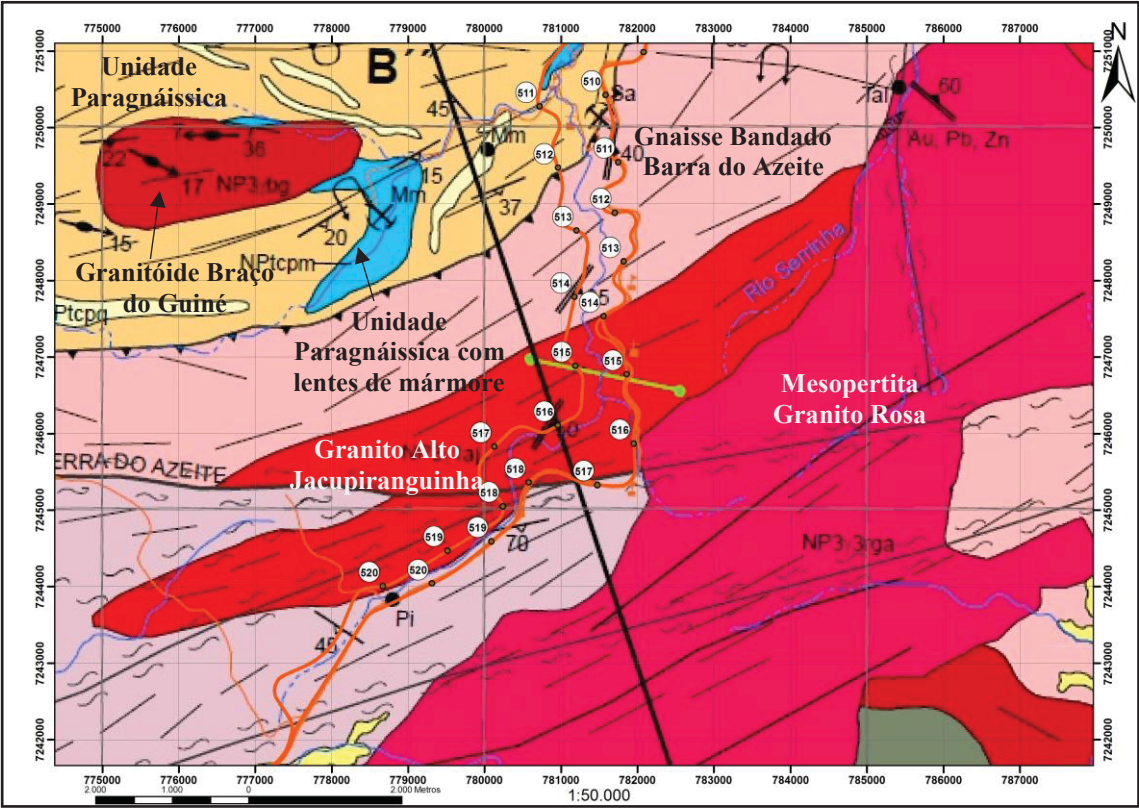
FONTE: Adaptado de FALEIROS *et al.* (2013)

FIGURA 3.6 – MAPA GEOLÓGICO DA SERRA DO AZEITE DO KM 500 AO 510



FONTE: Adaptado de FALEIROS *et al.* (2013)

FIGURA 3.7 – MAPA GEOLÓGICO DA SERRA DO AZEITE DO KM 511 AO 520



FONTE: Adaptado de FALEIROS *et al.* (2013)

3.4.1 Serra Pelada

- Granito Alto Turvo

O Granito Alto Turvo (FIGURA 3.8) ocorre praticamente em todo o trecho da rodovia que corta a Serra Pelada, km 540 ao 555. Trata-se de uma rocha de granulometria fina a média e localmente grosseira, equigranular, de cor rósea a levemente amarronzada, com 5% a 15% de minerais máficos disseminados, dominados por biotita e hornblenda. Localmente, ocorrem porções com textura rapakivi. Como característica principal, o granito apresenta-se fraturado, mas sem exibir um padrão regular (FIORI, 2015).

FIGURA 3.8 – OCORRÊNCIA DE GRANITO ALTO TURVO NO TRECHO



Ainda na Serra Pelada a Suíte Intrusiva Rio Cachorro, os Depósitos Aluvionares e o Gnaiss Bandado Barra do Azeite são encontrados próximo à rodovia. Segundo Faleiros *et al.* (2013) o granito grosso hololeucocrático, branco, isótopo a gnáissico (milonítico), o granito fino porfirítico, róseo, protomilonítico, com fenocristais de feldspato, filonito, granitóide brechado e epidotizado caracterizam a Suíte Intrusiva Rio Cachorro. Os Depósitos Aluvionares são formados por areia, areia quartzosa, cascalheira, silte, argila e, localmente, turfa. O Gnaiss

Bandado Barra do Azeite será abordado no item 3.4.2, por ser mais abundante na Serra do Azeite.

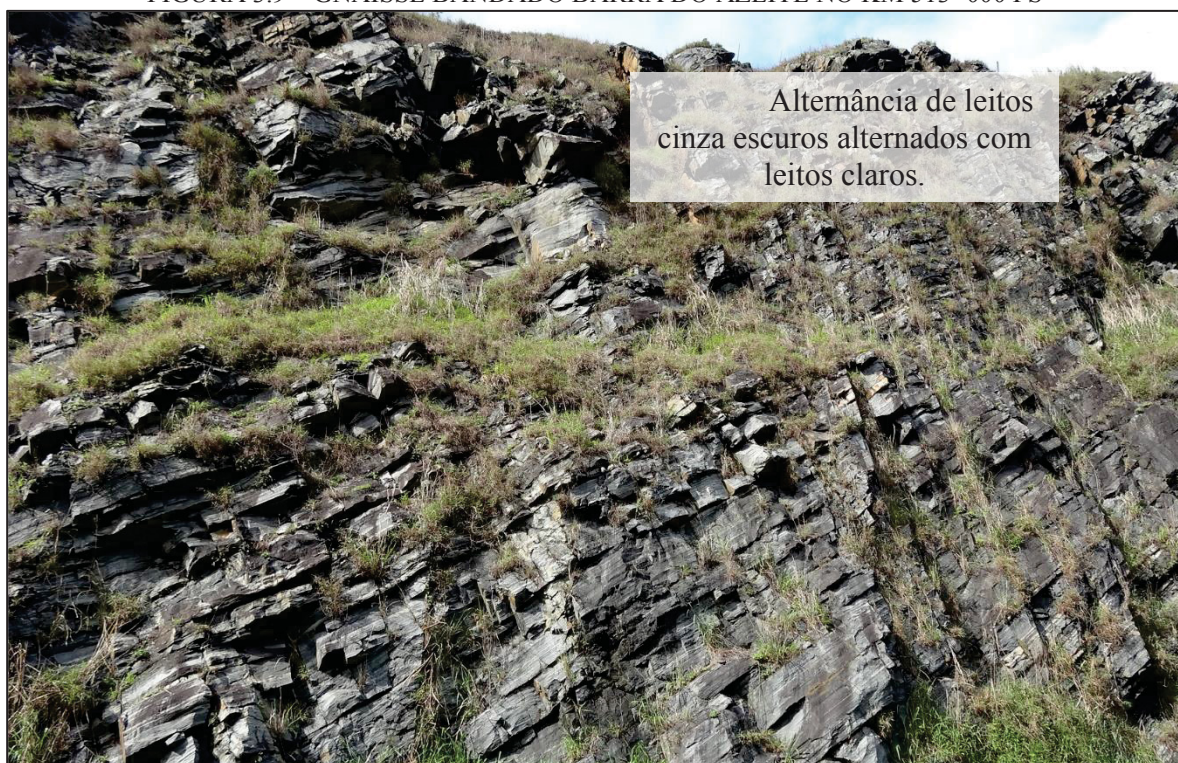
3.4.2 Serra do Azeite

A área que compreende a Serra do Azeite é composta por quatro principais unidades litológicas principais: Gnaiss Bandado Barra do Azeite, Unidade de Micaxisto e Unidade Paragnáissica e o Granito Alto Jacupiranguinha. Ressalta-se que, as unidades de Micaxisto e Paragnáissica pertencem à Formação Turvo-Cajati.

- Gnaiss Bandado Barra do Azeite

O Gnaiss Bandado Barra do Azeite (FIGURA 3.9) ocorre principalmente em dois trechos da rodovia, sendo um no km 504 ao 507 e outro do km 512 ao 514. Compreende um espesso corpo de gnaiss anfibolítico, de granulação fina a média e de coloração cinza escuro a esverdeado. Trata-se de uma rocha composta essencialmente por biotita e hornblenda, cuja característica principal é um bandamento bem desenvolvido, de natureza migmatítica, marcado por alternância entre níveis leucocráticos, constituídos essencialmente por quartzo e feldspato, de espessuras centimétricas a decimétricas e níveis melanocráticos compostos por biotita e hornblenda, de espessuras milimétricas a centimétricas e descontínuos. O bandamento gnáissico apresenta-se dobrado segundo um padrão isoclinal, sendo comum a presença de lineações de estiramento mineral nos planos de foliação. Todos os níveis apresentam uma foliação milonítica bem desenvolvida, cortada localmente por uma clivagem de crenulação e por planos de fratura. Comumente, os gnaisses apresentam veios quarzo-feldspáticos brancos ou graníticos róseos concordantes a subconcordantes com a estrutura ou com a foliação, sugerindo processos de anatexia parcial. Indicam condições metamórficas de alta temperatura e de alta pressão (FIORI, 2015).

FIGURA 3.9 – GNAISSE BANDADO BARRA DO AZEITE NO KM 513+000 PS



- Formação Turvo-Cajati

Na região da Barra do Turvo encontram-se exposições de rochas frescas que fazem parte da formação Turvo-Cajati. Os litotipos dominantes consistem de (quartzo) micaxisto feldspático, e sillimanita-granada paragnaisses, embora ocorram expressivas intercalações de lentes de mármore, quartzito, rochas calciossilicáticas e gnaisses (FALEIROS, 2008).

A Unidade de Micaxistos ocorre principalmente do km 500 ao 504. Representa uma tectonofácies de maior grau metamórfico, composta por corpos de micaxisto médio a grosso, prateado ou cinza-escuro, formados por biotita, muscovita, quartzo e clorita. A estrutura principal consiste de uma xistosidade de natureza milonítica e bandamento milimétrico a centimétrico, onde se alternam leitos mais quartzosos e mais micáceos, além de porções restritas ricas em muscovita milimétrica. São comuns intercalações de camadas métricas de quartzito fino bandado e laminado, camadas ricas em biotita e porções quartzofeldspáticas irregulares. Localmente, ocorrem lentes de xisto feldspático constituído, essencialmente, por plagioclásio, biotita e clorita (FIORI, 2015).

A Unidade Paragnáissica se destaca do km 507 ao 512, onde encontram-se gnaisses anfíbolíticos bandados, ocorrem corpos expressivos de paragnaisses cinza, caracterizados pela

alternância de camadas de composições, granulometrias e espessuras diferentes, ou então por um bandamento centimétrico (FIGURA 3.10). As camadas apresentam-se dobradas, em padrão intrafolial isoclinal. Intercalados aos paragnaisses ocorrem bancos lenticulares de quartzito esbranquiçado, fino, com acamamento sedimentar centimétrico e laminação interna e com espessuras entre 100 e 400 metros (FALEIROS, 2008).

FIGURA 3.10 – BANDAMENTO DO PARAGNAISSE PRESENTE NO PONTO KM 511+640 PN



- Granito Alto Jacupiranguinha

O Granito Alto Jacupiranguinha, está presente do km 514 ao 520. Trata-se de um granito leucocrático, róseo, equigranular a porfirítico, de granulação grossa a fina, com variações deformacionais de protomilonito a ultramilonito. Os termos mais finos são representados por granito milonítico com foliação e lineação bem desenvolvidas, com lâminas milimétricas descontínuas, ricas em biotita em meio a matriz fina, recrystalizada, constituída por quartzo e feldspato. Os termos porfiroclásticos apresentam cristais centimétricos de feldspato róseo em meio a matriz fina. Também os termos porfiroclásticos apresentam foliação e lineação bem desenvolvidas. Ao longo da Zona de Cisalhamento Serra do Azeite ocorrem

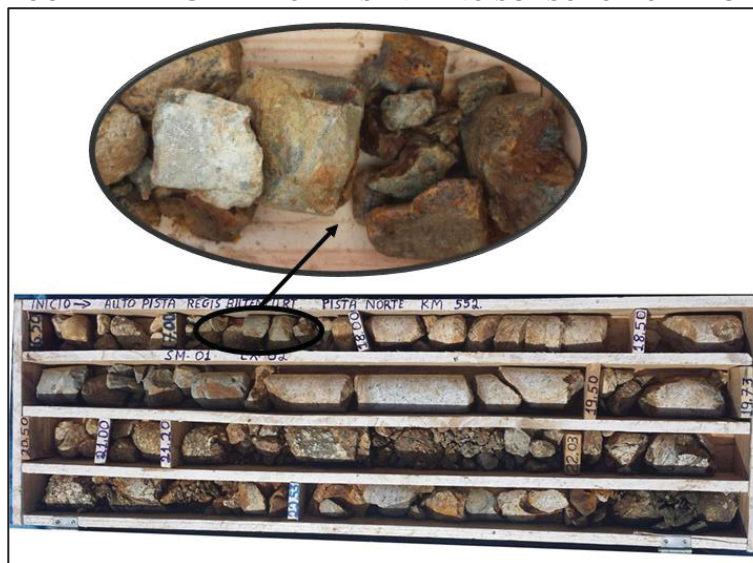
intercalações concordantes métricas a submétricas de granito róseo em gnaiss. Localmente, são observados enclaves anfibolíticos nas rochas graníticas (FALEIROS, 2008).

3.4.3 Talude km 552 PN (Serra pelada)

Na porção central da região Barra do Turvo, onde o talude situa-se, segundo Faleiros (2008) ocorre um domínio de rochas metassedimentares de metamorfismo menos intenso, formado principalmente por micaxistos finos com aspecto filítico, cinza escuros, formados por biotita, muscovita, quartzo e clorita, usualmente com porfiroblastos de granada milimétrica e, localmente, estaurólita. A estrutura principal consiste de uma xistosidade anastomosada de natureza milonítica e bandamento milimétrico a centimétrico onde se alternam leitos mais quartzosos e mais micáceos, além de porções restritas ricas em muscovita milimétrica.

Confirmando a litologia levantada na literatura, os ensaios de sondagens mistas executadas no talude do km 552+000 PN chegaram até uma rocha sã de migmatito, composta por quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio e máficos e coloração cinza, como apresentado na FIGURA 3.11, a qual mostra uma caixa de testemunhos extraídos durante a execução da sondagem mista SM-01 realizada no local.

FIGURA 3.11 – TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS NO ENSAIO DE SONDAGEM MISTA SM-01 MOSTRANDO A ROCHA DE MIGMATITO PRESENTE NO SUBSOLO DO TALUDE SELECIONADO



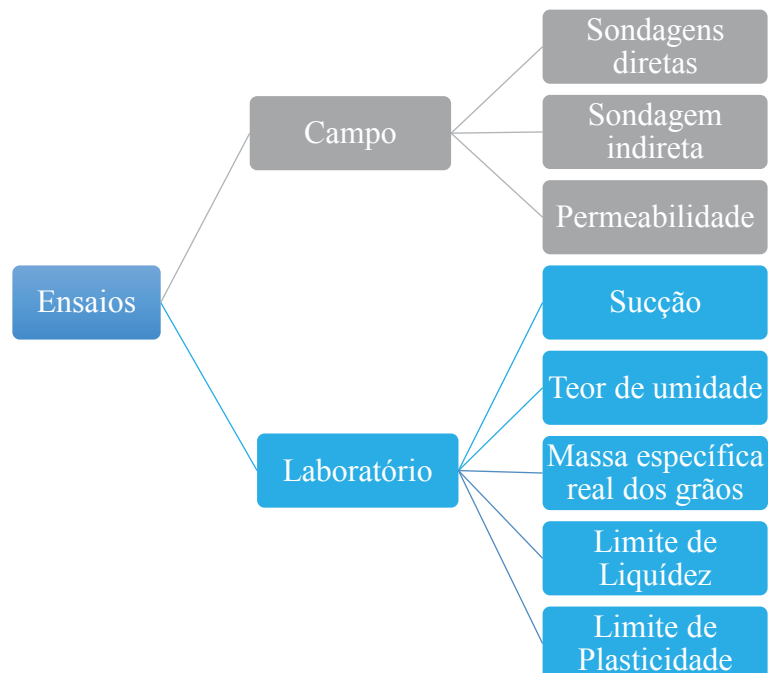
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os materiais e métodos que compuseram esta dissertação de mestrado, compreenderam a realização de ensaios de campo e de laboratório no talude da BR-116 (rodovia Régis Bittencourt), no km 552 +000 PN, com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial do material que compõem o talude e suas propriedades, através de análises estatísticas da investigação geológico-geotécnica.

Neste capítulo estão descritos todos os ensaios executados (FIGURA 4.1), sendo eles em campo: sondagens diretas, sondagem indireta (geofísica) e permeabilidade e em laboratório: sucção, teor de umidade, limite de liquidez e limite de plasticidade. Também são descritos os procedimentos para a análise do coeficiente de variação dos ensaios. Ressalta-se que as coletas foram realizadas em ilhas de 01 a 05 e os ensaios realizados são referentes a estas coletas. Para assim compreender a distribuição do solo ao longo do talude. E o mesmo padrão foi utilizado para os ensaios de campo.

FIGURA 4.1 – RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS



4.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Foram realizados ensaios de laboratório com o solo superficial do talude. Entre os ensaios para caracterização do solo destacam-se granulometria por peneiramento e sedimentação, limites de Atterberg de plasticidade (LP) e liquidez (LL). Para determinação dos índices físicos, foram realizados os ensaios para obtenção do teor de umidade natural (w) e peso específico real dos grãos (γ_s). Já para obtenção da sucção do solo superficial foi utilizado o método do papel filtro.

4.2.1 Caracterização

Segundo Pinto (2006) para caracterizar bem o comportamento dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é necessário conhecer os índices de consistência (Limites de Atterberg), bem como sua distribuição granulométrica e seus índices físicos (peso específico real dos grãos, umidade natural, entre outros). Tais ensaios são prescritos pelas seguintes normas:

- NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 1984a);
- NBR 7180: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 1984b);
- NBR 16097: Solo - Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio (ABNT, 2012);
- NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ABNT, 2016a);
- NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica – Método de ensaio (ABNT, 2016b).

4.2.1.1 Índices Físicos

- Teor de umidade

Com o objetivo de analisar o teor de umidade natural do solo superficial e compará-lo ao ensaio de sucção, foram coletadas amostras para este ensaio nos mesmos locais em que se

coletaram amostras indeformadas para realizar o ensaio de sucção (FIGURAS 4.2 e 4.3). Os procedimentos adotados seguiram os descritos na norma brasileira NBR 16097 (ABNT, 2012).

Para tal, foi preciso coletar uma quantidade de material, destorroá-lo e colocá-lo no estado fofo em cápsulas metálicas previamente pesadas, realizar a pesagem do conjunto solo-cápsula, e então se determinou o peso do solo úmido subtraindo o peso da cápsula ($M1$), obedecendo a norma, fez-se no mínimo de três medições por amostra.

Na sequência, as mesmas foram colocadas em estufa, à temperatura de 105°C a 110°C, onde permaneceram até apresentarem constância de massa. Constatando-se que os valores de pesagem não apresentavam grandes variações, obteve-se o peso final de solo seco subtraindo o peso da cápsula ($M2$), o ensaio, então, foi finalizado. A equação (4.1) a seguir ilustra a forma de obtenção da umidade relativa (w) do solo em porcentagem em função das pesagens das amostras.

$$w = \frac{(M1 - M2)}{M2} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

FIGURA 4.2 – LOCAIS DE COLETA DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS

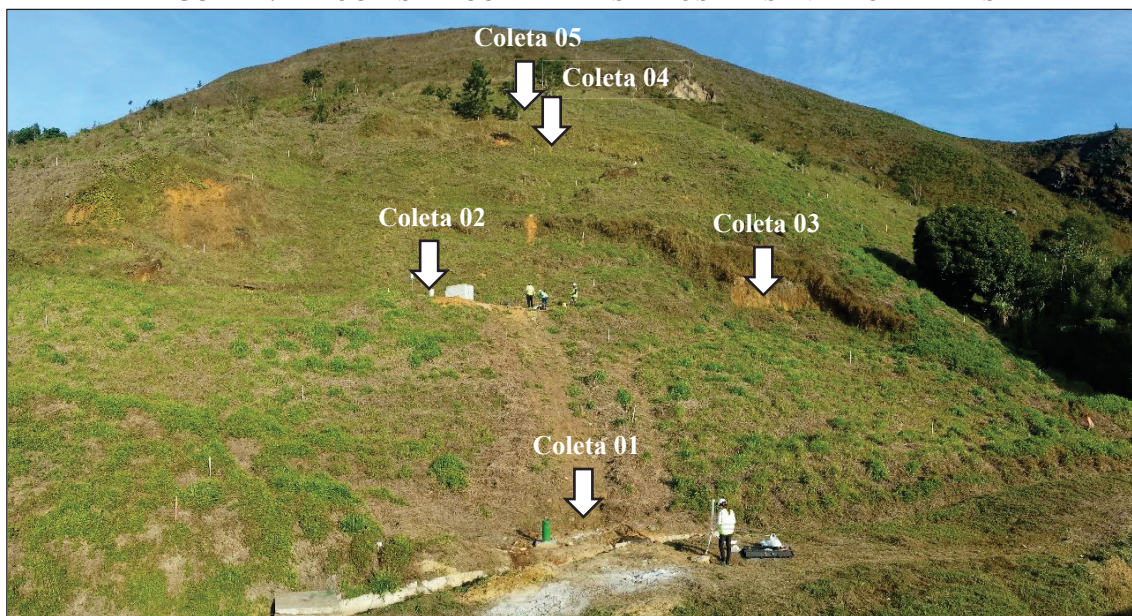
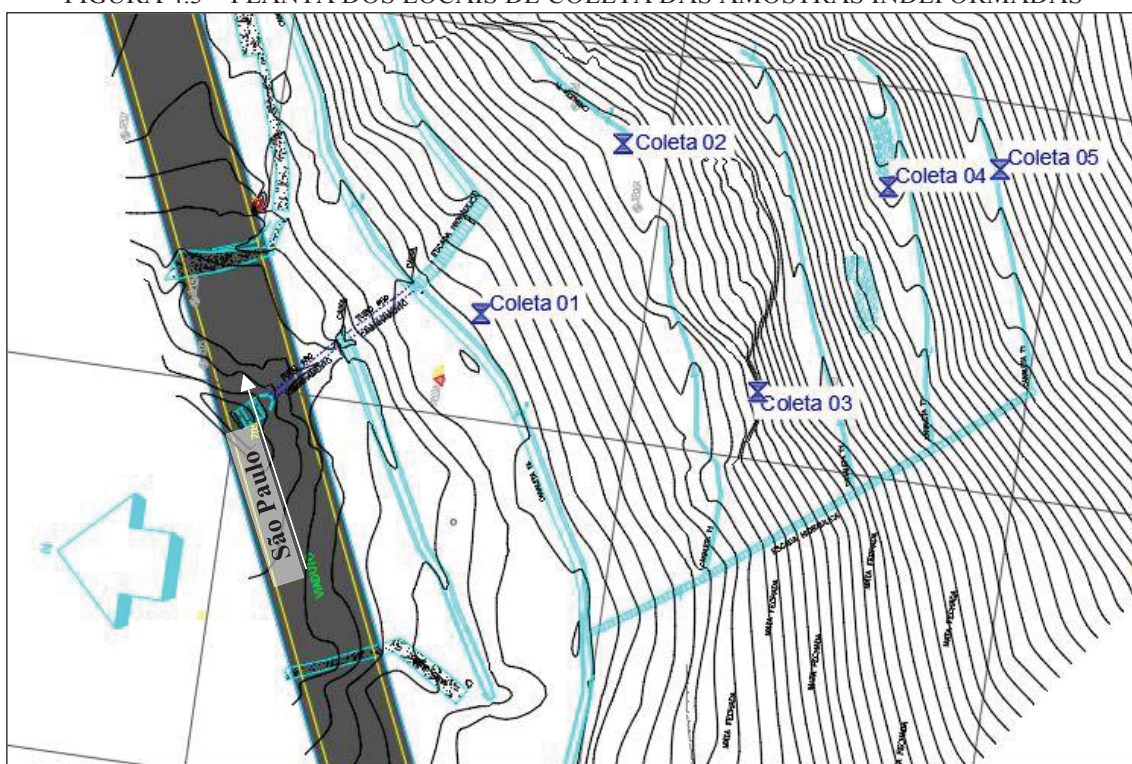


TABELA 4.1 – LOCAIS ONDE FORAM REALIZADAS AS COLETAS DE AMOSTRAS INDEFORMADAS

LOCAIS	COORDENADAS UTM		PROFUNDIDADE (m)	COTA (m)
COLETA 01	7.236.174 N	754.109 E	0,05	715
COLETA 02	7.236.153 N	754.128 E	0,05	726
COLETA 03	7.236.134 N	754.108 E	8,25	727
COLETA 04	7.236.120 N	754.136 E	0,05	748
COLETA 05	7.236.107 N	754.143 E	0,05	757

FIGURA 4.3 – PLANTA DOS LOCAIS DE COLETA DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS



- Massa específica real dos grãos

Para a realização deste ensaio foi seguido o procedimento apresentado na norma DNER-ME 093/94 (DNER, 1994). Para iniciar o procedimento foram separadas as amostras de cada um dos cinco pontos de coleta, na sequência colocou-se em estufa a 105°, para peneirá-las na malha de abertura igual a 2 mm. Tomou-se, no mínimo, 10 g solo seco como amostra a ensaiar, e foram realizados três ensaios por local.

Começando o ensaio pensando os picnômetros vazios, para obter o valor (P_1) (FIGURA 4.4), então se colocou as amostras (de no mínimo 10 g) nos picnômetros (P_2) (FIGURA 4.5), em seguida foi coberta a amostra de solo dentro do recipiente com água destilada.

FIGURA 4.4 – PICNÔMETRO SENDO PESADO PARA OBTENÇÃO DE P_1

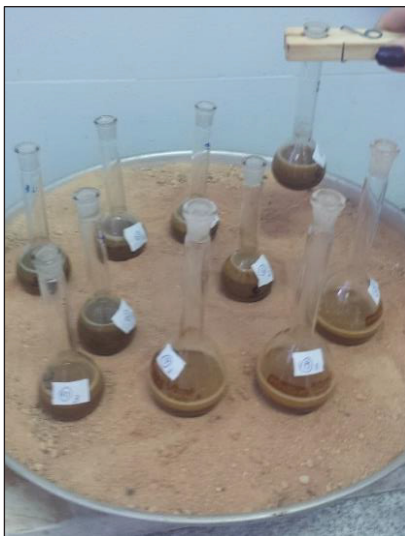


FIGURA 4.5 – PICNÔMETROS COM AMOSTRA DE NO MÍNIMO 10g (P_2)



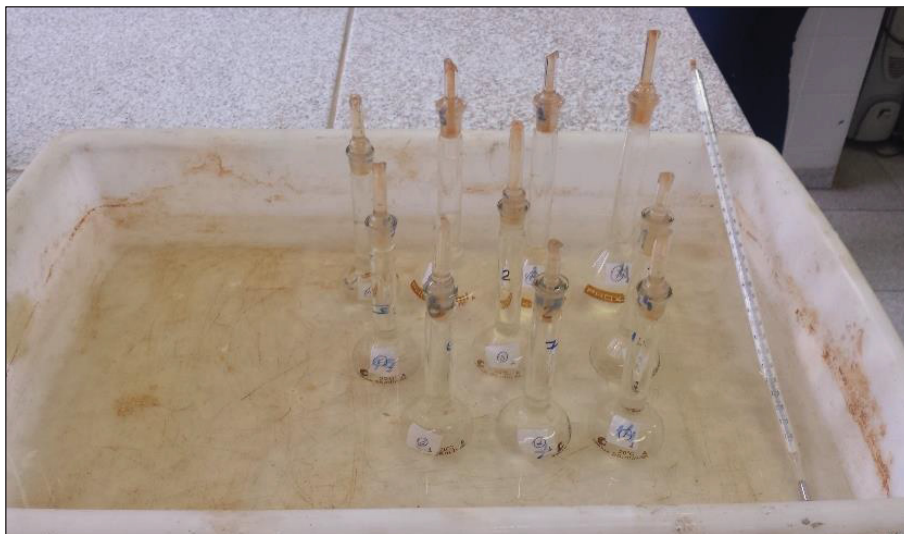
Os picnômetros foram levados ao fogo para ferver por ao menos 15 minutos, procedimento este para expulsar todo o ar existente entre as partículas de solo, para evitar o superaquecimento, eram agitados os frascos (FIGURA 4.6), posteriormente os mesmos foram deixados esfriando ao ambiente.

FIGURA 4.6 – PICNÔMETROS NO FOGO



Quando já estavam na temperatura ambiente, completou-se os picnômetros com água destilada, para então colocá-los em banho de água a temperatura ambiente, durante 15 minutos (FIGURA 4.7), anotou-se a temperatura da água. Logo após retirar do banho os frascos foram secados e então pesados (P_3). Continuando o ensaio, retirou-se todo o conteúdo dos picnômetros, lavaram-se os frascos e colocou-se água destilada, deixando em banho de água por 15 minutos. Após este procedimento, os picnômetros contendo apenas água destilada eram pesados para obter-se (P_4).

FIGURA 4.7 – PICNÔMETROS COM SOLO E ÁGUA DESTILADA EM BANHO DE ÁGUA (P_3)

FIGURA 4.8 – PIGNÔMETROS COM ÁGUA DESTILADA DEIXADOS EM BANHO DE ÁGUA (P_4)

Para calcular a massa específica real solo (ρ_s), massa específica real do solo à temperatura (t), é utilizada a equação (4.1) a seguir.

$$\rho_s = \frac{(P_2 - P_1)}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (4.2)$$

O valor da massa específica deverá ser referido à água à temperatura de 20°C, corrigindo o valor a partir da temperatura (t), conforme a equação (4.3).

$$D_{20} = k_{20} \times D_t \quad (4.3)$$

Onde:

D_{20} : densidade real do solo a 20°C;

k_{20} : razão entre a densidade relativa da água à temperatura (t) e a densidade relativa da água a 20°C, obtida na tabela da norma (DNER-ME 093/94);

D_t : densidade real do solo à temperatura (t).

4.2.1.2 Granulometria

Para iniciar esse ensaio foi preparado o material segundo a NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ABNT, 2016a) e o procedimentos adotados NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica – Método de ensaio (ABNT, 2016b), assim separou-se aproximadamente 1,5 kg de cada amostra de solo para a

realização do peneiramento grosso, sedimentação e peneiramento fino, conforme descritos na sequência.

- Peneiramento Grosso

O material retido na peneira de 2,0 mm, foi pesado e, com a ajuda do agitador mecânico (FIGURA 4.9), foi passado nas peneiras de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8mm.

FIGURA 4.9 – SEQUÊNCIA DE PENEIRAS NO AGITADOR MECÂNICO



Para calcular as porcentagens de materiais que passam em cada peneira foram utilizadas as equações (4.4) e (4.5).

$$M_s = \frac{(M_t - M_g)}{(100 + w)} \times 100 + M_g \quad (4.4)$$

$$Q_g = \frac{(M_s - M_r)}{M_s} \times 100 \quad (4.5)$$

Onde:

M_s : massa total da amostra seca;

M_t : massa da amostra seca ao ar;

M_g : massa do material seco retido na peneira de 2,0 mm;

w : umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0 mm;

Q_g : porcentagem de material passado em cada peneira;

M_r : massa do material retido acumulado em cada peneira.

- Sedimentação

Do material preparado conforme a NBR 6457 foi separado cerca de 70 g, para realização do ensaio de sedimentação e 100 g para retirada da umidade higroscópica desse material, sendo o solo do local de coleta argiloso. O material separado para o ensaio de sedimentação foi transferido para um béquer de 250 cm³ e acrescentado a solução de hexametáfosfato de sódio de concentração de 45,7 g de sal por 1000 cm³ de solução com o pH entre 8 e 9. Após foi agitado o béquer até que o material ficou imerso e foi mantido em repouso por mais de 12h, conforme as orientações da NBR 7181 (FIGURA 4.10).

FIGURA 4.10 – MATERIAL EM REPOUSO NA SOLUÇÃO DE HEXAMEFOSFATO DE SÓDIO



Após o repouso a mistura foi transferida para o copo de dispersão, todo o material foi retirado com auxílio de uma bisnaga de água destilada e então submetida à ação do aparelho de dispersão por 15 minutos (FIGURA 4.11). Na sequência o material da dispersão foi transferido para a proveta de 1000 cm³, também com auxílio da bisnaga de água destilada. Foi agitada a proveta durante 1 minuto para homogeneizar todo o material, logo após foram realizadas as leituras com o densímetro, leituras de 8 segundos, 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas e 24 horas (FIGURA 4.15).

FIGURA 4.11 – MATERIAL NO DISPERSOR



FIGURA 4.12 – SEDIMENTAÇÃO SENDO REALIZADA



Os cálculos das porcentagens, correspondentes a cada leitura do densímetro, seguiram a equação (4.6).

$$Q_s = N \times \frac{\rho_s}{(\rho_s - \rho_{wm})} \times \frac{V \rho_{wc} (L - L_d)}{\frac{M_w}{(100 + w)} \times 100} \quad (4.6)$$

Onde:

Q_s : porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro;

N : porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm, calculado conforme a equação (4.5);

ρ_s : massa específica real dos grãos do solo, em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

ρ_{wm} : massa específica da água, função da temperatura, utilizando o valor de 1000 g/cm^3 ;

V : volume da proveta igual a 1000 cm^3 ;

ρ_{wc} : massa específica da água na temperatura de calibração do densímetro (20°C), utilizando o valor de 1000 g/cm^3 ;

L : leitura do densímetro na suspensão;

L_d : leitura do densímetro no meio dispersor, na mesma temperatura da suspensão;

M_w : massa do material úmido submetido à sedimentação, em gramas (g).

E para calcular o diâmetro das partículas de solo em suspensão utilizou-se a equação (4.7).

$$d = \sqrt{\frac{1800\mu}{(\rho_s - \rho_{md})}} \times \frac{z}{t} \quad (4.7)$$

Onde:

d : diâmetro máximo das partículas, em milímetros (mm);

μ : coeficiente de viscosidade do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em gs/cm^2 ;

ρ_{md} : massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

z : altura de queda das partículas, com resolução de 0,1 cm, correspondente à leitura do densímetro, em centímetros (cm);

t : tempo de sedimentação, em segundos (s).

- Peneiramento Fino

Após realizar a sedimentação o material foi passado na peneira de 0,075 mm e, o que ficou retido, secado em estufa até a consistência de massa. Quando a amostra estava com umidade zero, utilizando o agitador mecânico, peneirou-se nas peneiras de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, anotou-se a massa retirada do material em cada uma delas.

Para calcular as porcentagens de materiais que passam em cada peneira foi utilizada a equação (4.8).

$$Q_f = \frac{M_s \times 100 - M_r(100 + w)}{M_u \times 100} \times N \quad (4.8)$$

Onde:

Q_f : porcentagem de material passado em cada peneira;

M_u : massa do material úmido submetido ao peneiramento fino ou à sedimentação, conforme ensaio tenha sido realizado apenas por peneiramento ou por combinação de sedimentação e peneiramento, respectivamente;

M_r : massa do material retido acumulado em cada peneira.

Após calculados os percentuais passante nas peneiras, os diâmetros das partículas de solo e suas respectivas porcentagens em suspensão, o solo foi classificado conforme indicado na NBR 6502, onde o material é designado pelo intervalo de dimensões de suas partículas (TABELA 4.2).

TABELA 4.2 – CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE SOLO

MATERIAL	DIÂMETRO (mm)
ARGILA	<0,002
SILTE	0,002 a 0,06
AREIA	0,06 a 2
PEDREGULHO	2 a 60
PEDRA	>60

4.2.1.3 Limites de Atterberg

Para a engenharia, apenas a distribuição granulométrica não caracteriza bem o comportamento dos solos, pois a fração fina dos mesmos tem uma grande importância, sendo que o comportamento das partículas, com superfícies específicas distintas, é muito diferente perante a água, envolvendo muitos fatores, posto que o estudo dos minerais-argila é muito complexo. Para identificar de forma mais prática a influência das partículas argilosas, na

engenharia são empregados ensaios chamados limites de Atterberg que analisam indiretamente o comportamento do solo na presença de água (PINTO, 2006).

- Limite de plasticidade (LP)

Este ensaio foi executado seguindo as instruções recomendadas pela NBR 7180: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 1984c). As amostras de solo foram coletadas nos mesmos 5 pontos ao longo da superfície do talude (FIGURA 4.2) e armazenadas em sacos plásticos (FIGURA 4.13).

FIGURA 4.13 – ARMAZENAMENTO DAS AMOSTRAS



Cada uma das cinco amostras foi passada na peneira de 0,42 mm e colocada em uma cápsula de porcelana, onde adicionou-se água, amassou-se e revolveu-se, até a sua homogeneização (FIGURA 4.14). Em seguida retirou-se uma porção de 10 g aproximadamente, com a mistura moldou-se uma bola, na sequência colocou-se sobre a placa de vidro despolido até que formar um cilindro (FIGURA 4.15). Quando este cilindro se fragmentou com 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento (conforme gabarito), era recolhido o material em cápsulas para determinar o teor de umidade. Repetiu-se o mesmo procedimento quatro vezes para cada local/ponto de coleta, obtendo-se quatro teores umidades e posteriormente a umidade relativa ao LP.

FIGURA 4.14 – PREPARO DO SOLO PARA O ENSAIO



FIGURA 4.15 – AMOSTRA DE SOLO MOLDADA EM CILINDRO



- Limite de liquidez (LL)

A NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 1984b) prescreve este ensaio e os procedimentos adotados em laboratório a respeitaram. Quanto ao material para realização do LL, as amostras também foram coletadas nos mesmos cinco locais ao longo da superfície do talude (FIGURA 4.2), como foi adotado para o LP, armazenadas em sacos plásticos e identificadas.

O primeiro procedimento para a execução do ensaio foi a calibração do aparelho de Casagrande, para isso colocou-se o gabarito sobre a base do aparelho e girou-se a manivela, verificou-se o ponto de contato da concha com a base, a 10 mm acima desta. Logo após à

calibração, preparou-se a massa homogênea, com o material que estava secando ao ar e foi peneirado, colocando em uma tigela de porcelana, da mesma maneira que foi realizada no ensaio de LP.

Em seguida, a massa homogeneizada foi transferida para a concha, dividida em duas partes com auxílio do cinzel (FIGURA 4.15), conforme as orientações da norma, então foram executados os golpes, movimento no qual a concha bate na base durante o giro da manivela na razão de duas voltas por segundo, até que as partes da ranhura se juntassem em 130 mm. Onde estas se unem é retirado o solo e colocado em cápsulas para obtenção do teor de umidade. Esses procedimentos foram realizados de modo a obter-se mais de três pontos do ensaio cobrissem de 35 a 15 golpes, para isso era acrescentado água destilada ao material em cada operação.

FIGURA 4.16 – APARELHO DE CASAGRANDE COM AMOSTRA PRONTA PARA SER ENSAIADA



Foram realizados cinco testes em cada um dos cinco pontos do talude, para conseguir os golpes dentro desta faixa estipulada em norma, na sequência os dados foram plotados em gráficos onde as abcissas são os teores de umidade, em escala aritmética, e as ordenadas, em escala logarítmica, são os números de golpes, após a plotagem ajustou-se uma reta pelos pontos obtidos, sendo o limite de liquidez corresponde ao percentual de umidade para 25 golpes.

4.2.2 Sucção pelo Método do Papel Filtro

A metodologia para a realização deste ensaio é normatizada pela ASTM (2003) na D 5298, a qual prescreve os materiais e procedimentos para a determinação da sucção do solo

utilizando um papel filtro. Esta norma recomenda alguns papéis filtros quantitativos, com diâmetro 5,5 cm, como o *Whatman* nº 42, o qual foi utilizado.

Para obter-se a sucção matricial, colocou-se o papel filtro diretamente em contato com solo, as amostras foram embrulhadas com plástico filme e papel alumínio, e após esse processo, as mesmas devem permanecer armazenadas por no mínimo 7 dias, para que o sistema entre em equilíbrio. Logo após esse período, retirou-se os papéis filtros das amostras e os mesmos foram pesados rapidamente, para que não absorvessem a umidade do ar. A umidade que o papel filtro adquiriu absorvendo água do solo foi medida após secagem em estufa, em uma temperatura de 105 °C a 115 °C, por no mínimo duas horas, quando estes foram novamente pesados e a umidade absorvida tornou-se conhecida.

Com base na norma, foram definidos 5 pontos espacialmente distribuídos ao longo do talude para coletas de amostras indeformadas para a realização do ensaio de sucção em laboratório. A coleta 01 foi realizada no patamar inferior (pé) do talude. Os pontos de coleta 02 e 03 estão localizados um patamar acima da coleta 01. O ponto de coleta 03 foi locado onde há uma face vertical exposta, permitindo obter amostras de profundidade 8,25 m e não superficiais como as demais. As coletas 04 e 05 foram realizadas em patamares superiores às todas as demais (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** e FIGURA 4.2).

Previamente à retirada de amostras do solo no talude, necessitou-se realizar alguns procedimentos em laboratório, onde foram separados os anéis metálicos e os papéis filtros. Na sequência, guardou-se os papéis filtros em pares em plásticos zip (com fechamento hermético), numerados com os mesmos números dos anéis para identificação (FIGURA 4.17), posteriormente colocou-se os mesmos nas faces de cada uma das amostras coletadas. Os anéis e os pacotes com o papel filtro foram pesados e os valores anotados em uma planilha para o cálculo da sucção.

FIGURA 4.17 – PAPEL FILTRO EMBALADO EM PLÁSTICO ZIP PARA SER LEVADO AO CAMPO



Em campo, o primeiro passo foi limpar o local da coleta de amostras, retirando-se a vegetação superficial e suas raízes (FIGURA 4.18 (a)). Em seguida, inseriu-se o anel no solo, pressionando-o até seu total preenchimento no solo (FIGURA 4.18 (b)). A amostra foi retirada com o auxílio de uma pá (FIGURA 4.18 (c)), e então, eliminou-se o excesso de solo superior e inferior da amostra, para que a mesma fosse moldada no tamanho do anel (FIGURA 4.18 (d)). Na sequência, os papéis filtros foram imediatamente colocados em cada uma das faces e, para garantir que a umidade da amostra passasse apenas para o papel filtro, as mesmas foram protegidas com plástico filme (FIGURA 4.18 (e)), além de papel alumínio e um plástico zip com a identificação da amostra (FIGURA 4.18 (f)). Por fim, as amostras foram envolvidas em plástico-bolha e armazenadas em uma caixa de isopor para evitar variações de temperatura e perturbações excessivas durante o transporte, que pudessem levar à perda e desintegração das amostras (FIGURA 4.18 (g) e FIGURA 4.18 (h)).

Os anéis com solo foram armazenados na caixa de isopor por 26 dias, sendo o tempo mínimo estabelecido por norma é de 7 dias. Na sequência, as amostras foram desembulhadas e os papéis filtros, com o auxílio de uma pinça (FIGURA 4.19 (a)), foram colocados nos plásticos zip para não terem sua umidade alterada pelo contato com o ar, sendo essa transferência realizada em 3 segundos, conforme prescrito em norma (FIGURA 4.19 (b)). Em seguida, os sacos plásticos foram pesados (FIGURA 4.19 (c)) e os papéis filtros removidos e levados à estufa com temperatura de 105°, por 2 horas (FIGURA 4.19 (d)). Após esse período, transferiu-se os papéis para os plásticos zip novamente para serem pesados, com o objetivo de obter-se a umidade em que esses se encontravam (umidade gravimétrica).

FIGURA 4.18 – PROCEDIMENTOS DE COLETA PARA ENSAIO DE SUÇÃO COM PAPEL FILTRO: (a) LIMPEZA DO LOCAL PARA RETIRADA DE AMOSTRAS, (b) INSERÇÃO DO ANEL NO SOLO, (c) AMOSTRA SENDO RETIRADA COM AJUDA DA PÁ, (d) MOLDAGEM DA AMOSTRA NO TAMANHO DO ANEL, (e) PROTEÇÃO COM PLÁSTICO FILME, (f) AMOSTRA EMBALADA, (g) AMOSTRAS NA CAIXA DE ISOPOR ENVOLVIDAS PELO PLÁSTICO BOLHA e (h) CAIXA DE ISOPOR COM AS AMOSTRAS PARA SEREM TRANSPORTADAS PARA O LABORATÓRIO



FIGURA 4.19 – ENSAIO DE SUCÇÃO: (a) AMOSTRAS E MATERIAL UTILIZADO, (b) COLETA DO PAPEL FILTRO PARA PESAGEM APÓS ARMAZENAGEM, (c) PESAGEM DO PAPEL FILTRO e (d) INSERÇÃO DO PAPEL FILTRO EM ESTUFA



Para o cálculo das sucções cada corpo de prova correspondeu a um ponto da curva de retenção do solo. Foram adotadas as curvas de calibração do papel filtro *Whatman no. 42*, conforme equações (4.9) e (4.10), para umidade (W) do papel filtro superior e inferior a 47%, respectivamente (CHANDLER; HARWOOD; SKINNER, 1992).

$$Sucção (kPa) = 10^{(6,05-2,48\log W)} \quad (4.9)$$

$$Sucção (kPa) = 10^{(4,84-0,0622W)} \quad (4.10)$$

4.3 ENSAIOS DE CAMPO

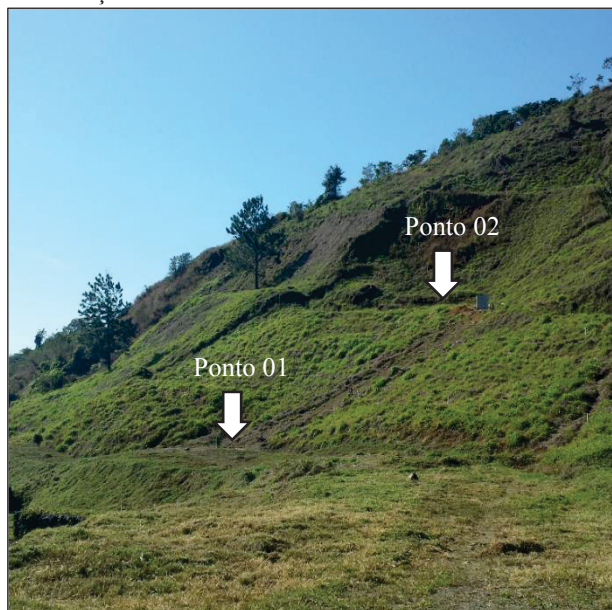
Os ensaios de campo previstos para a pesquisa encontram-se descritos na sequência. As sondagens mistas tiveram o objetivo de analisar as informações das camadas e do nível da água no talude em 3 pontos previamente selecionados. A geofísica abrangeu uma grande área, trazendo informações em 12 seções de 150 m e a permeabilidade *in situ* foi realizada em duas cotas.

4.3.1 Permeabilidade *in Situ*

Na presente pesquisa, utilizou-se um permeâmetro de Guelph (modelo 2800K1), fabricado pela Soilmoisture, para determinação da permeabilidade *in situ* do solo superficial do talude. Este equipamento possui como vantagens a facilidade de operação e obtenção dos resultados, necessitando apenas de uma ou duas pessoas para realização do ensaio que tem uma duração de aproximadamente 2 horas.

Aguiar (2001) destacou como limitações que este equipamento é capaz de efetuar medições em até no máximo 75 cm abaixo do nível do terreno, sendo recomendada uma profundidade mínima de 30 cm. Ressalta-se ainda que ele foi projetado para medir a condutividade entre 10^{-2} e 10^{-6} cm/s, abaixo ou acima desses valores, as medições apresentam resultados inconsistentes ou ainda impedem a realização do ensaio.

Com relação à metodologia de ensaio adotada, inicialmente foram definidos dois locais no talude do km 552 PN para realização do procedimento de ensaio: Ponto 01 (coordenadas 754.113.247 E; 7.236.170.36 S) e Ponto 02 (coordenadas 754.137.24 E; 7.236.156.36 S), conforme pode ser observado na FIGURA 4.20.

FIGURA 4.20 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE *IN SITU*

Nas proximidades destes pontos de ensaio foram executadas sondagens mistas (SM) e coletadas amostras de solo superficial para ensaios laboratoriais de umidade natural e sucção. Com isso, pode-se prever uma faixa de variação da condutividade hidráulica em razão do tipo de solo que compõe o horizonte de solo ensaiado. De forma sucinta, o procedimento de ensaio compreendeu as seguintes etapas:

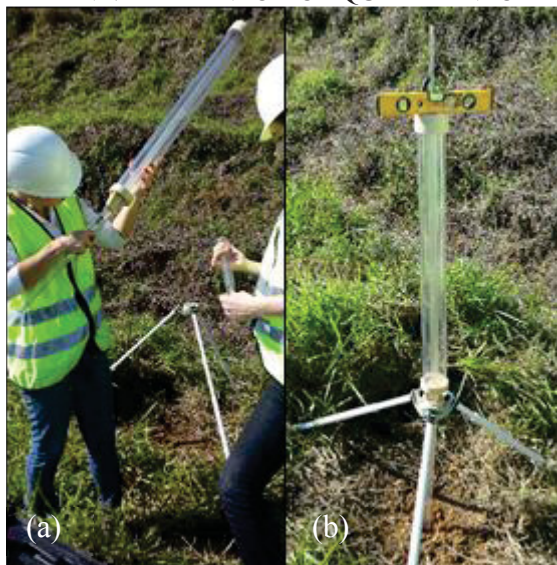
- Executou-se um furo no solo na profundidade de 30 cm, com o equipamento de trado manual, o qual remove grande quantidade de material (FIGURA 4.21 (a));
- Em seguida, utilizou-se um trado com um cilindro na ponta, no intuito de realizar o acabamento do furo na geometria adequada para a realização do ensaio (FIGURA 4.21 (b));
- Por fim, trocou-se mais uma vez a ponteira do trado por uma de limpeza, que tem a função de nivelar a base e regularizar as paredes do furo. A FIGURA 4.21 (c) e a FIGURA 4.21 (d) ilustram a realização destas etapas e o comprimento final escavado para o ensaio em conformidade com a profundidade mínima requerida.

FIGURA 4.21 – REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE: (a) EXECUÇÃO DO FURO COM TRADO, (b) TRADO UTILIZADO PARA RETIRADA DO MATERIAL, (c) FURO NO PONTO 01 e (d) FURO NO PONTO 02



Na sequência, montou-se o equipamento, ligando o tubo acrílico à garrafa de Mariotte através de mangueiras plásticas maleáveis. Por fim, colocou-se o equipamento sobre o furo com o apoio de um tripé para que o mesmo fosse nivelado com o terreno, conforme pode ser observado na FIGURA 4.22 (a) e FIGURA 4.22 (b).

FIGURA 4.22 – EXECUÇÃO DO ENSAIO: (a) MONTAGEM DO EQUIPAMENTO e (b) INSTALAÇÃO E NIVELAMENTO DO EQUIPAMENTO



Após a montagem e fixação do equipamento no terreno e feitas às devidas verificações quanto ao encaixe dos acessórios para garantir a inexistência de vazamentos nas roscas e ligações. Por fim, encheu-se o reservatório da garrafa de Mariotte, fazendo com que a água preenchesse completamente os cilindros (FIGURA 4.23).

FIGURA 4.23 – EXECUÇÃO DO ENSAIO: (a) ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO e (b) PREENCHIMENTO DOS TUBOS E DO FURO COM ÁGUA

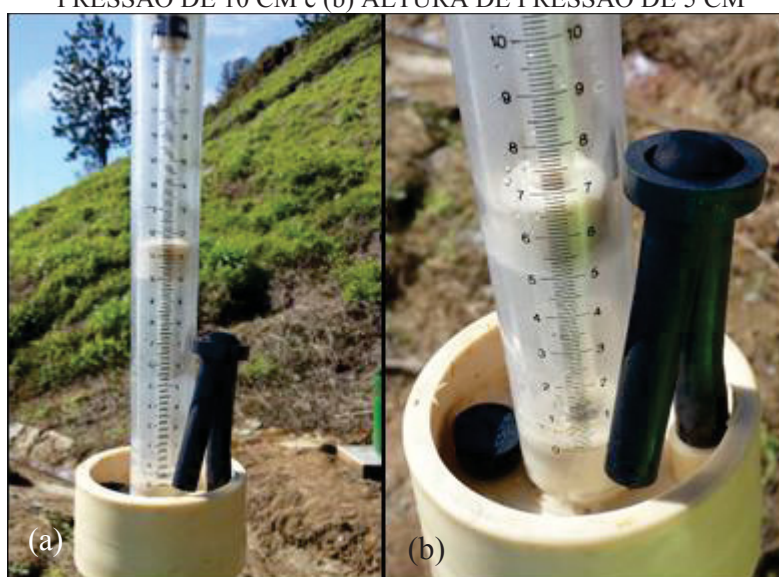


Com toda a tubulação preenchida de água e, consequentemente, com o preenchimento gradual do furo no solo com água, estabeleceu-se uma altura de pressão a ser mantida no interior do tubo interno do reservatório, o qual se estende desde a profundidade máxima do furo no solo

até o topo do equipamento. Seguindo orientações do fabricante, essas alturas foram definidas em 5 cm (H_1) e 10 cm (H_2).

As alturas foram estabelecidas em duas fases: primeiramente se considera a pressão proveniente de H_1 e as leituras são realizadas em intervalos constantes de tempo, na régua graduada do tubo acrílico, até que se alcancem três valores consecutivos de taxa de variação de nível d'água iguais. Na sequência, o procedimento foi repetido para a altura de pressão H_2 . A FIGURA 4.24 demonstra a demarcação das alturas de pressão na tubulação de ar.

FIGURA 4.24 – DETALHES DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE *IN SITU*: (a) ALTURA DE PRESSÃO DE 10 CM e (b) ALTURA DE PRESSÃO DE 5 CM



Concluída a etapa de campo, foram realizados os procedimentos de cálculos para determinação da permeabilidade do solo superficial. Primeiramente, definiu-se em qual das categorias de textura e estrutura o solo se enquadrava. Na sequência, obteve-se α^* , ou seja, o parâmetro da extensão capilar microscópica, determinado para cada locação onde foi realizado o ensaio. Esse parâmetro representa a relação da gravidade com as forças de capilaridade durante a infiltração da água no solo. Conforme instruções operacionais do permeâmetro de Guelph, os valores de α^* devem ser obtidos dependendo da textura do solo e categoria de estrutura como explicado na TABELA 4.3.

TABELA 4.3 – TEXTURA E CATEGORIA DA ESTRUTURA DO SOLO

TEXTURA DO SOLO – CATEGORIA DA ESTRUTURA	α^* (cm^{-1})
MATERIAIS COMPACTADOS, SEM ESTRUTURA, ARGILOSOS OU LODOS, TAIS COMO, COBERTURAS DE ATERRO E DELINEADORES SEDIMENTOS LACUSTRES OU MARINHOS, ETC.	0,01
SOLOS QUE APRESENTAM TEXTURA REFINADA (ARGILOSO OU LODOSO) E NÃO ESTRUTURADOS; TAMBÉM PODEM INCLUIR ALGUMAS AREIAS REFINADAS.	0,04
OS SOLOS MAIS ESTRUTURAS DE ARGILAS ATRAVÉS DE LAMAS; TAMBÉM INCLUEM MEIO ESTRUTURADO E AREIAS FINAS. A CATEGORIA É MAIS FREQUENTEMENTE APLICÁVEL PARA SOLOS AGRÍCOLAS.	0,12
AREIAS GROSSAS OU PEDREGOSAS; TAMBÉM PODEM INCLUIR ALGUNS SOLOS ALTAMENTE ESTRUTURADOS COM RACHADURAS GRANDES E/OU NUMEROSAS, MACROPOROS, ETC.	0,36

FONTE: SOILMOISTURE (2010)

Constatou-se, a partir do perfil de sondagem do furo realizado próximo aos pontos amostrados, nas camadas mais superficiais do talude, ou seja, nos pontos onde se realizou o ensaio, o solo encontrado é composto por argila. Desse modo, considerou-se este solo como enquadrado no critério $\alpha^*=0,04$.

Assim, quando o valor de α^* calculado está dentro do intervalo de 0,01 e 0,05 cm^{-1} , segundo o manual da SOILMOISTURE (2010) devem ser realizadas as análises em relação a cada altura de pressão por meio do método de *Single Head Method*.

Em seguida, calculou-se o fator de forma do bulbo (C), também para $\alpha^*=0,04$, através de equações empíricas que variam para cada tipo de textura do solo, aplicando-a para os ensaios com as duas alturas de pressão pré-definidas (H_1) e (H_2), conforme equações (4.11) e (4.12), onde a é o raio do furo.

$$C = \frac{\frac{H_1}{a}^{0,683}}{1,992 + 0,091 \times \left(\frac{H_1}{a}\right)} \quad (4.11)$$

$$C = \frac{\frac{H_2}{a}^{0,683}}{1,992 + 0,091 \times \left(\frac{H_2}{a}\right)} \quad (4.12)$$

Na sequência, foram calculadas as taxas de queda estável (R), ou seja, a taxa de queda de água no reservatório que permaneceu aproximadamente constante em três intervalos de tempo consecutivos de medição. As taxas estáveis R_{H_1} e R_{H_2} foram utilizadas para determinar as vazões (Q_{H_1} e Q_{H_2}), dados nas equações (4.13) e (4.14).

$$Q_{H_1} = X \times R_{H_1} \quad \text{ou} \quad Q_{H_1} = Y \times R_{H_1} \quad (4.13)$$

Onde: Q_{H_1} é Vazão de água no poço com altura de pressão H_1 ; X é Área da seção transversal dos reservatórios combinados; Y é Área da seção transversal do reservatório interno; e R_{H_1} é Taxa estável para a água no poço com altura de pressão H_1 .

$$Q_{H_2} = X \times R_{H_2} \quad \text{ou} \quad Q_{H_2} = Y \times R_{H_2} \quad (4.14)$$

Onde: Q_{H_2} é Vazão de água no poço com altura de pressão H_2 ; X é Área da seção transversal dos reservatórios combinados; Y é Área da seção transversal do reservatório interno; e R_{H_2} é Taxa estável para a água no poço com altura de pressão H_2 .

Os valores de X e Y para o permeâmetro de Ghelph utilizado são 35,22 cm² e 2,16 cm², respectivamente, definidos pelo fabricante em razão das dimensões padrões do reservatório. Por fim, para obtenção do coeficiente de permeabilidade do solo utilizou-se a equação (4.15).

$$K_{fs} = \left(\frac{C \times Q}{2 \times \pi \times H^2 + \pi \times a^2 \times C + 2 \times \pi \times \left(\frac{H}{\alpha^*} \right)} \right) \quad (4.15)$$

4.3.2 Sondagens Mistas (Sondagem direta)

Para a interpretação geológica do local, caracterização, determinação das espessuras e profundidades das camadas do solo, além do nível de água presente no talude, foram realizadas 3 sondagens mistas (SM). A FIGURA 4.8 mostra a locação destas sondagens, assim como as sondagens SM-01 e SM-02 sendo executadas simultaneamente. Os locais dos ensaios foram definidos visando pontos mais representativos do talude, um ponto mais próximo a pé do talude (SM-01) e outros dois pontos (SM-01 e SM-02) aproximadamente no meio, não foi possível realizar sondagem nas cotas superiores devido a limitação de acesso do equipamento de sondagem.

Os procedimentos de ensaio para estas sondagens seguiram os padrões exigidos pelas NBR 6502 e NBR 6484 (ABNT, 1995; 2001) e executados conforme explicados na revisão bibliográfica. O equipamento utilizado na execução da sondagem rotativa foi uma perfuratriz

modelo Mach 700 (FIGURA 4.9), com amostrador padrão do tipo Terzaghi-Peck, de diâmetro interno de 34,9 mm e diâmetro externo de 50,8 mm.

FIGURA 4.8 - SONDAGENS SM-01, SM-02 E SM-03 SENDO REALIZADAS NO KM 552 PN



FIGURA 4.9 - PERFURATRIZ MACH 700 UTILIZADA NAS SONDAGENS EXECUTADAS



4.3.3 Geofísica (Sondagem indireta)

Fundamentando-se na revisão bibliográfica chegou-se à conclusão que o método de investigação indireta que se adaptaria melhor ao local de estudo seria o método de resistividade pelo caminhamento elétrico, pois, conforme explicado no Capítulo 2, TABELA 2.2, ele pode ser realizado próximo à rodovia, sem interferência nos seus resultados, possibilita o conhecimento da estratigrafia em grandes áreas.

Dessa maneira, para realizar a investigação indireta, também chamada de imageamento geolétrico, iniciou-se programando doze caminhamentos, sendo sete transversais (CE 01 à CE 07) e cinco longitudinais (CE 08 à CE 12) à rodovia (FIGURA 4.25). A delimitação dessas linhas foi realizada a partir de pontos de referência (nomeados de P001 à P127 nas linhas transversais e de C001 à C155 nas linhas longitudinais), os quais foram demarcados em campo e mapeados por uma equipe de topografia, também foi necessário fazer a roçada no local, pois a vegetação encontrava-se bastante alta, dificultando e até mesmo impedindo a execução do ensaio. Para a realização desse ensaio foram utilizados os procedimentos preconizados pelas normas NBR15935 e NBR7117 (ABNT, 2011; 2012b).

FIGURA 4.25 – LINHAS DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO REALIZADAS



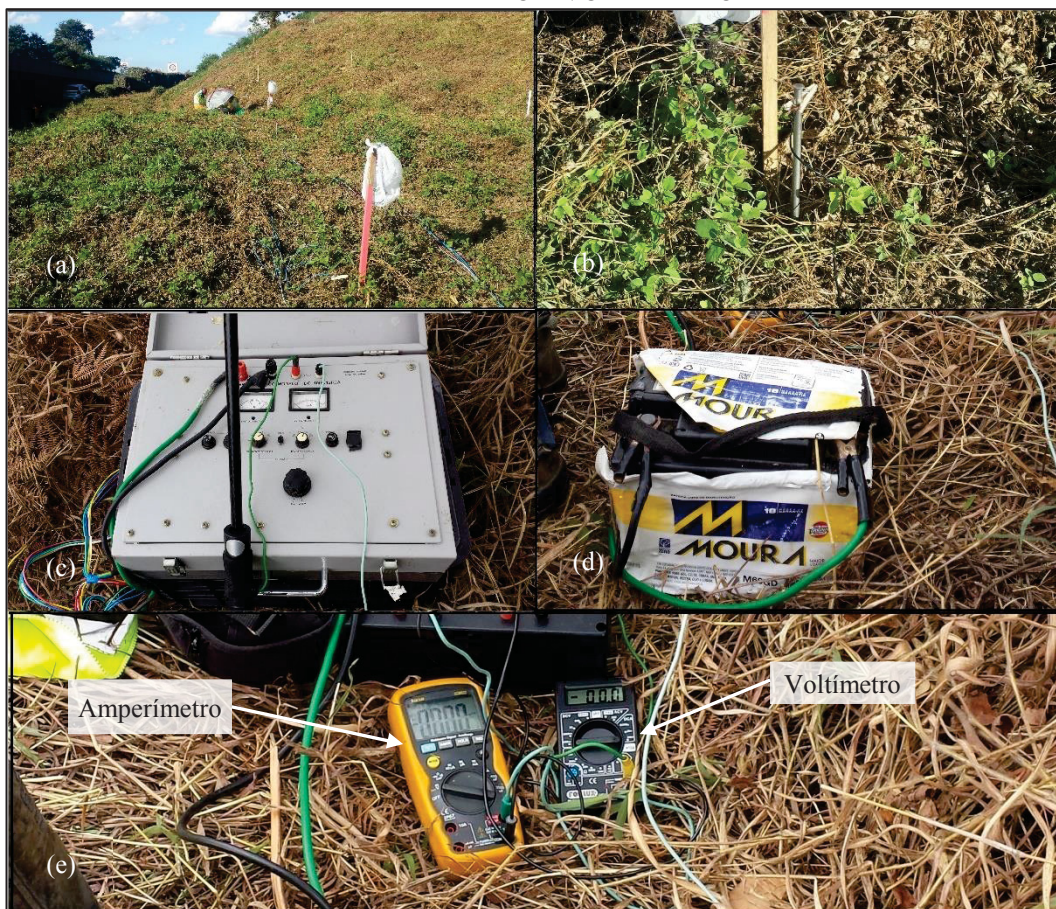
A programação inicial contemplava 1800 m lineares de caminhamento elétrico. Para tal, seria necessário cravar alguns eletrodos sobre a rodovia e o tráfego teria que ser interrompido, optando-se, por reduzir 20 m das linhas de caminhamento CE 05, CE 06 e CE 07 e evitar o bloqueio, mesmo que temporário, da circulação de veículos na via, assim o ensaio foi realizado em 1740 m.

O procedimento de ensaio resumiu-se na cravação de eletrodos a cada 5,0 m para delimitar as linhas de caminhamento elétrico (FIGURA 4.10 (a) e (b)). Durante o ensaio, a cada quatro eletrodos, uma leitura de diferença de potencial era obtida da seguinte maneira: os dois primeiros, denominados A e B, injetavam uma corrente elétrica (I) no solo, gerada pelo conversor modelo TDC 1000/12V (FIGURA 4.10 (c)), o qual era ainda ligado à uma bateria (FIGURA 4.10 (d)) e o valor da corrente elétrica gerada e transmitida era então lida no amperímetro (FIGURA 4.10 (e)). Os dois últimos eletrodos do quarteto, denominados M e N, recebiam a corrente que passa pelo solo, e a leitura da diferença de potencial (V) era então realizada no voltímetro (FIGURA 4.10 (e)).

O princípio do ensaio consiste em ler o valor da corrente que está sendo enviado ao amperímetro e, após atravessar o material analisado (substrato), o valor da diferença de potencial no voltímetro. Com base nessas informações são realizados os cálculos (apresentados na sequência) para obter a resistividade elétrica dos materiais que compõem a estratigrafia do local.

Esse procedimento foi executado a cada 4 pontos (ABMN) e repetido para todos os pontos locados, gerando uma série de medidas de resistividade aparente na superfície do terreno, ao longo de 12 perfis (n). Assim, realizou-se a varredura em profundidade da área de interesse, com intuito de se investigar as discontinuidades das feições e estruturas do subsolo.

FIGURA 4.10 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO DA GEOFÍSICA: (a) DELIMITAÇÃO DA LINHA DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO, (b) ELETRODO, (c) CONVERSOR, (d) BATERIA e (e) AMPERÍMETRO E VOLTÍMETRO



As medidas de resistividade foram realizadas em várias profundidades de investigação, correspondendo aos níveis atribuídos à intersecção das linhas que partem a 45° dos centros AB e MN, conforme representado na FIGURA 2.12. Os pares de eletrodos AB e MN são chamados de dipolo, e a disposição ao longo da superfície desses eletrodos determina o arranjo de leitura, neste trabalho usou-se o denominado arranjo Dipolo-Dipolo. A cada estação, os dois dipolos foram deslocados em uma distância igual a 5,0 m. Com isso, foram obtidos dados referentes às demais posições, para serem interpolados, gerando uma pseudosseção de resistividade aparente. A interpretação foi feita inicialmente de forma qualitativa e posteriormente modelada quantitativamente.

O espaçamento entre os eletrodos (x) define a profundidade de investigação da eletrorresistividade, em concordância com o apresentado no item 2.6.1 do Capítulo 2. Em campo, registrou-se a diferença de potencial em cada ponto para que a resistência seja calculada pela Lei de Ohm (Equação (4.16), sendo o valor de resistência (R) dado pela razão entre a diferença de potencial (V) medida e a corrente (i) aplicada (REYNOLDS, 1998).

$$R = \frac{V}{i} \quad (4.16)$$

Reynolds (1998) simplifica que para um material resistivo de comprimento L e área de seção transversal A , a resistividade verdadeira ρ é calculada de maneira simplificada por:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L} \quad (4.17)$$

A propagação da corrente elétrica, a partir da injeção de corrente pelo eletrodo em um meio homogêneo, ocorre em subsuperfície através das linhas de fluxo de corrente, gerando equipotenciais semiesféricas. Assim, a resistividade medida é a aparente (ρ_a) que deve ser corrigida por um fator geométrico (k), o qual, para o arranjo Dipolo-Dipolo, é calculada pelas Equações (4.18) e (4.19), conforme Reynolds (1998).

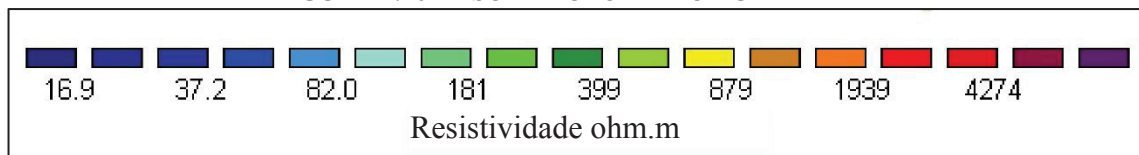
$$\rho_a = k \cdot R \quad (4.18)$$

$$k = \pi n(n+1)(n+2)a \quad (4.19)$$

Onde: a é a distância entre eletrodos; e n é o fator de separação de dipolos.

Depois de realizado o ensaio em campo e anotados os dados, Fugro (2016) gerou mapas ou perfis para a interpretação destes, sendo comumente apresentados em perfis individuais, o qual se dá a partir das chamadas pseudosseções de resistividade aparente. Os valores teóricos são apresentados em profundidade e para facilitar a visualização dos resultados, os valores de resistividade aparente são então apresentados por uma escala cromática (FIGURA 4.26).

FIGURA 4.26 – ESCALA CROMÁTICA UTILIZADA



Os valores obtidos no ensaio geofísico foram modelados pelo programa Res2DInv, para serem convertidos em valores de resistividade real e profundidade real. Após esse processamento e baseando-se nos resultados das sondagens mistas, foi possível interpretar e obter a caracterização estratigráfica, contatos litológicos, determinação do embasamento rochoso e nível da água presentes na subsuperfície do talude.

Para a entrada de dados no *software* Res2DInv é necessário montar tabelas com colunas para representar as combinações dos pontos dos eletrodos, as distâncias destes e os resultados das resistividades obtidas em campo para cada combinação, conforme o arranjo utilizado em campo, e a topografia inicial do caminhamento (GEOTOMO, 2010). Após a entrada dos dados com a topografia, é ajustado a escala de cores para que todas as seções tenham o mesmo padrão e então realizada a inversão dos dados. O algoritmo base para inversão no programa é o *Smoothness-Constrained Least-Squares Method* (Método de Mínimos Quadrados com Vínculo de Suavidade).

4.4 Coeficiente de variação

Os resultados dos ensaios de campo e laboratório depois de interpretados foram analisados através do coeficiente de variação (COV). Assim, para cada ensaio, a variabilidade do solo em estudo foi verificada, conforme diversos autores já estudaram e arbitraram percentuais admissíveis (TABELA 4.4). Além desses ensaios já analisados no meio geotécnico buscou-se interpretar a dispersão dos dados de resistividade da geofísica dentro das camadas, tentando compreender se a variação dos dados está relacionada com a heterogeneidade do solo.

TABELA 4.4 – AMPLITUDE DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA ENSAIOS GEOTÉCNICOS

Características do Solo	COV (%)	Autores
Densidade	3-7	Harr (1987), Kulhawy (1992)
N _{SPT}	15-45	Harr (1987), Kulhawy (1992)
	10-70	Phoon e Kulhawy (1999a)
Limite de Liquidez	2-48	Lumb (1974), Singh (1971), Kuhn (1971), Mitchell (1993)
Limite de Plasticidade	9-29	Lumb (1974), Singh (1971), Kuhn (1971), Mitchell (1993)
Índice de Plasticidade	7-79	Lumb (1974), Singh (1971), Kuhn (1971)

FONTE: Flores (2008)

Para os ensaios de laboratório foi calculado o COV apenas da camada mais superficial do talude. Nestes ensaios para calcular o COV foram utilizados os desvios padrões divididos pelas médias. Já nos ensaios de campo (SPT e geofísica) foi calculado o COV para as camadas de solo identificadas. Assim foi necessário separar os valores em camadas. As profundidades das camadas ficaram definidas pelas camadas identificadas em campo através da análise tátil-visual realizada durante as sondagens diretas.

5. RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No capítulo anterior foram descritos como se realizaram os ensaios, de campo e laboratório, e as equações utilizadas. Neste capítulo são apresentados os resultados e parâmetros estatísticos como média, desvio padrão e coeficiente de variação (COV), visando analisar a heterogeneidade do solo do talude selecionado para o estudo.

5.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

5.2.1 Caracterização

5.2.1.1 Índices Físicos

- Teor de umidade

A TABELA 5.1 apresenta os resultados de ensaio da umidade relativa do solo, nos locais onde se coletaram amostras deformadas e indeformadas. Nota-se que os valores de umidade apresentaram uma média de 29,0%, variando de 16,1% até 54,4%. Os maiores valores foram encontrados nos locais de coleta 01 e 02, os quais estão mais próximos do pé do talude, onde a linha freática é mais superficial. As menores umidades foram encontradas no ponto de coleta 03, onde o solo foi retirado de uma face exposta (FIGURA 4.2). Já os pontos de coleta 04 e 05, locados em cotas superiores às demais, apresentaram valores próximos entre si e menores do que os encontrados nas cotas inferiores. Também é apresentado o coeficiente de variação da umidade em cada local, o qual variou de 1% a 7%, esses valores sofrem pouca variação, uma vez que as amostras foram retiradas de um mesmo ponto do talude e a umidade tende a ser homogênea em locais relativamente próximos.

TABELA 5.1 – RESULTADOS DO ENSAIO DE UMIDADE RELATIVA DO SOLO

Local	Profundidade (m)	Amostras	Peso inicial da amostra M1 (g)	Peso inicial da amostra M2 (g)	Umidade relativa w (%)	Média	Desvio Padrão	COV
Coleta 1	0,50	1-1	26,08	19,63	32,9%	32%	0,49%	2%
		1-2	29,73	22,46	32,3%			
		1-3	27,81	21,08	31,9%			
Coleta 2	0,50	2-1	32,85	21,90	50,0%	52%	2,40%	5%
		2-2	34,96	22,64	54,4%			
		2-3	26,06	17,30	50,6%			
Coleta 3	8,25	3-1	25,34	21,82	16,2%	17%	1,18%	7%
		3-2	10,83	9,34	16,0%			
		3-3	9,85	8,34	18,1%			
Coleta 4	0,50	4-1	12,08	9,89	22,1%	22%	0,22%	1%
		4-2	13,19	10,83	21,8%			
		4-3	8,88	7,30	21,6%			
Coleta 5	0,50	5-1	9,72	7,84	24,0%	24%	0,65%	3%
		5-2	13,09	10,58	23,7%			
		5-3	11,89	9,51	24,9%			

- Massa específica real dos grãos

Após a realização do ensaio de massa específica real dos grãos descrito no capítulo 4 e efetuados os cálculos para cada local chegou-se a valores próximos a $2,6 \text{ g/cm}^3$ e um coeficiente de variação, entre os 05 pontos de coleta de material, de 0,84% demonstrando a proximidade desse parâmetro ao longo dos pontos amostrados, como mostra a TABELA 5.2. Das (2007) afirma que solos argilosos e siltosos variam de $2,6$ a $2,9 \text{ g/cm}^3$, deste modo os resultados dos ensaios encontram-se coerentes.

TABELA 5.2 – RESULTADO DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

Local	Massa específica real dos grãos (g/cm^3)	Média	Desvio Padrão	COV
Coleta 01	2,588	2,576	0,022	0,84%
Coleta 02	2,559			
Coleta 03	2,557			
Coleta 04	2,607			
Coleta 05	2,570			

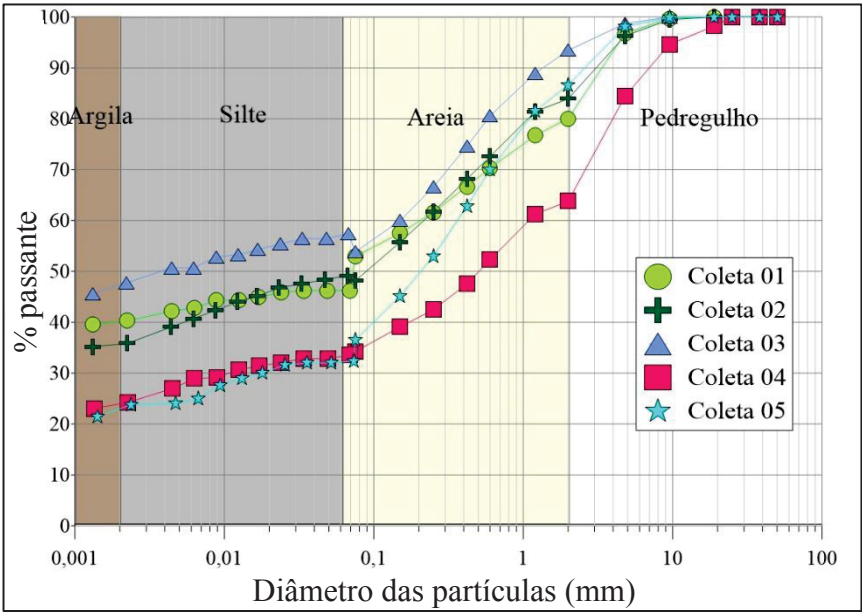
5.2.1.2 Granulometria

Como relatado no capítulo 4, foram realizados os ensaios de peneiramento grosso, sedimentação e peneiramento fino para os 5 locais de coleta de solo, indicados na FIGURA 4.2. Os resultados dos ensaios foram calculados e estão apresentados na TABELA 5.3 com base nos percentuais passantes de argila, silte, areia, pedregulho e pedra para cada local do talude e a sua designação, em relação ao maior e menor percentual dessas partículas, conforme a NBR 6502. Também foram plotadas as curvas granulométricas geradas através dos ensaios (FIGURA 5.1), conforme a orientação da norma NBR 7181.

TABELA 5.3 – RESUMO DO RESULTADO DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA

Local da amostra	Argila (% < 0,002mm)	Silte (0,002mm < % < 0,06mm)	Areia (0,06mm < % < 2mm)	Pedregulho (2mm < % < 60mm)	Classificação
01	40,1	6,2	33,7	20,0	Argila Arenosa com pedregulhos
02	35,7	13,2	35,0	16,1	Argila Arenosa com pedregulhos
03	47,2	9,8	36,4	6,6	Argila Arenosa com pedregulhos
04	23,9	9,3	30,6	36,2	Areia Argilosa com pedregulhos
05	22,9	9,3	54,5	13,3	Areia Argilosa com pedregulhos

FIGURA 5.1 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS



Avaliando os coeficientes de variação para as duas camadas, identificadas pela granulometria, nota-se que os percentuais de argila, silte e areia possuem COV bastante variáveis, chegando a diferença de 36%. Já o COV para a parcela de pedregulho obteve um valor próximo para as duas, porém dentro desta mesma camada a disparidade do COV é alta, 50 % na argila arenosa e 40% na areia argilosa (TABELA 5.4).

TABELA 5.4 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA OS VALORES DA GRANULOMETRIA

Material passante Camada	Argila (%)	COV	Silte (%)	COV	Areia (%)	COV	Pedregulho (%)	COV
Argila Arenosa	40,1	14%	6,2	36%	33,8	4%	16,8	50%
	35,7		13,2		35,0		12,4	
	47,2		9,8		36,4		5,3	
Areia Argilosa	23,9	3%	9,3	0%	30,6	40%	20,7	40%
	22,9		9,3		54,5		11,5	

5.2.1.3 Limites de Atterberg

Ainda, para caracterizar o solo do talude, do ponto de vista geotécnico, foram realizados os ensaios de limites de consistência, visando identificar o comportamento da fração de finos na presença de água. Os resultados dos ensaios de LP para cada local do talude encontram-se na TABELA 5.5. Os gráficos para encontrar o LL foram plotados na FIGURA 5.2. A variação da umidade é estabelecida com limite máximo de 5% pela norma e os ensaios foram realizados variaram no máximo em 3%.

O resumo dos resultados de LP, LL e IP encontram-se na TABELA 5.6, sendo que os valores médios de LL = 41% e IP = 14% são comparáveis aos apresentados na literatura, frente à variação de plasticidade para cada tipo de solo. Suzuki (2004) estudou os solos tropicais de origem migmatítica na região de Morretes/PR, obtendo para um solo coluvionar composto especialmente por 40% de argila e 40% de silte, LL em 69% e IP em 33% na camada superficial. Camapum de Carvalho et al. (1993 apud Delgado, 2002) apresentam valores para as argilas porosas do Distrito Federal, sendo estas constituídas por argilas, siltes e areias combinadas em diferentes proporções dependendo do domínio geológico local, geralmente com LL variando no intervalo de 25% a 78% e IP entre 4% e 38%.

TABELA 5.5 – RESULTADOS DO ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE

Local	Amostras	Umidade $w(\%)$	LP (%)	Média	Desvio Padrão	COV
Coleta 1	1-1	30,4	30	30	0,85	3%
	1-2	30,4				
	1-3	28,9				
Coleta 2	2-1	38,2	38	38	0,53	1%
	2-2	39,1				
	2-4	38,2				
Coleta 3	3-1	24,1	24	24	0,21	1%
	3-2	23,7				
	3-3	23,9				
Coleta 4	4-1	21,2	21	21	0,27	1%
	4-3	21,4				
	4-4	21,7				
Coleta 5	5-1	20,4	20	20	0,59	3%
	5-2	21,1				
	5-3	19,9				

FIGURA 5.2 – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE LL

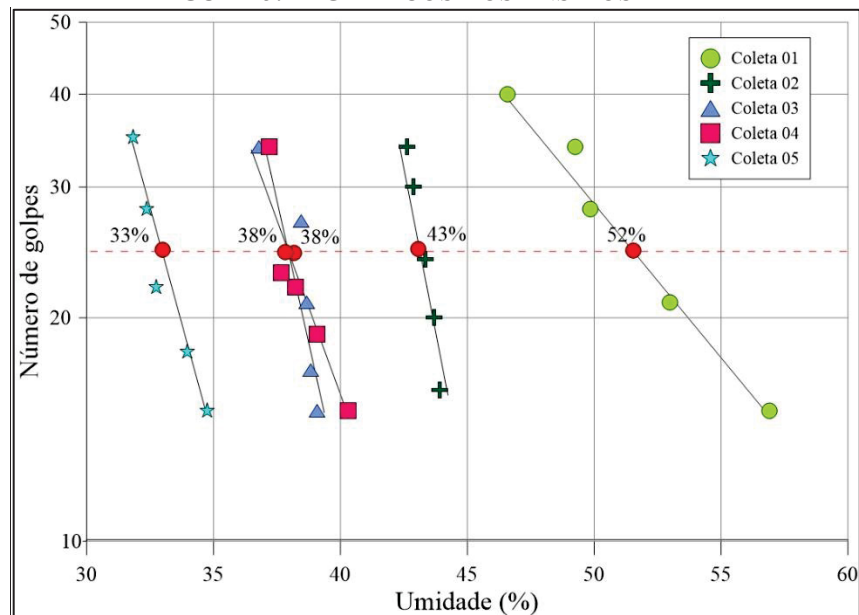
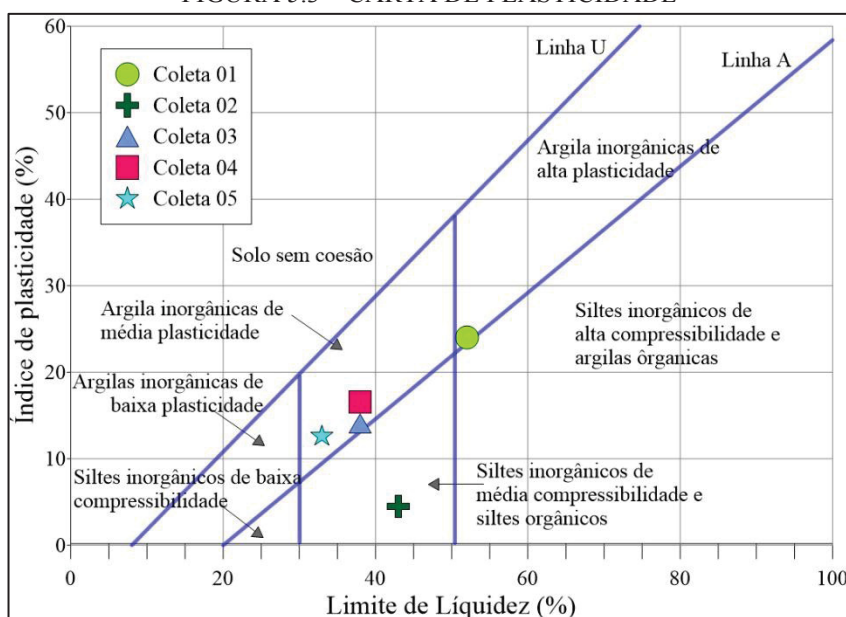


TABELA 5.6 – RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LL E LP

Local	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Coleta 01	52	30	22
Coleta 02	43	38	5
Coleta 03	38	24	14
Coleta 04	38	21	17
Coleta 05	33	20	13
Média	41	27	14

Ainda, foi possível classificar o tipo do comportamento do solo na presença de águas locais através da carta de plasticidade (FIGURA 5.3). O ponto de coleta 01, mais próximo do pé do talude, comporta-se como uma argila inorgânica de alta plasticidade. A amostra coletada no ponto 02 reage como um silte inorgânico de média compressibilidade ou silte orgânico. Já as amostras 03, 04 e 05 encontram-se próximas à linha A, correspondendo a argila inorgânicas de média plasticidade. Assim, conclui-se que o solo da primeira camada do talude tem característica de argila e site, tendendo para solo orgânico, pois as amostras ensaiadas se encontravam próximas à superfície.

FIGURA 5.3 – CARTA DE PLASTICIDADE



Como a composição mineralógica dos argilo-minerais é bastante variável, alterando a influência dos finos argilosos no comportamento dos solos, também foi analisado o índice de atividade das argilas, nos cinco patamares do talude, dividindo o índice de plasticidade pela fração de argila. Todos os valores encontrados foram menores do que 0,75, portanto a argila presente nesse solo é considerada inativa (TABELA 5.7).

TABELA 5.7 – ÍNDICE DE ATIVIDADE DAS ARGILAS

IP (%)	% argila	Índice de atividade
24	40,1	0,60
5	35,7	0,13
14	47,2	0,30
17	23,9	0,69
13	22,9	0,55

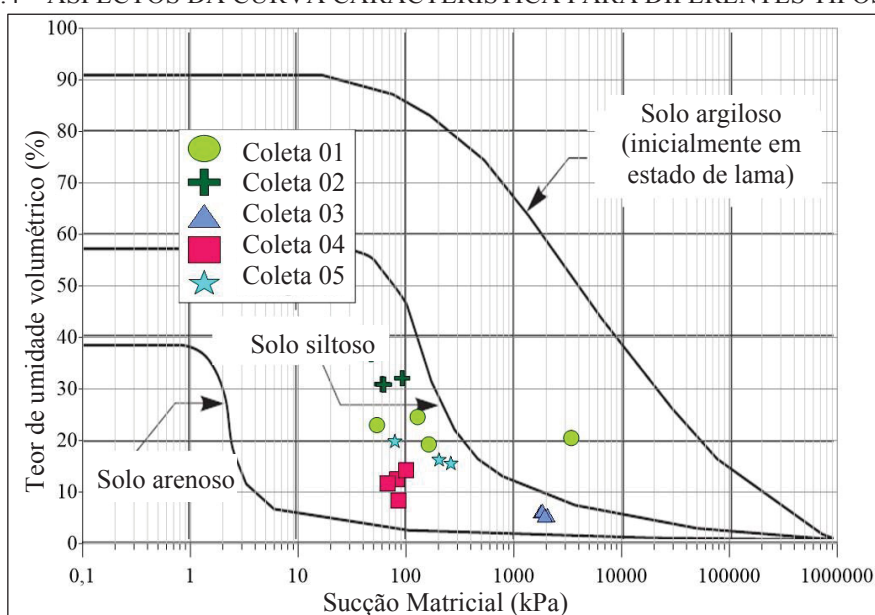
5.2.2 Sucção pelo Método do Papel Filtro

Das 19 amostras indeformadas que foram coletadas apenas a amostra 31, coleta no local 2, apresentou sinais de mofo e, portanto, foi descartada, uma vez que neste local foram extraídas mais três, o descarte não foi prejudicial aos resultados.

Como este ensaio foi executado colocando o solo em contato direto com o papel filtro a técnica utilizada para medição da sucção foi por meio de fluxo capilar, ou seja, a troca entre as partículas do solo e as fibras do papel filtro sem que a água perdesse continuidade. Segundo Marinho (1994) dessa maneira o fluxo capilar implica em uma interação entre o papel filtro e a água do poro, medindo, portanto, a sucção matricial.

Na FIGURA 5.4 o resultado do ensaio foi sobreposto a curva característica apresentada pelos autores Fredlund e Xing, (1994), os valores ficaram entre as curvas de solo arenoso e solo argiloso, pois nos locais de coleta os percentuais de argila e areia são altos e em quantidades próximas. A amostra de solo coletada no ponto 03 mostrou valores de sucção matricial mais elevados, associado a baixos valores de teor umidade volumétrica. A média dos resultados de sucção matricial para os 19 pontos testados foi de 650 kPa, porém destaca-se que 14 pontos estão com valores próximos a 100 kPa e os outros 5 pontos estão próximos a 2.000 kPa, elevando a média dos demais.

FIGURA 5.4 – ASPECTOS DA CURVA CARACTERÍSTICA PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLO



FONTE: ADAPATADO DE FREDLUND e XING (1994)

5.3 ENSAIOS DE CAMPO

5.3.1 Permeabilidade *in Situ*

As TABELAS 5.8 a 5.11 apresentam os valores de leituras obtidos no permeâmetro de Guelph, durante o ensaio de permeabilidade *in situ*, para os pontos 01 e 02, nas alturas de pressão de 5 cm e 10 cm, respectivamente.

TABELA 5.8 – DADOS OBTIDOS PARA H1 EM 5 CM NO PONTO 01

Nível de água (H ₁) em 5 cm					
Número de leituras	Tempo (min)	Intervalo de tempo (min)	Nível de água do reservatório (cm)	Variação do nível d'água (cm)	Taxa de variação do nível d'água (cm)
1	0	-	22,2	-	-
2	01:00	01:00	27,1	4,9	4,9
3	02:00	01:00	31,7	4,6	0,3
4	03:00	01:00	36,7	5,0	0,4
5	04:00	01:00	40,9	4,2	0,8
6	05:00	01:00	45,8	4,9	0,7
7	06:00	01:00	50,8	5,0	0,1
8	07:00	01:00	55,7	4,9	0,1
9	08:00	01:00	60,2	4,5	0,4
10	09:00	01:00	65,0	4,8	0,3
11	10:00	01:00	70,1	5,1	0,3
12	11:00	01:00	74,9	4,8	0,3

TABELA 5.9 – DADOS OBTIDOS PARA H2 EM 10 CM NO PONTO 01

Nível de água (H ₂) em 10 cm					
Número de leituras	Tempo (min)	Intervalo de tempo (min)	Nível de água do reservatório (cm)	Variação do nível d'água (cm)	Taxa de variação do nível d'água (cm)
1	0	-	18,5	-	-
2	01:00	01:00	21,5	3,0	3,0
3	02:00	01:00	24,4	2,9	0,1
4	03:00	01:00	27,4	3,0	0,1
5	04:00	01:00	30,5	3,1	0,1
6	05:00	01:00	33,5	3,0	0,1
7	06:00	01:00	36,4	2,9	0,1
8	07:00	01:00	39,4	3,0	0,1

TABELA 5.10 – DADOS OBTIDOS PARA H1 EM 5 CM NO PONTO 02

Nível de água (H ₁) em 5 cm					
Número de leituras	Tempo (min)	Intervalo de tempo (min)	Nível de água do reservatório (cm)	Variação do nível d'água (cm)	Taxa de variação do nível d'água (cm)
1	0	-	27,5	-	-
2	01:00	01:00	27,6	0,1	0,1
3	02:00	01:00	27,7	0,1	0,0
4	03:00	01:00	27,7	0,0	0,1
5	04:00	01:00	27,9	0,2	0,2
6	05:00	01:00	28,1	0,2	0,0
7	06:00	01:00	28,3	0,2	0,0
8	07:00	01:00	28,5	0,2	0,0
9	08:00	01:00	28,8	0,3	0,1
10	09:00	01:00	29,2	0,4	0,1
11	10:00	01:00	29,3	0,1	0,3
12	11:00	01:00	29,6	0,3	0,2
13	12:00	01:00	30,0	0,4	0,1
14	13:00	01:00	30,1	0,1	0,3
15	14:00	01:00	30,4	0,3	0,2
16	15:00	01:00	30,6	0,2	0,1
17	16:00	01:00	30,9	0,3	0,1
18	17:00	01:00	31,1	0,2	0,1

TABELA 5.11 – DADOS OBTIDOS PARA H2 EM 10 CM NO PONTO 02

Nível de água (H ₂) em 10 cm					
Número de leituras	Tempo (min)	Intervalo de tempo (min)	Nível de água do reservatório (cm)	Variação do nível d'água (cm)	Taxa de variação do nível d'água (cm)
1	0	-	36,7	-	-
2	01:00	01:00	36,8	0,1	0,1
3	02:00	01:00	37,0	0,2	0,1
4	03:00	01:00	37,3	0,3	0,1
5	04:00	01:00	37,7	0,4	0,1

Quando se encontrou uma taxa de queda estável da altura de pressão do raio do furo para cada ensaio e, com base na classificação prévia do tipo de solo, foram obtidos os valores de coeficiente de permeabilidade apresentados na TABELA 5.12. Assim, conclui-se que os locais amostrados apresentaram uma permeabilidade (K_{fs}) média de $3,61 \times 10^{-5}$ cm/s.

TABELA 5.12 – RESULTADO DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE IN SITU

Pontos	Alturas (cm)	K_{fs} (cm/s)
01	5	$8,14 \times 10^{-5}$
	10	$1,80 \times 10^{-5}$
02	5	$2,71 \times 10^{-5}$
	10	$1,80 \times 10^{-5}$

Das (2007) relatou valores de coeficientes de permeabilidade para diferentes tipos de solos, conforme pode ser observado na TABELA 5.13, onde se conclui que os resultados obtidos com os ensaios de permeabilidade *in situ*, na profundidade de 30 cm, estão em conformidade as referências do autor, enquadrando-se como uma argila com silte.

TABELA 5.13 – VALORES TÍPICOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLOS SATURADOS

TIPO DE SOLO	K_{fs} (cm/s)
PEDREGULHO LIMPO	100 – 1,0
AREIA GROSSA	1,0 – 0,01
AREIA FINA	0,01 – 0,001
ARGILA COM SILTE	0,001 – 0,00001
ARGILA	<0,000001

FONTE: DAS (2007)

5.3.2 Sondagens a Percussão e Mistas (Sondagens diretas)

As sondagens, conforme Fugro (2016), mostraram um talude com estratigrafia formada por uma camada superficial de colúvio, composto por argila arenosa de baixa resistência ($N_{SPT} \approx 5$), com espessura de 4,0 m nas sondagens e um camada de areia argilosa na sondagem SM-01, iniciando em 4,0 m de profundidade e terminando em 8,5 m. Como a sondagem SM-01 foi executada no pé do talude/viaduto, já era esperada uma camada de colúvio maior, pois são nas cotas inferiores onde mais se encontram esse tipo de solo, sendo esta a sua característica.

Sotoposto ao colúvio, encontrou-se um solo residual saprolítico, composto por areia fina a média siltosa, com pequena porcentagem de argila arenosa com mica, de resistência superior à camada anterior. A espessura desta camada chegou a 4,0 m na sondagem SM-01, já

nas sondagens SM-02 e SM-03 aproximadamente 3,0 m e sobre ela há uma camada de solo residual composto por areia argilosa nas profundidades de 4,0 a 8,0 m.

Subjacente ao solo residual saprolítico encontrou-se uma camada de alteração de rocha (saprólito), caracterizada por um solo composto de areia média à grossa siltosa com pouca fração de argila e mica, e espessura de aproximadamente 5,0 m (SM-01 e SM-02), com resistência a penetração bem superior à anterior. Em maior profundidade, a partir de 16,5 m, atingiu-se a rocha sã de migmatito, composta por quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio e máficos e coloração cinza. O nível de água foi medido nos ensaios variando de 4,95 m a 6,38 m.

Optou-se por nomear as camadas mais superficiais pelos resultados dos ensaios de laboratório, uma vez que a interpretação inicial das sondagens era uma análise tátil/visual. Um resumo contendo a localização, que foi levantada pela equipe de topografia, e as características dessas sondagens é apresentado na TABELA 5.14 e nas FIGURAS 5.5 a 5.7. O boletim completo com os resultados destas sondagens encontra-se no ANEXO A.

TABELA 5.14 – DADOS DAS SONDAJENS REALIZADAS

Sondagem	Prof. (m)	Coordenadas UTM		Cota (m)	N.A. em 24h (m)
SM-01	29,41	7.236.173,296 N	754.112,590 E	715,282	4,95
SM-02	16,32	7.236.151,132 N	754.126,415 E	727,060	6,38
SM-03	10,33	7.236.150,262 N	754.124,466 E	726,642	6,25

FIGURA 5.5 – RESULTADO DA SONDAGEM MISTA SM-01

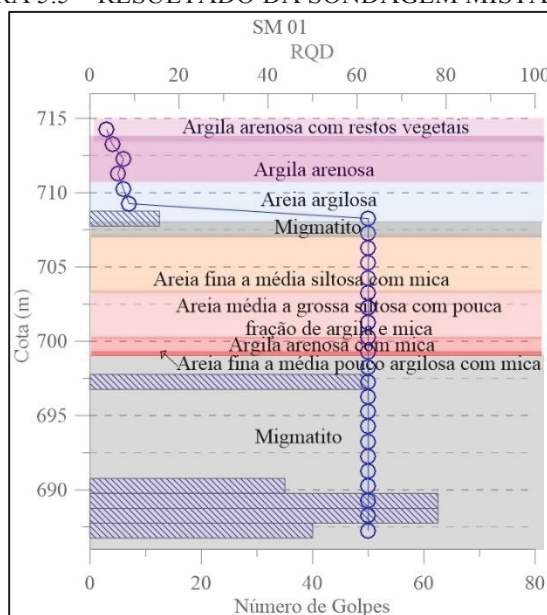


FIGURA 5.6 – RESULTADO DA SONDAGEM MISTA SM-02

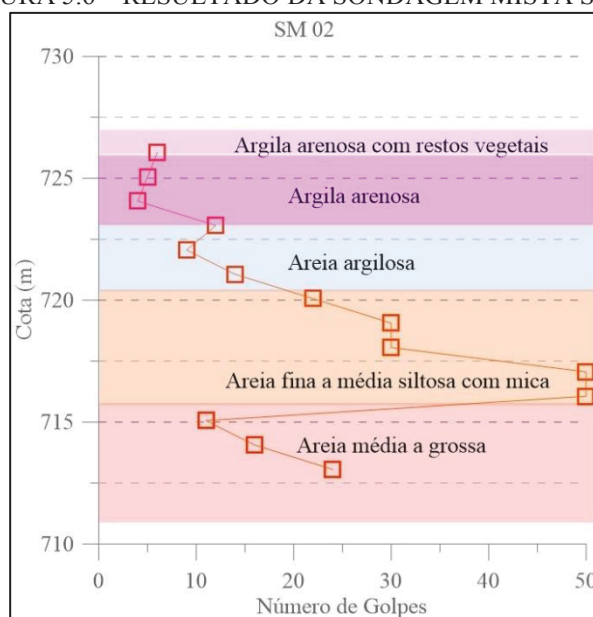
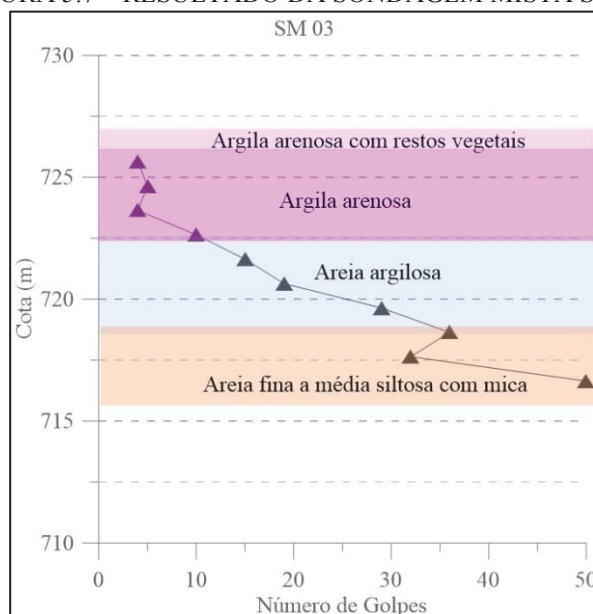


FIGURA 5.7 – RESULTADO DA SONDAGEM MISTA SM-03



Os valores das sondagens foram separados pelas camadas, onde as camadas de argila arenosa e argila arenosa com restos vegetais, foram consideradas como sendo apenas uma camada (Tabela 5.15). Para deixar padronizados os resultados os valores de SPT, os mesmos foram representados dividindo o número de golpes (SPT) pela profundidade alcançada.

A primeira camada (argila arenosa) na sondagem SM-03 obteve a menor variação (COV = 13%), tal camada na SM-02 e na SM-01 apresentou COV de 20% e 35%, respectivamente, considerados valores baixos de variação, se comparados com as outras camadas. A segunda camada de areia argilosa obteve uma grande variação, de 39% a 154%,

nas sondagens SM-02 e SM-01, respectivamente. A terceira camada de areia fina a média siltosa variou de 26% a 81% e a quarta camada de areia média a grossa siltosa apresentou COV de 17% na sondagem SM-01 e 89% na SM-02.

Destaca-se que foram analisados apenas os valores de N_{SPT} das sondagens diretas realizadas, deste modo a sondagem SM-01 tem dispersão devido a um matacão que foi encontrado no substrato de areia argilosa, o que afeta diretamente nos valores dos golpes desta camada.

Também existem muitos fatores determinantes na medida de SPT, que interferem nos resultados dos golpes em cada camada, conforme Schnaid (2012):

- Índice de vazios, quanto menor este índice, maior será a resistência à penetração;
- Em solos coesivos, a resistência à penetração é função da resistência não drenada, sendo controlada pelos fatores de plasticidade, sensibilidade e fissuração da argila.
- Cimentação, aumenta a resistência à penetração;
- Nível de tensões, aumentando a tensão vertical ou horizontal aumenta a resistência;
- Os equipamentos utilizados, por exemplo o peso e o comprimento da composição, a altura da queda do martelo, a forma, dimensão e estado de conservação do amostrador;
- A execução do ensaio, pois pode ocorrer variação na energia transferida ao amostrador no processo de cravação, procedimentos distintos de avanço da sondagem, má limpeza do furo, excesso de lavagem para cravação, contagem incorreta dos golpes.

TABELA 5.15 – VALORES DE COV PARA CADA CAMADA DE CADA SONDAGEM

Camada	Descrição	Sondagem / Profundidade (m)	Golpes	Profundidade alcançada (cm)	Golpes/ cm	Média	Desvio Padrão	COV
1	Argila arenosa	1-1	3	30	0,10	0,14	0,05	35%
		1-2	4	30	0,13			
		1-3	6	30	0,20			
		2-1	6	30	0,20	0,17	0,03	20%
		2-2	5	30	0,17			
		2-3	4	30	0,13			
		3-1	4	30	0,13	0,14	0,02	13%
		3-2	5	30	0,17			
		3-3	4	30	0,13			
2	Areia argilosa	1-4	5	30	0,17	0,86	1,33	154%
		1-5	6	30	0,20			
		1-6	7	30	0,23			
		1-7	60	21	2,86			
		2-4	12	30	0,40	0,48	0,19	39%
		2-5	9	30	0,30			
		2-6	14	30	0,47			
		2-7	22	30	0,73			
		3-4	10	30	0,33	0,61	0,27	44%
		3-5	15	30	0,50			
		3-6	19	30	0,63			
		3-7	29	30	0,97			
3	Areia fina a média siltosa	1-9	52	23	2,26	2,90	0,76	26%
		1-10	40	15	2,67			
		1-11	60	15	4,00			
		1-12	40	15	2,67			
		2-8	30	30	1,00	2,93	2,38	81%
		2-9	30	30	1,00			
		2-10	53	9	5,89			
		2-11	50	13	3,85			
		3-8	36	30	1,20	1,59	0,79	50%
		3-9	32	30	1,07			
		3-10	45	18	2,50			

Camada	Descrição	Sondagem / Profundidade (m)	Golpes	Profundidade alcançada (cm)	Golpes/cm	Média	Desvio Padrão	COV
4	Areia média a grossa siltosa (Alteração de Rocha)	1-13	51	22	2,32	2,09	0,36	17%
		1-14	50	30	1,67			
		1-15	50	22	2,27			
		2-12	11	30	0,37	1,58	1,40	89%
		2-13	16	30	0,53			
		2-14	24	30	0,80			
		2-15	36	11	3,27			
		2-16	50	17	2,94			

Também foram calculadas as variações das camadas, com isso obteve-se COV de 22% na primeira camada de argila arenosa, 113% na segunda camada composta por areia argilosa, 60% na terceira camada de areia fina a média siltosa e 63% na quarta camada formada por areia média a grossa siltosa (TABELA 5.16). Nestas sondagens o substrato superior apresenta o menor COV (22%), enquanto o substrato subjacente a este obteve o maior COV (113%).

TABELA 5.16 – VALORES DE COV PARA CADA CAMADA

Camada	Descrição	Sondagem / Profundidade (m)	Golpes	Profundidade alcançada (cm)	Golpes/cm	Média	Desvio Padrão	COV
1	Argila arenosa	1-1	3	30	0,10	0,15	0,03	22%
		1-2	4	30	0,13			
		1-3	6	30	0,20			
		2-1	6	30	0,20			
		2-2	5	30	0,17			
		2-3	4	30	0,13			
		3-1	4	30	0,13			
		3-2	5	30	0,17			
		3-3	4	30	0,13			
2	Areia argilosa	1-4	5	30	0,17	0,65	0,73	113%
		1-5	6	30	0,20			
		1-6	7	30	0,23			
		1-7	60	21	2,86			
		2-4	12	30	0,40			
		2-5	9	30	0,30			
		2-6	14	30	0,47			
		2-7	22	30	0,73			
		3-4	10	30	0,33			
		3-5	15	30	0,50			
		3-6	19	30	0,63			
		3-7	29	30	0,97			

Camada	Descrição	Sondagem / Profundidade (m)	Golpes	Profundidade alcançada (cm)	Golpes/ cm	Média	Desvio Padrão	COV
3	Areia fina a média siltosa	1-9	52	23	2,26	2,55	1,55	60%
		1-10	40	15	2,67			
		1-11	60	15	4,00			
		1-12	40	15	2,67			
		2-8	30	30	1,00			
		2-9	30	30	1,00			
		2-10	53	9	5,89			
		2-11	50	13	3,85			
		3-8	36	30	1,20			
		3-9	32	30	1,07			
		3-10	45	18	2,50			
4	Areia média a grossa siltosa (Alteração de Rocha)	1-13	51	22	2,32	1,77	1,11	63%
		1-14	50	30	1,67			
		1-15	50	22	2,27			
		2-12	11	30	0,37			
		2-13	16	30	0,53			
		2-14	24	30	0,80			
		2-15	36	11	3,27			
		2-16	50	17	2,94			

Ainda visando entender a heterogeneidade das camadas do solo no talude, foram analisadas outras sete sondagens SPT, as quais foram realizadas em fevereiro de 2011 (DEG, 2011). Estas sondagens atingiram somente a segunda camada (areia argilosa), podendo-se observar que em cada sondagem a camada de argila arenosa mostrou uma variação muito diferente, de 0% a 42%. Já na camada de areia argilosa o COV ficou entre 7% e 41%, conforme apresentado na TABELA 5.17.

TABELA 5.17 – COV PARA CADA CAMADA DE CADA SONDADE DAS SONDAGENS SPT (2011)

Camada	Descrição	Sondagem / Profundidade (m)	Golpes	Profundidade alcançada	Golpes/ cm	Média	Desvio Padrão	COV
1	Argila arenosa	1-1	4	30	0,13	0,17	0,03	16%
		1-2	5	30	0,17			
		1-3	5	30	0,17			
		1-4	6	30	0,20			
		2-1	3	30	0,10	0,15	0,03	22%
		2-2	5	30	0,17			
		2-3	5	30	0,17			
		2-4	5	30	0,17			
		3-1	2	49	0,04	0,04	0,00	9%
		3-2	2	43	0,05			
		4-1	4	30	0,13	0,13	0,00	0%
		4-2	4	30	0,13			
		4-3	4	30	0,13			
		5-1	2	45	0,04	0,06	0,03	47%
		5-2	3	30	0,10			
		5-3	2	40	0,05			
		6-1	2	50	0,04	0,11	0,07	58%
		6-2	4	30	0,13			
		6-3	5	30	0,17			
		7-1	4	30	0,13	0,29	0,11	39%
		7-2	5	30	0,17			
		7-3	6	30	0,20			
		7-4	7	30	0,23			
		7-5	9	30	0,30			
		7-6	13	30	0,43			
		7-7	10	30	0,33			
		7-8	8	30	0,27			
		7-9	12	30	0,40			
		7-10	14	30	0,47			

Camada	Descrição	Sondagem / Profundidade (m)	Golpes	Profundidade alcançada	Golpes/ cm	Média	Desvio Padrão	COV
2	Areia argilosa	1-5	11	30	0,37	0,41	0,12	29%
		1-6	7	30	0,23			
		1-7	13	30	0,43			
		1-8	15	30	0,50			
		1-9	16	30	0,53			
		2-5	7	30	0,23	0,34	0,09	27%
		2-6	8	30	0,27			
		2-7	10	30	0,33			
		2-8	13	30	0,43			
		2-9	13	30	0,43			
		3-3	8	30	0,27	0,49	0,20	41%
		3-4	10	30	0,33			
		3-5	15	30	0,50			
		3-6	18	30	0,60			
		3-7	23	30	0,77			
		4-4	18	30	0,60	0,84	0,22	26%
		4-5	27	30	0,90			
		4-6	31	30	1,03			
		7-11	9	30	0,30	0,32	0,02	7%
		7-12	10	30	0,33			

E, assim como foi analisado nas sondagens diretas (SM-01, SM-02 e SM-03), também foram verificadas as variações das camadas, onde o substrato de argila arenosa variou 63% e o substrato de areia argilosa variou 47% (TABELA 5.18).

TABELA 5.18 – COV PARA CADA CAMADA DAS SONDAGENS SPT

Camada	Descrição	Sondagem / Profundidade (m)	Golpes	Profundidade alcançada	Golpes/ cm	Média	Desvio Padrão	COV
1	Argila arenosa	1-1	4	30	0,13	0,18	0,11	63%
		1-2	5	30	0,17			
		1-3	5	30	0,17			
		1-4	6	30	0,20			
		2-1	3	30	0,10			
		2-2	5	30	0,17			
		2-3	5	30	0,17			
		2-4	5	30	0,17			
		3-1	2	49	0,04			
		3-2	2	43	0,05			
		4-1	4	30	0,13			
		4-2	4	30	0,13			
		4-3	4	30	0,13			
		5-1	2	45	0,04			
		5-2	3	30	0,10			
		5-3	2	40	0,05			
		6-1	2	50	0,04			
		6-2	4	30	0,13			
		6-3	5	30	0,17			
		7-1	4	30	0,13			
		7-2	5	30	0,17			
		7-3	6	30	0,20			
		7-4	7	30	0,23			
		7-5	9	30	0,30			
		7-6	13	30	0,43			
		7-7	10	30	0,33			
		7-8	8	30	0,27			
		7-9	12	30	0,40			
		7-10	14	30	0,47			

Camada	Descrição	Sondagem / Profundidade (m)	Golpes	Profundidade alcançada	Golpes/ cm	Média	Desvio Padrão	COV
2	Areia argilosa	1-5	11	30	0,37	0,47	0,22	47%
		1-6	7	30	0,23			
		1-7	13	30	0,43			
		1-8	15	30	0,50			
		1-9	16	30	0,53			
		2-5	7	30	0,23			
		2-6	8	30	0,27			
		2-7	10	30	0,33			
		2-8	13	30	0,43			
		2-9	13	30	0,43			
		3-3	8	30	0,27			
		3-4	10	30	0,33			
		3-5	15	30	0,50			
		3-6	18	30	0,60			
		3-7	23	30	0,77			
		4-4	18	30	0,60			
		4-5	27	30	0,90			
		4-6	31	30	1,03			
		7-11	9	30	0,30			
		7-12	10	30	0,33			

Quando são comparadas as duas campanhas de sondagens, pode-se observar que na primeira camada de argila arenosa apresentou variação menor nas sondagens mistas (COV = 22%) quando comparada com as sondagens SPT (COV = 59%) realizadas em 2011. Já no substrato de areia argilosa (segunda camada) a variação maior foi para as sondagens mistas (COV = 113%), quando confrontadas com as sondagens SPT (COV = 47%). Juntando todos os resultados das sondagens, para estas duas camadas, obtiveram-se uma variação de 58% na argila arenosa e 89% na areia argilosa.

A terceira camada composta por areia fina à média siltosa apresentou 60% de variação e a quarta camada formada por areia média a grossa siltosa (Alteração de Rocha) apresentou variação de 63%, conforme já apresentado, pois as sondagens SPT realizadas em 2011 não atingiram estas duas últimas camadas (TABELA 5.19).

TABELA 5.19 – RESULTADO DO COV EM CADA CAMADA DO TALUDE

Camada	Descrição	COV
1	Argila arenosa	58%
2	Areia argilosa	89%
3	Areia fina a média siltosa	60%
4	Areia média a grossa siltosa (Alteração de Rocha)	63%

5.3.3 Geofísica (Sondagem indireta)

Com base no procedimento descrito no capítulo 4, os dados de ensaio obtidos em campo foram processados em escritório, onde a determinação do contraste de resistividade elétrica foi a base para a interpretação das seções de caminhamento elétrico. Assim, foram gerados perfis referentes às 12 linhas de caminhamento elétrico, onde foram encontrados 3 padrões anômalos de resistividade elétrica (ANEXO B).

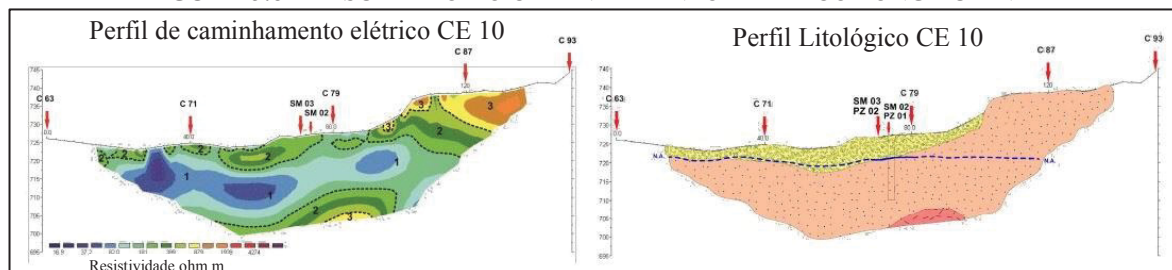
Conforme interpretados em Fugro (2016), os padrões da resistividade são:

- Padrão 1 é caracterizado pela presença de estratos com valores baixos de resistividade elétrica (abaixo de 200 Ωm), representado pela tonalidade azul, e pode ser o indicativo da presença de material sedimentar e/ou alterado com maior teor de umidade.
- Padrão 2 é caracterizado pela presença de estratos com valores intermediários de resistividade elétrica, variando entre 200 e 800 Ωm , e está identificado por tonalidades em verde. Este estrato pode ser indicativo da presença de material alterado e/ou sedimentar com teor intermediário de umidade.
- Padrão 3 é caracterizado pela presença de estratos com altos valores de resistividade elétrica, acima de 800 Ωm , sendo representado em tonalidades de amarelo, marrom, laranja e vermelho. Este estrato pode ser sinal da presença de material compactado e/ou rochoso e/ou sedimento com baixo teor de umidade.

Com base nos perfis de caminhamento elétrico e seus respectivos valores de resistividade com materiais geológicos, foi possível interpretar a litologia das estruturas presentes no local estudo, estando essa interpretação subsidiada ainda pelos resultados das sondagens mistas (ANEXO B). Nas FIGURAS 5.8 e 5.9 apresentam-se os resultados da

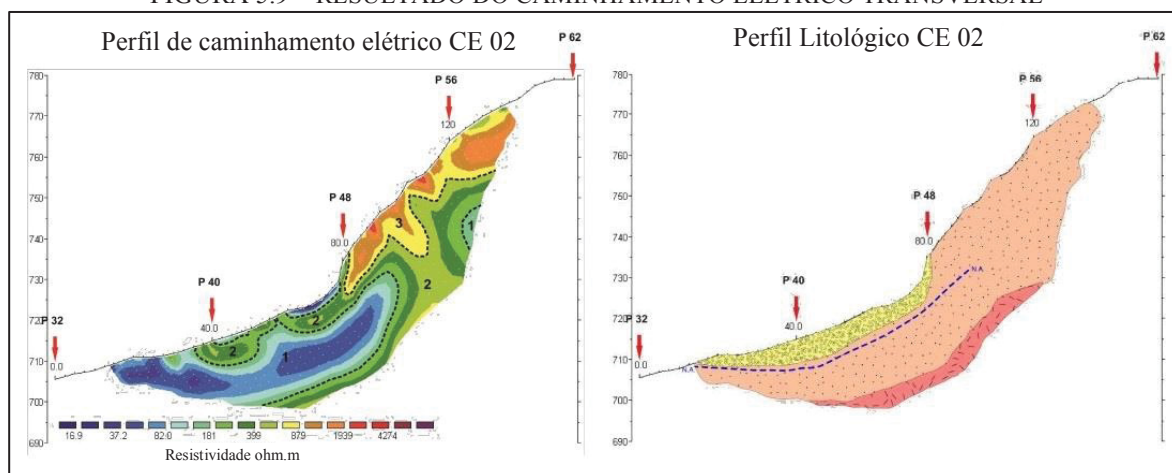
resistividade obtidos pela geofísica e os perfis litológicos gerados pela interpretação destes para um caminhamento elétrico longitudinal e transversal, respectivamente, no talude.

FIGURA 5.8 – RESULTADO DO CAMINHAMENTO ELÉTRICO LONGITUDINAL



FONTE: FUGRO (2016)

FIGURA 5.9 – RESULTADO DO CAMINHAMENTO ELÉTRICO TRANSVERSAL



FONTE: FUGRO (2016)

Neste ensaio foi possível, ainda por meio da interpretação, constatar uma camada mais superficial de colúvio, com espessura variando de 2,0 a 8,5 m aproximadamente, se estendendo do pé do talude até quase o seu topo, composto predominantemente por argila arenosa. Sotoposta a essa camada tem-se um solo residual, com espessura variando de 15,0 a 30,0 m, composta predominantemente por areia média a grossa, com estruturas reliquias e caulinição, onde também se observam alguns fragmentos de rocha. Logo abaixo desta, encontra-se uma camada de migmatito muito alterado a medianamente alterado, com aproximadamente 10,0 m de espessura. Por fim, foi possível identificar em alguns pontos uma camada de migmatito, rocha sã.

Com relação ao nível de água, durante visitas de campo, mediu-se a profundidade e o mesmo se encontrava próximo da superfície, na parte inferior do talude (pé), onde este não se apresenta tão íngreme. O mesmo foi detectado pela geofísica, pois há uma brusca diminuição

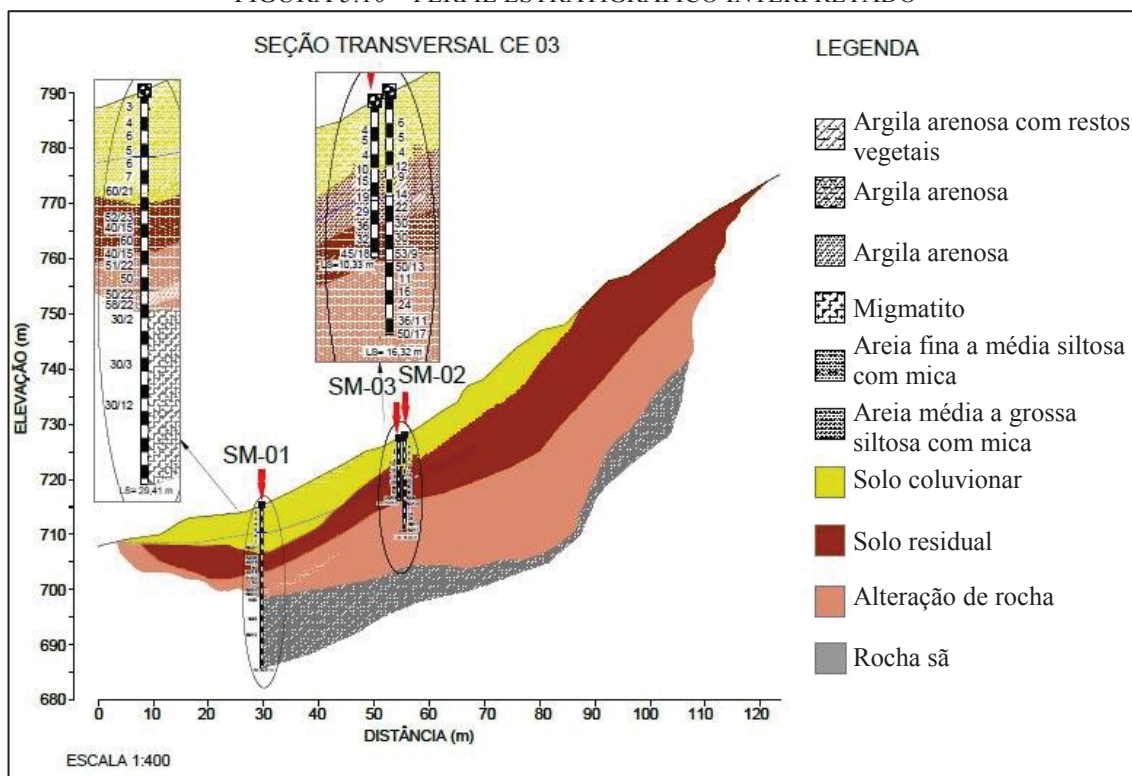
da resistividade, e também se observou que conforme a declividade aumentava, o nível de água aprofundava-se, as sondagens já traziam um indicativo dessa alteração de nível, pois o mesmo encontrava-se entre 4,95 e 6,38 m nos locais de sondagens diretas.

Quando se analisou apenas as camadas de solo pelas sondagens as informações eram pontuais e com os resultados da geofísica foi possível analisar o talude de maneira mais global, assim percebeu-se principalmente a diferença na camada de colúvio nas cotas mais superiores, do talude, que deixa de existir, e o nível de água no talude que tornar-se mais profundo com o aumento da altura e também a declividade se torna maior, o que contribui para este fator.

Um mesmo valor de resistividade pode ser aplicado para diversas formações geológicas, assim como uma mesma formação pode apresentar uma grande variação de valores de resistividade, como apresentado no Capítulo 2. Em complemento a isso, a resistividade pode sofrer grande variação dependendo da composição do material, estado físico, presença de falhas e fraturas e, principalmente, devido ao grau de saturação do meio.

Para melhor caracterizar e visualizar as camadas de solo presentes no talude, fundamentou-se nas sondagens, no levantamento topográfico do km 552 PN e no resultado deste ensaio de geofísica para o caminhamento CE 03, um perfil estratigráfico na seção transversal do talude foi interpretado, como apresentado na FIGURA 5.10.

FIGURA 5.10 – PERFIL ESTRATIGRÁFICO INTERPRETADO

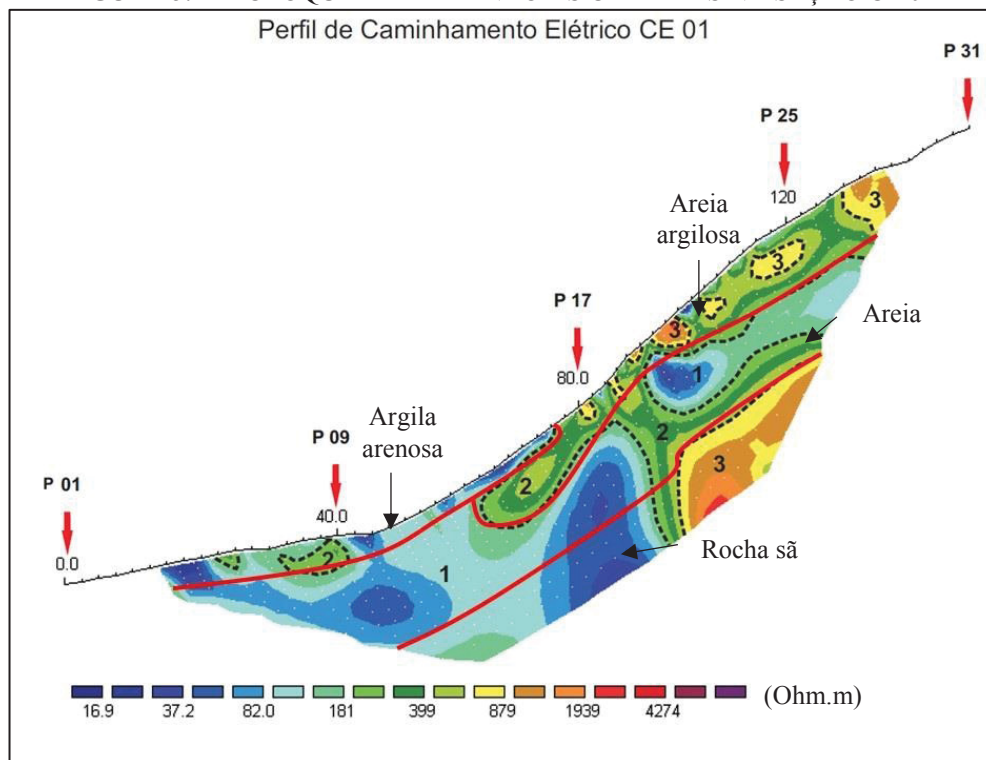


5.3.3.1 Interpretação da geofísica sem os resultados das sondagens

Os valores de resistividade obtidos em campo e gerados pelo Res2DInv foram organizados no Excel através de macros, para deixar todos os dados de resistividade alinhados, em linhas e colunas, pela profundidade e distância do caminhamento, respectivamente. Depois dessa organização, separou-se valores por camadas do solo. Para isso foram avaliados os perfis de caminhamento elétrico em escala cromática e os valores de resistividade, os quais foram organizados no Excel anteriormente, conforme as seções CE 01 a CE 12 apresentadas nas FIGURAS 5.11 a 5.22. Utilizou-se a literatura para conseguir definir o material correspondente a resistividade em cada camada e os ensaios de granulometria realizados em laboratório.

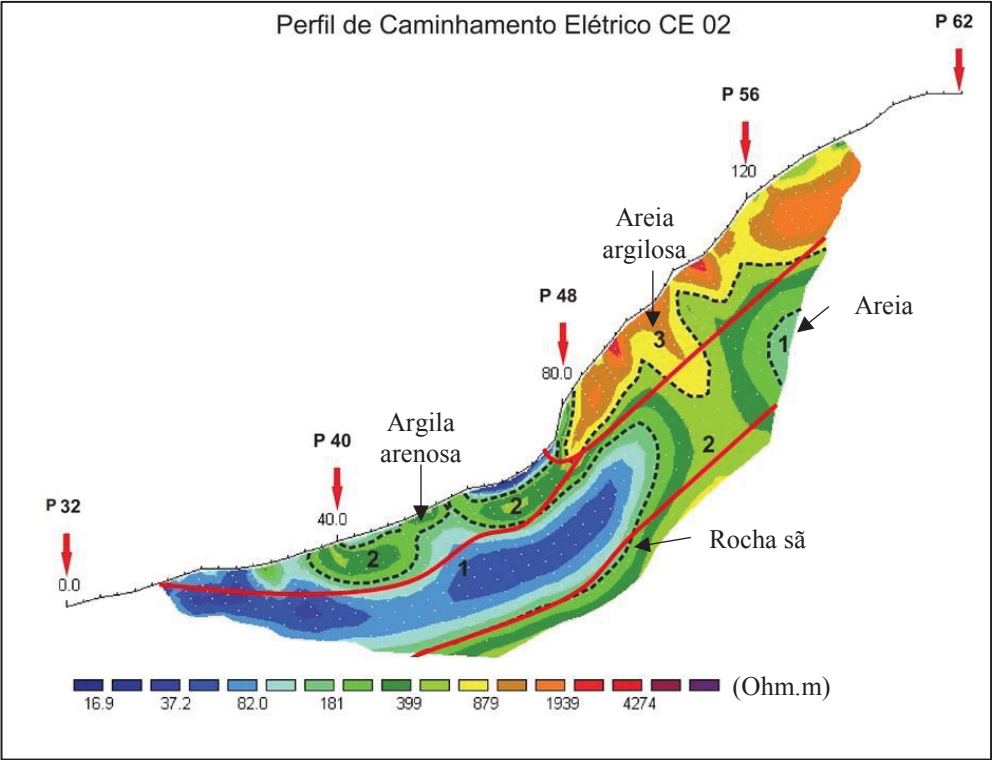
Através dessa interpretação chegou-se a quatro camadas distintas: uma camada de argila arenosa, presente na camada mais superficial do talude próximas ao pé até o centro do talude; outra de areia argilosa presente na camada mais superficial a partir do centro do talude até o topo; uma camada de areia, a qual encontra-se abaixo das camadas de argila arenosa e areia argilosa e, a última camada, a rocha sã.

FIGURA 5.11 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 01



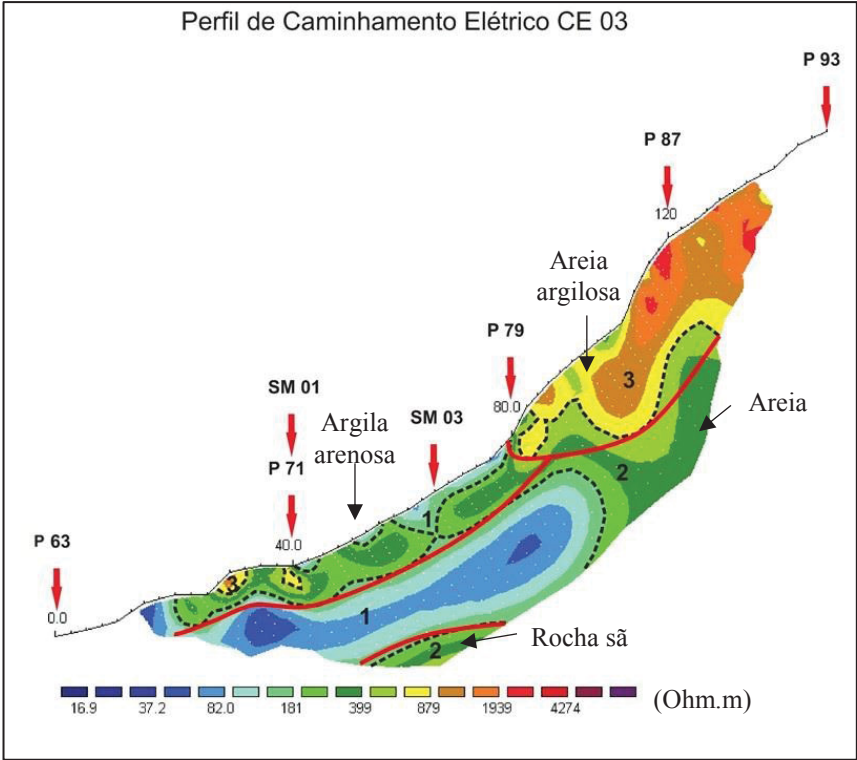
FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

FIGURA 5.12 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 02



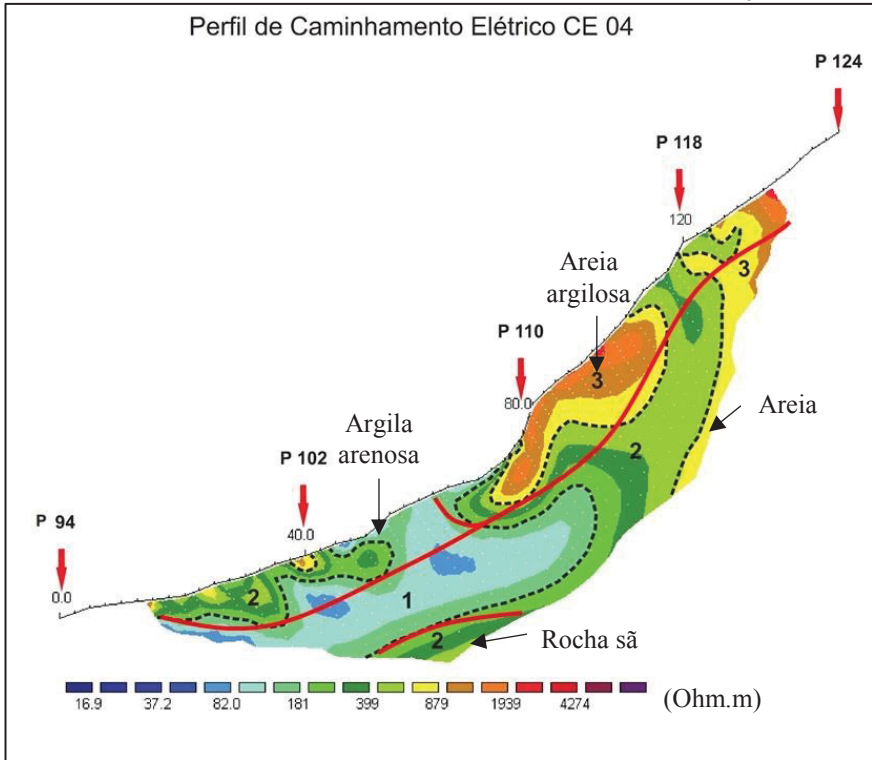
FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

FIGURA 5.13 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 03



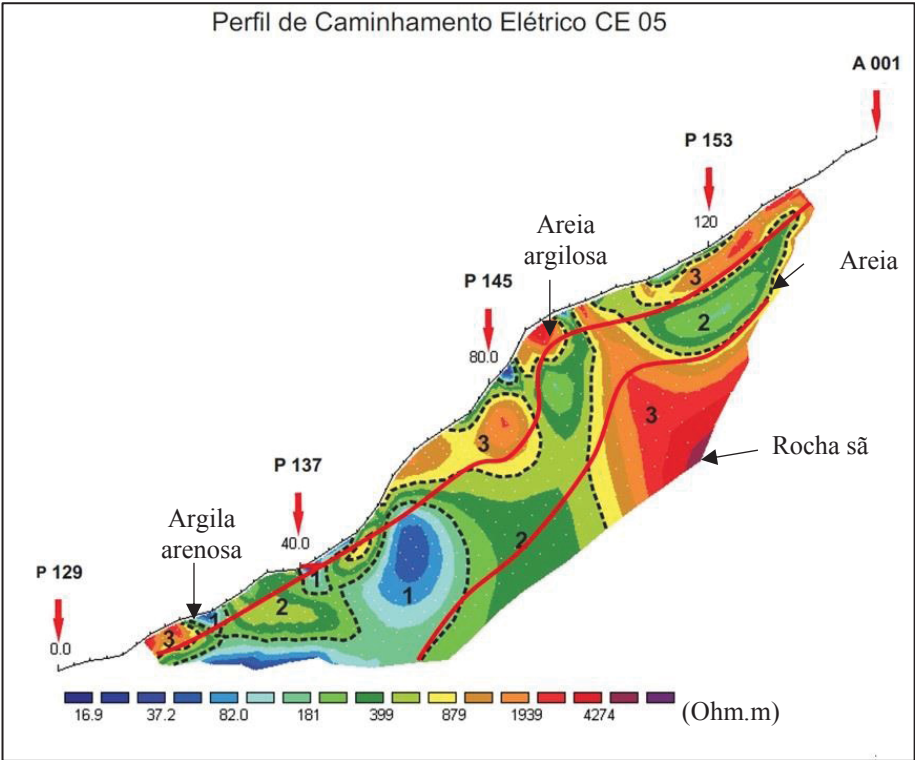
FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

FIGURA 5.14 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 04



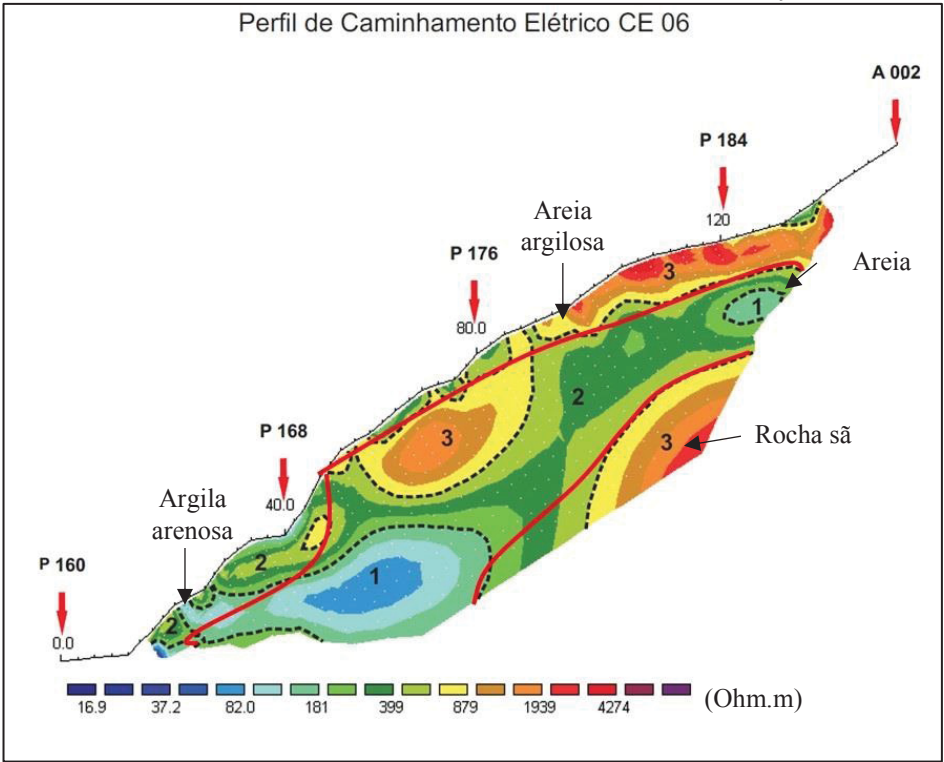
FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

FIGURA 5.15 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 05



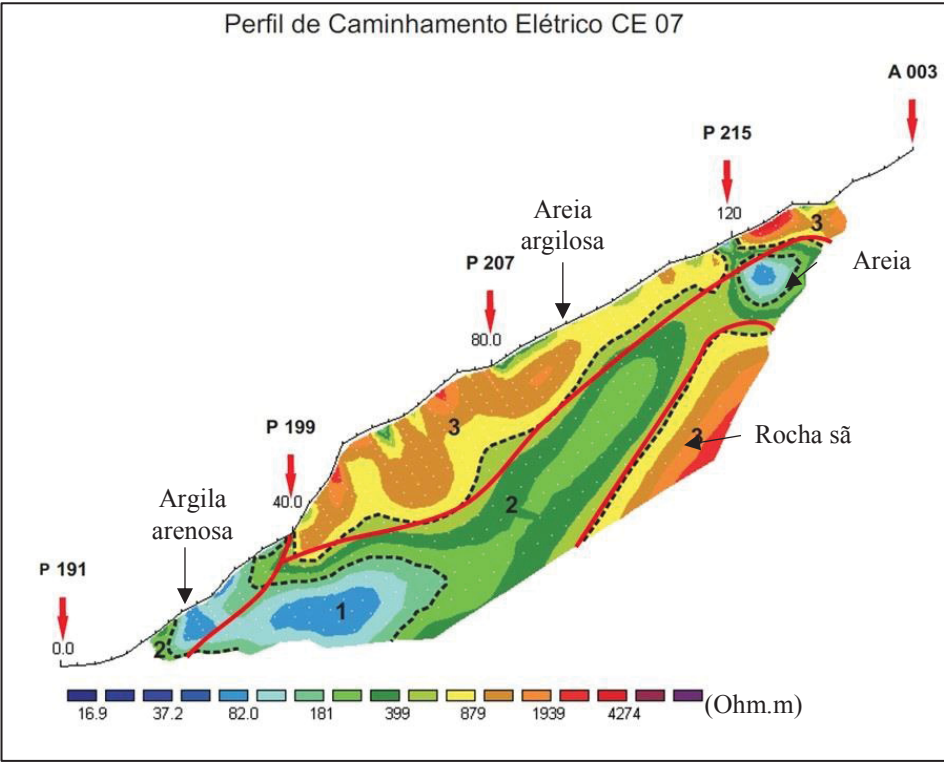
FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

FIGURA 5.16 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 06
Perfil de Caminhamento Elétrico CE 06



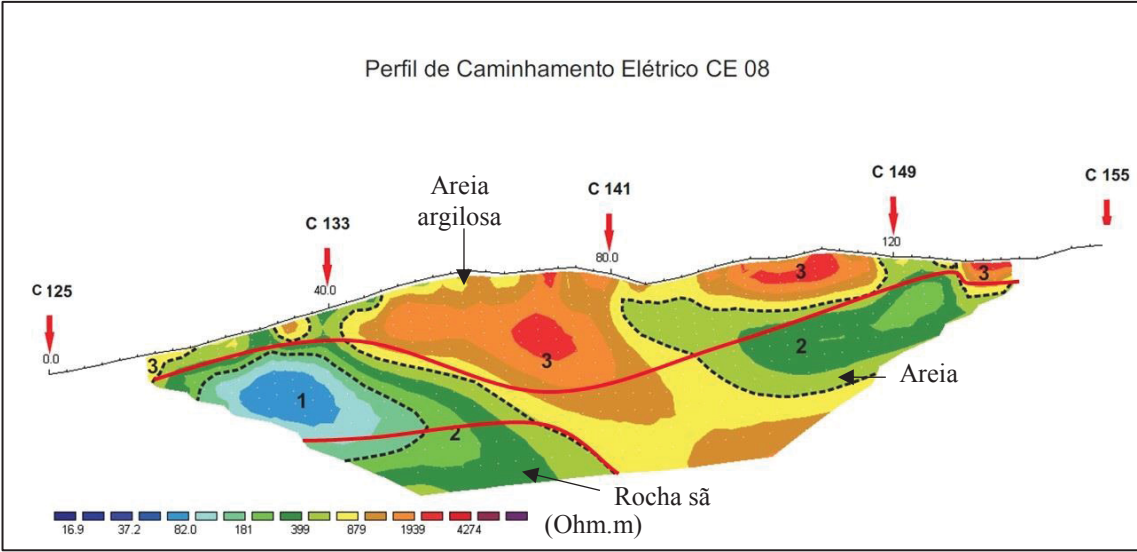
FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

FIGURA 5.17 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 07
Perfil de Caminhamento Elétrico CE 07



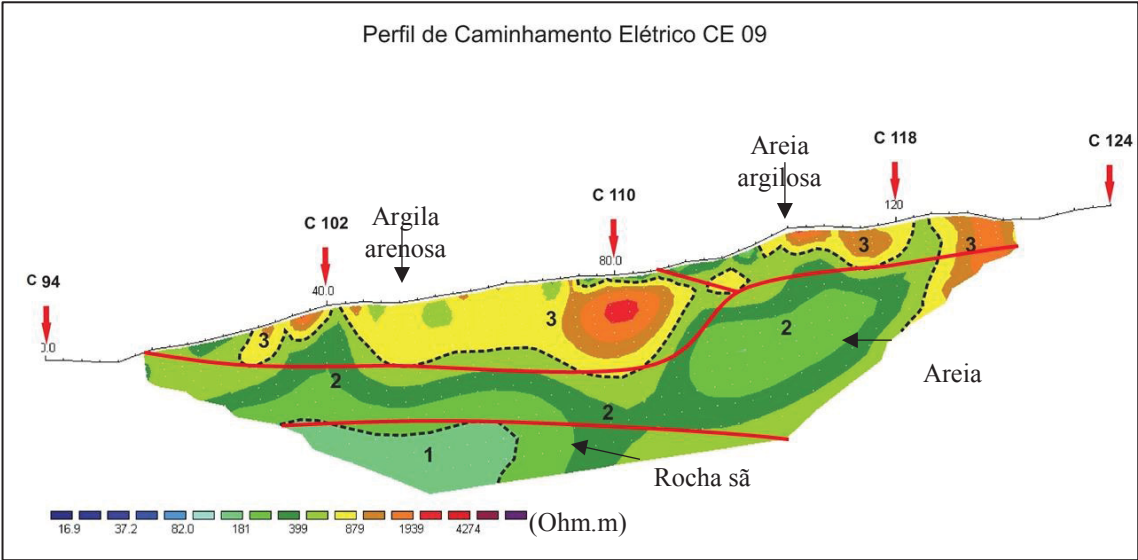
FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

FIGURA 5.18 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 08



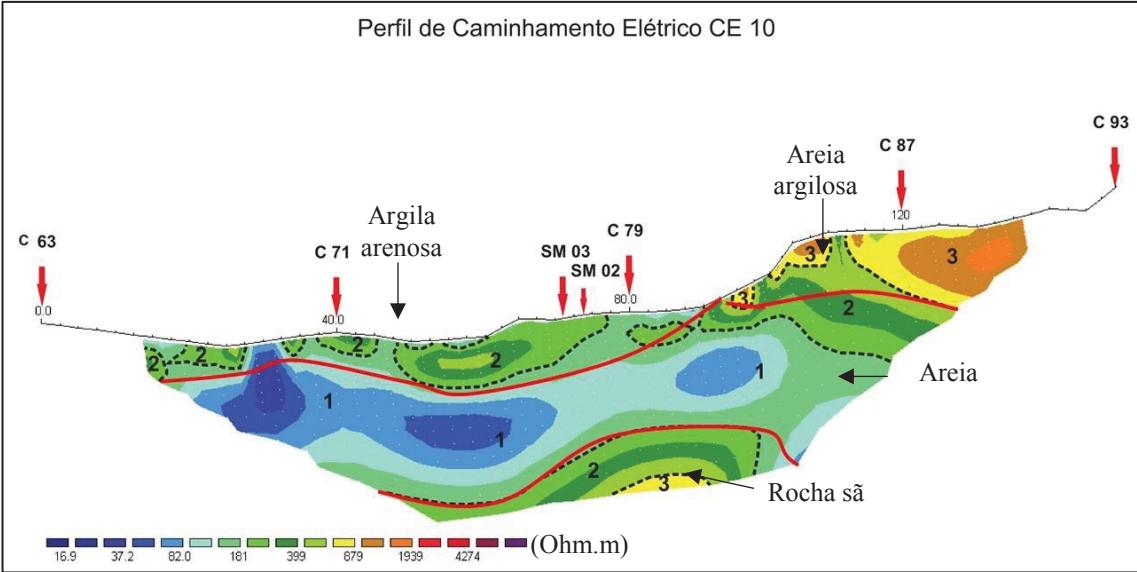
FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

FIGURA 5.19 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 09



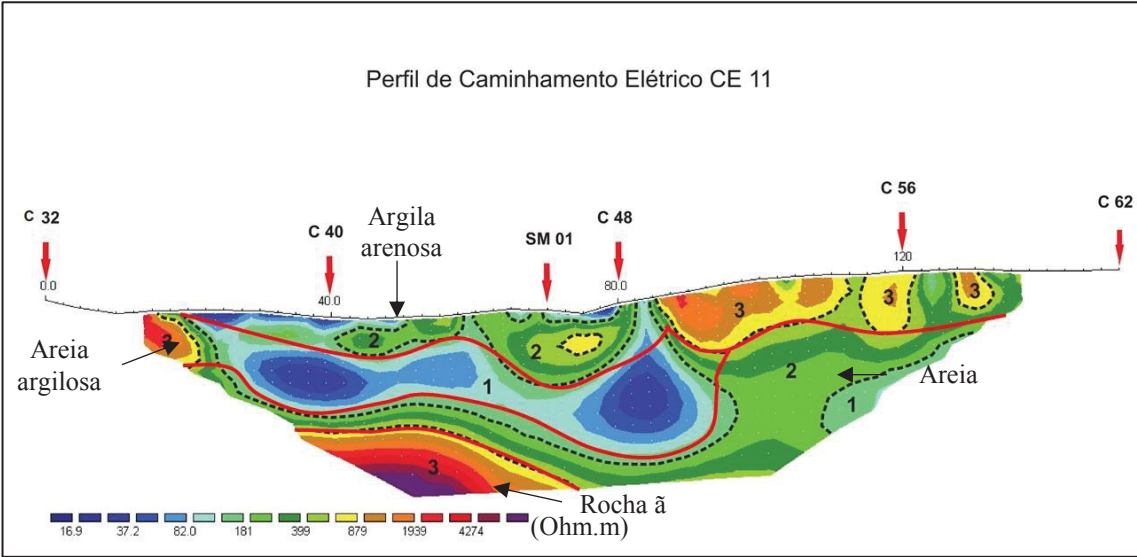
FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

FIGURA 5.20 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 10



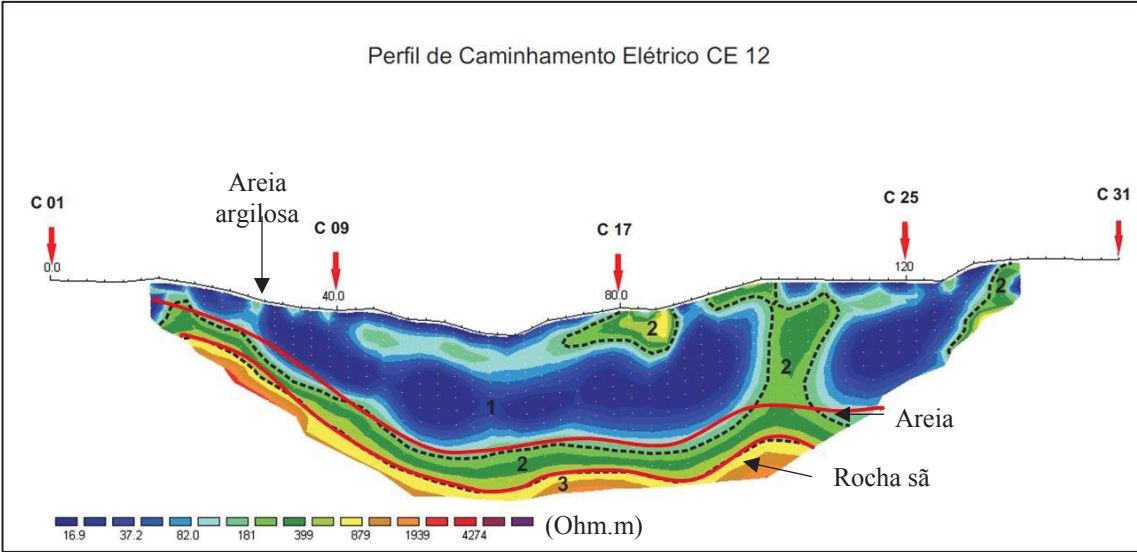
FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

FIGURA 5.21 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 11



FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

FIGURA 5.22 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 12



FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

Após as camadas delimitadas, utilizou-se o programa Excel para avaliar o coeficiente de variação de camada em cada seção, como apresentado nas TABELAS 5.20 e 5.21. Nelas é possível observar as variações dos valores de resistividade, dentro das camadas em cada seção. Cabe ressaltar que a presença de água e sua influência não foi abordada nesta pesquisa.

A seção CE 04, na rocha sã, apresentou a menor dispersão (34%). O máximo COV foi encontrado nas seções CE 01 e CE 05, nas camadas de rocha sã e argila arenosa, respectivamente. E a seção CE 07 foi a que apresentou a menor oscilação entre os valores de COV nas suas camadas diferença de 13%, a maior areia com 70% e a menor areia argilosa 57%.

TABELA 5.20 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA GEOFÍSICA NAS SEÇÕES DE CE 01 A CE 06

Camada	Descrição	COV CE 01	COV CE 02	COV CE 03	COV CE 04	COV CE 05	COV CE 06
1	Argila arenosa	66%	86%	70%	84%	135%	58%
2	Areia argilosa	76%	51%	49%	54%	84%	78%
3	Areia	96%	94%	87%	72%	93%	88%
4	Rocha sã	135%	36%	55%	34%	118%	95%

TABELA 5.21 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA GEOFÍSICA NAS SEÇÕES DE CE 07 A CE 12

Camada	Descrição	COV CE 07	COV CE 08	COV CE 09	COV CE 10	COV CE 11	COV CE 12
1	Argila arenosa	65%		52%	46%	84%	
2	Areia argilosa	57%	53%	49%	43%	88%	131%
3	Areia	70%	70%	65%	121%	101%	71%
4	Rocha sã	64%	77%	41%	66%	50%	81%

Analisando apenas as camadas, a argila arenosa ficou com COV de 75%, a areia argilosa de 68%, areia de 86% e rocha sã de 71%, uma pequena diferença de 18% entre a maior e a menor, porém esses de COV são altos, mostrando a grande variabilidade espacial dos valores de resistividade no talude.

Quando comparados esses valores com os das sondagens, constatou-se que as sondagens apresentaram uma menor variabilidade. Expressaram coeficientes de variação menores do que a geofísica em todas as camadas.

TABELA 5.22 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS CAMADAS PARA A GEOFÍSICA COM INTERPREÇÃO DIRETA DO ENSAIO

Camada	Descrição	COV
1	Argila arenosa	75%
2	Areia argilosa	68%
3	Areia	86%
4	Rocha sã	71%

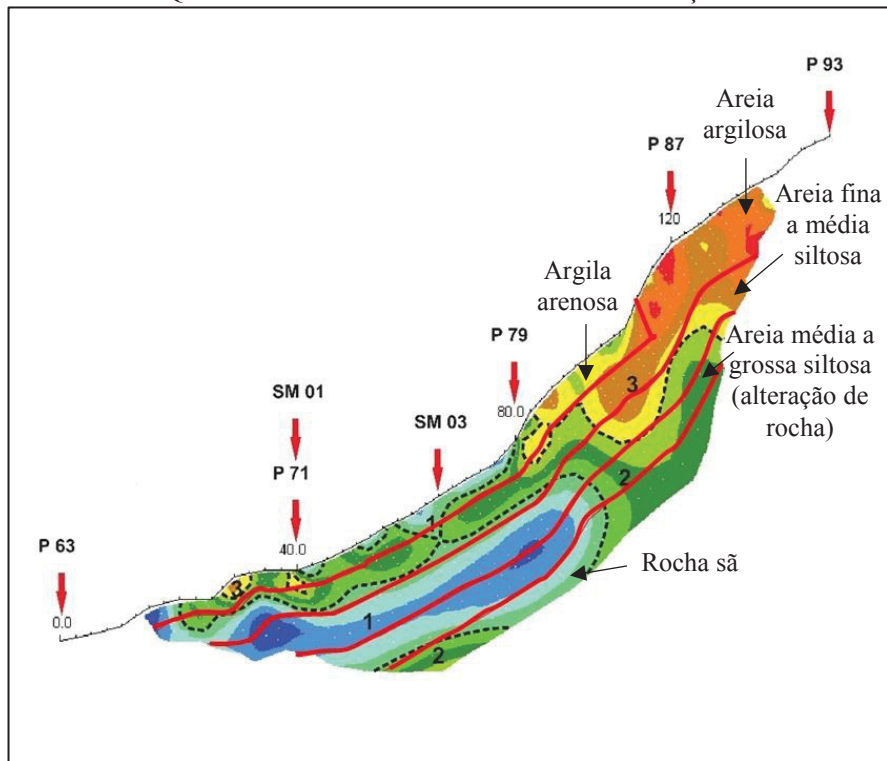
5.3.3.2 Interpretação da geofísica com base nos resultados das sondagens

Os valores de resistividade da geofísica, após a inversão dados, também foram agrupados em camadas definidas pelas sondagens diretas (argila arenosa, areia argilosa, areia fina a média siltosa, areia média a grossa siltosa e rocha sã).

Considerou-se, nas seções transversais do talude, geradas pelos caminhamentos elétricos CE 01 a CE 04, como pertencentes a camada de argila arenosa, os valores de resistividade resultantes do início do caminhamento (pé do talude) até 106,5 m do caminhamento. E em profundidade, definiu-se da superfície a 3,17 m. Essa camada representa o colúvio. A camada de areia argilosa foi definida iniciando na distância 108,75 m do caminhamento até o final, para a profundidade até 3,17 m. E da profundidade 3,17 m a 6,76 m, para todo o caminhamento elétrico. Definiu-se que os dados de resistividade, ao longo de todo o caminhamento, que foram obtidos da profundidade de 6,76 m a 11,54 m correspondem ao estrato formado por areia fina a média siltosa. Os resultados de resistividade da profundidade de 11,54 m a 15,58 m, em toda a extensão do caminhamento, representam a camada de areia média a grossa siltosa (alteração de rocha). E, por fim, na profundidade de 15,58 m a 26,38 m

estão os valores de resistividade relacionados à rocha sã conforme representado na FIGURA 5.23).

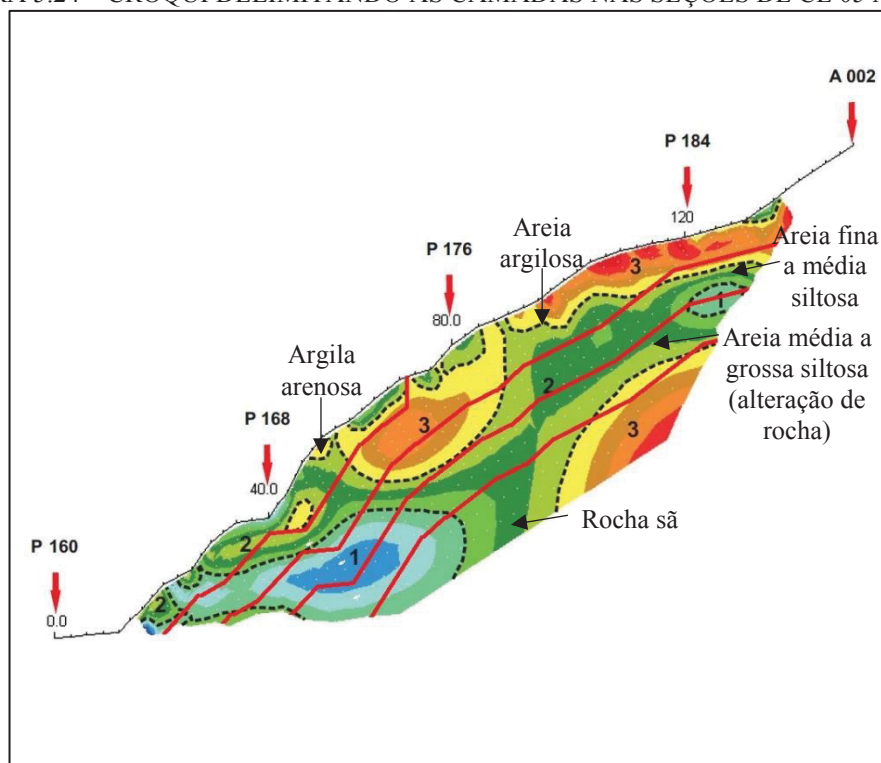
FIGURA 5.23 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NAS SEÇÕES DE CE 01 A CE 04



FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

Para demais seções transversais, CE 05 a CE 07, foi considerado que a camada de argila arenosa se encontra na superfície até a profundidade de 3,17 m, a partir do início do caminhamento até 71,25 m. A camada de areia argilosa, para esta mesma profundidade, inicia-se em 71,25 m no sentido do caminhamento até o final do caminhamento e em todo o caminhamento elétrico, nas profundidades de 3,17 m a 6,76 m. As camadas de areia fina a média siltosa, areia média a grossa siltosa (alteração de rocha) e rocha sã encontram-se distribuídas como nas seções transversais CE 01 a CE 04 (FIGURA 5.24).

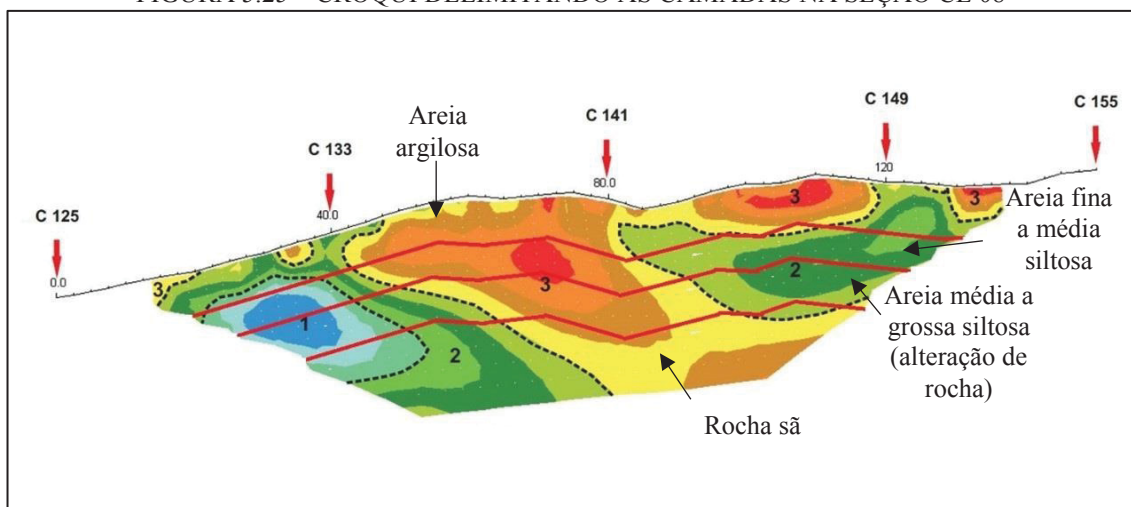
FIGURA 5.24 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NAS SEÇÕES DE CE 05 A CE 07



FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

As seções longitudinais foram delimitadas da mesma maneira. A seção CE 08, a qual foi realizada próxima do topo do talude, sendo a sua primeira camada uma areia argilosa, presente até a profundidade de 6,76 m. Não há a camada de argila arenosa nesta seção, pois essa camada corresponde ao colúvio, característico de regiões mais baixas do talude. A areia fina a média siltosa neste caminhamiento encontra-se nas profundidades de 6,76 m a 11,54 m, seguida da camada de areia média a grossa siltosa (alteração de rocha) até 15,58 m e, por fim, a rocha sã de 15,58 m a 26,38 m (FIGURA 5.25).

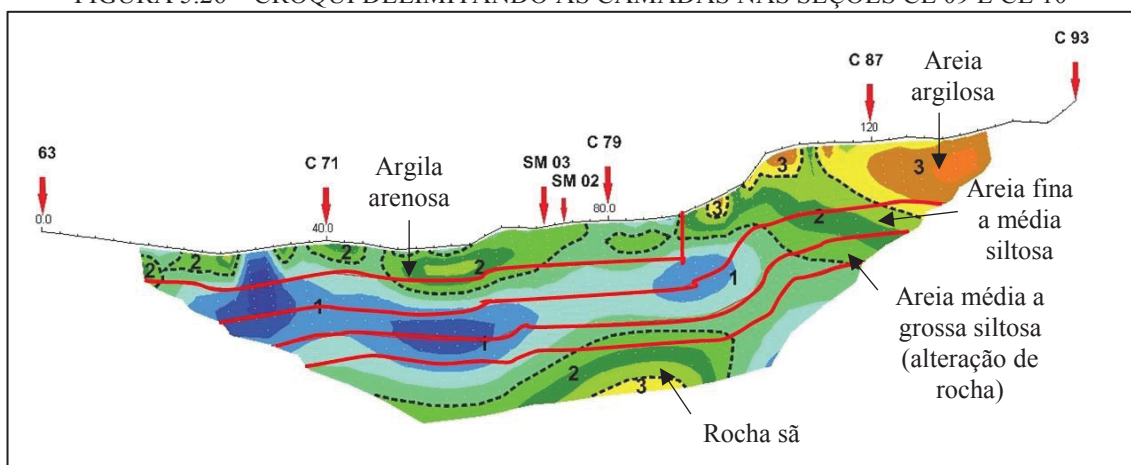
FIGURA 5.25 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 08



FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

Os caminhamentos CE 09 e CE 10 caracterizam-se por possuírem uma camada de argila arenosa do início, pé do talude, a 88,75 m do caminhamento, iniciando na superfície do terreno até a profundidade de 3,17 m. A areia argilosa inicia-se na distância 88,75 m, no sentido do caminhamento até o final, para a profundidade até 3,17 m e em todo o caminhamento elétrico para a profundidade de 3,17 m a 6,76 m. O estrato de areia fina a média siltosa, ao longo de todo o caminhamento, encontra-se da profundidade de 6,76 m a 11,54 m. Da profundidade de 11,54 m a 15,58 m, nestas seções, está a camada de Areia média a grossa siltosa (alteração de rocha) e, por fim, na profundidade de 15,58 m a 26,38 m a camada é de rocha sã (FIGURA 5.26).

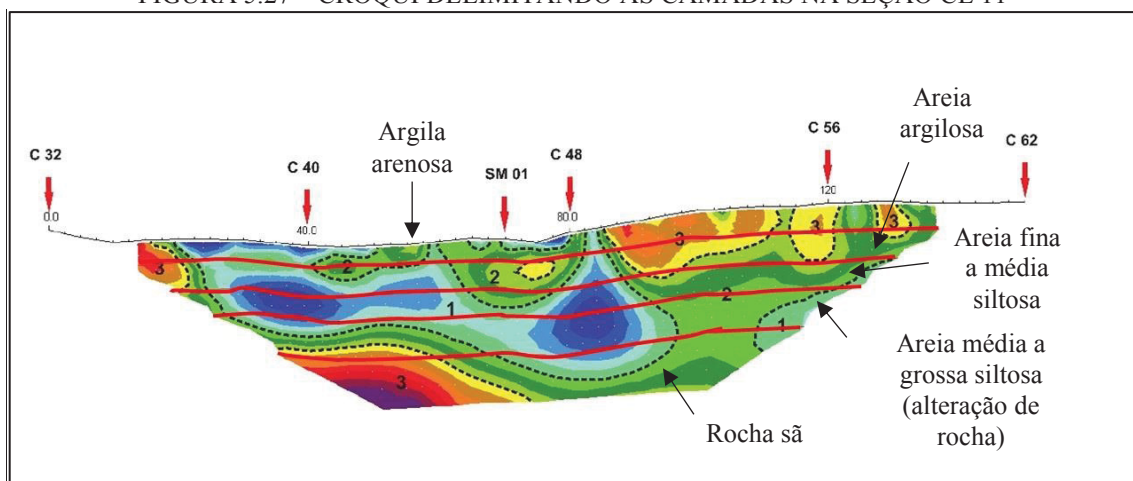
FIGURA 5.26 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NAS SEÇÕES CE 09 E CE 10



FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

No caminhamento CE 11 a camada de argila arenosa encontra-se na superfície até 3,17 m de profundidade, seguida da camada de areia argilosa até 6,76 m. Abaixo está a camada de areia fina a média siltosa até 11,54 m. Subjacente está a areia média a grossa siltosa (alteração de rocha) chegando a 15,58 m. Onde se inicia a rocha sã (FIGURA 5.27).

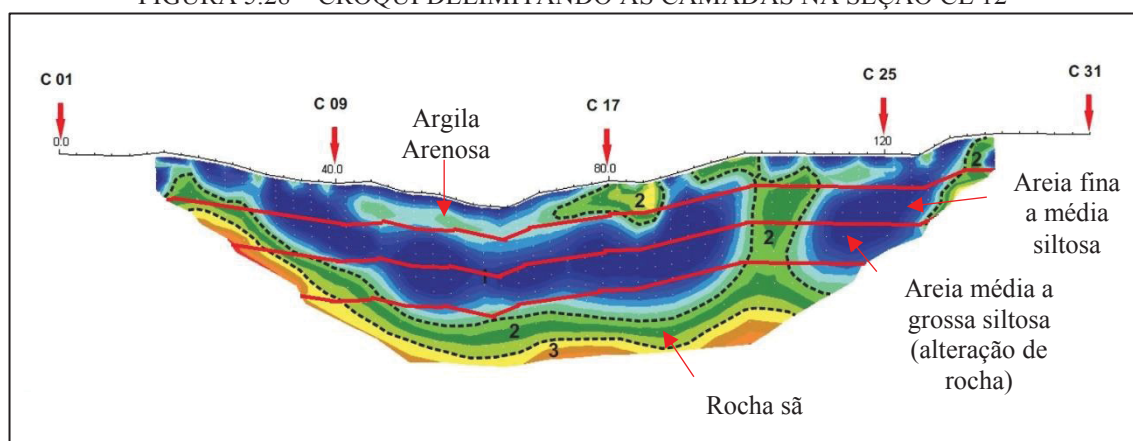
FIGURA 5.27 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 11



FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

As camadas do CE 12 correspondem a areia argilosa até 6,76 m. Seguida da camada de areia fina a média siltosa até 11,54 m. Logo abaixo está a areia média a grossa siltosa (alteração de rocha) até 15,58 m. E logo abaixo está a rocha sã (FIGURA 5.28).

FIGURA 5.28 – CROQUI DELIMITANDO AS CAMADAS NA SEÇÃO CE 12



FONTE: Adaptado de FUGRO (2016)

Após delimitar as camadas foram analisados os COV's para cada uma delas em cada uma das seções (TABELA 5.23 e TABELA 5.24). Tais tabelas mostram como a dispersão dos valores de resistividade, dentro das camadas em cada seção, é grande. Mesmo na seção CE 09

que apresentou a menor variação, 41% na camada de rocha sã, o valor é alto, também nessa seção a oscilação foi menor (22%), pois a maior variação nessa seção, foi de 63% no estrato de areia fina a média siltosa.

Já na seção CE 12 o COV teve a maior amplitude, sendo que o mínimo atingiu 91% no estrato de rocha sã e o máximo 236% no de areia fina a média siltosa. Enquanto nas sondagens mistas, a SM-03, a qual obteve a menor oscilação, foi de 13% (argila arenosa) a 50% (areia fina a média siltosa), e a SM-01, com a maior desproporção, 17% na rocha sã e 154% na areia argilosa. Apesar dos dois tipos de ensaios estarem com uma variabilidade significativa, a geofísica apresentou uma dispersão sensivelmente maior do que a observada nas sondagens mistas, diretas.

TABELA 5.23 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS SEÇÕES DA GEOFÍSICA DE CE 01 A CE 06

Camada	Descrição	COV CE 01	COV CE 02	COV CE 03	COV CE 04	COV CE 05	COV CE 06
1	Argila arenosa	136%	115%	77%	87%	113%	60%
2	Areia argilosa	79%	75%	75%	74%	91%	80%
3	Areia fina a média siltosa	54%	102%	99%	75%	98%	73%
4	Areia média a grossa siltosa (alteração de rocha)	83%	106%	97%	78%	102%	52%
5	Rocha sã	126%	63%	63%	58%	118%	99%

TABELA 5.24 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS SEÇÕES DA GEOFÍSICA DE CE 07 A CE 12

Camada	Descrição	COV CE 07	COV CE 08	COV CE 09	COV CE 10	COV CE 11	COV CE 12
1	Argila arenosa	89%		44%	46%	89%	
2	Areia argilosa	68%	64%	56%	83%	82%	115%
3	Areia fina a média siltosa	68%	90%	63%	108%	79%	263%
4	Areia média a grossa siltosa (alteração de rocha)	64%	72%	44%	48%	49%	234%
5	Rocha sã	97%	49%	41%	73%	51%	91%

Ainda analisando as camadas, pode-se ressaltar a faixa de variação do COV em cada camada (TABELA 5.25). Para a argila arenosa o COV está entre 44% e 136%, na areia argilosa de 56% a 115%, a areia fina a média siltosa de 54% a 236%, a areia média a grossa siltosa (Alteração de Rocha) de 44% a 234% e a rocha sã 41% a 126%. Sendo que os estratos

apresentaram variação de 86% na argila arenosa, 79% na areia argilosa, 98% na areia fina a média siltosa, 86% na areia média a grossa siltosa (Alteração de Rocha) e 77% na rocha sã.

Comparando esses resultados com os apresentados nas sondagens, constatou-se que os valores resultantes da geofísica são mais heterogêneos do que os das sondagens, apresentando uma maior dispersão em quatro das cinco camadas, apenas o estrato de areia argilosa apontou menor COV, 79% no ensaio geofísica e 89% nas sondagens diretas, apresentando 10% a menos. Conclui-se que, para o talude estudado, a heterogeneidade nas camadas analisadas pelas sondagens diretas dificilmente pode ser relacionada à dispersão observada nos valores de eletrorresistividade.

TABELA 5.25 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS CAMADAS PARA A GEOFÍSICA COM BASE NAS SONDAJENS DIRETAS

Camada	Descrição	COV
1	Argila arenosa	86%
2	Areia argilosa	79%
3	Areia fina a média siltosa	98%
4	Areia média a grossa siltosa (alteração de rocha)	86%
5	Rocha sã	77%

Confrontando os resultados dos coeficientes de variação, da geofísica interpretada sem as sondagens diretas com a delimitada a partir das sondagens diretas, notou-se que as seções da primeira tendem a ter uma menor variação, mesmo sendo distribuída apenas em quatro camadas enquanto a segunda está dividida em cinco. Também foi observado que as seções e as camadas variam proporcionalmente, uma vez que os dados de resistividade são os mesmos nas duas interpretações.

Através dessas interpretações da geofísica, observa-se que com o ensaio de eletrorresistividade exclusivamente, a delimitação das camadas do subsolo para fins geotécnicos torna-se difícil, dado que a resistividade dos materiais varia em faixas amplas e com sobreposições nas unidades de interesse geológico-geotécnico. Desse modo, constatou-se a importância do uso combinado de sondagens diretas para balizar a interpretação dos dados de eletrorresistividade.

6. CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões oriundas dos ensaios de laboratório e campo. Nos ensaios de laboratório são apontados os aspectos encontrados para a camada mais superficial do talude. Nos ensaios de campo todas as camadas até a rocha são abordadas.

6.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios de laboratório mostraram o comportamento distinto do solo na camada mais superficial do talude. Esta camada apresentou valor médio para massa específica real dos grãos de $2,57 \text{ g/cm}^3$ e um coeficiente de variação de 0,84% demonstrando a uniformidade desse parâmetro nos pontos amostrados.

Com relação a granulometria, os resultados dos ensaios configuram um solo bem graduado. Obteve-se argila arenosa, na camada superficial, nos três locais mais ao pé do talude e uma camada de areia argilosa nos dois pontos mais elevados de coleta de solo. Os coeficientes de variação obtidos para as duas camadas, apresentaram grandes dispersões nos percentuais de argila, silte e areia, chegando a diferença de 36%. Já a parcela referente ao pedregulho obteve menor variação, sendo de 10% entre as amostras.

As médias dos índices de consistência obtidos foram: Limite de Liquidez (LL) de 41% e Índice de Plasticidade (IP) de 14%. Através da plotagem dos resultados destes ensaios na carta de plasticidade, classificou-se o comportamento do solo na presença de água nos cinco pontos do talude em uma argila inorgânica de alta plasticidade (Amostra 01), um silte inorgânico de média compressibilidade ou silte orgânico (Amostra 02) e uma argila inorgânica de média plasticidade (Amostras 03, 04 e 05). Quanto ao Índice de Atividade encontrado, os valores obtidos foram menores do que 0,75. Desse modo a argila presente no solo é considerada inativa.

A média dos resultados de sucção matricial para os 19 pontos amostrados foi de 650 kPa. Destacando-se que 5 pontos estão com sucção próxima de 2.000 kPa e os outros 14, de 100 kPa.

6.3 ENSAIOS DE CAMPO

Para a permeabilidade do solo obteve-se média de $3,61 \times 10^{-5}$ cm/s, correspondendo a solos de argila siltosa.

Com os ensaios de campo foi possível mapear as camadas de solo que compõem o talude. Através das sondagens mistas (método de investigação direto) identificaram-se cinco camadas: (i) argila arenosa, (ii) areia argilosa, (iii) areia fina a média siltosa, com pequena percentagem de argila arenosa com mica (iv) areia média à grossa siltosa com pouca fração de argila e mica, (v) rocha sã de migmatito, composta por quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio e máficos.

Quanto à diversidade das camadas do talude, avaliadas pelo coeficiente de variação (COV) através das sondagens diretas, conclui-se que: a primeira camada (i) argila arenosa apresentou a menor dispersão, 58%, mesmo assim um valor alto. As demais camadas apresentaram valores de coeficiente de variação muito elevados, correspondendo à 89% para a (ii) a areia argilosa, 60% para a (iii) areia fina a média siltosa e 63% para a (iv) areia média a grossa siltosa (alteração de rocha).

Analisando os resultados de interpretação da geofísica sem o uso dos resultados provindos das sondagens diretas, obteve-se um coeficiente de variação (COV) de 75% para a camada correspondente a (i) argila arenosa, 68% para a (ii) areia argilosa, 86% para a (iii) areia fina a média siltosa e (iv) média à grossa, e um coeficiente de variação de 71% para a camada correspondente a (v) rocha sã de migmatito. Os valores de COV demonstram a grande variabilidade espacial da resistividade do talude, provinda do método geofísico de investigação.

Visando analisar a dispersão do solo que compõem as camadas, a partir da geofísica com base nas sondagens mistas, encontrou-se para a (i) argila arenosa coeficiente de variação (COV) de 86%, (ii) areia argilosa um COV de 79%, (iii) areia fina a média siltosa um COV de 98%, (iv) areia média a grossa siltosa (alteração de rocha) um COV de 86% e (v) rocha sã um coeficiente de variação de 77%. Os valores de resistividade dentro das camadas nas seções dos caminhamentos elétricos também configuram uma grande disparidade, onde a menor oscilação, com COV de 41%, na seção CE 03 na (v) rocha sã.

A partir dos resultados do ensaio de eletrorresistividade gerados com a geofísica (método de investigação indireto), sem ser baseado nas sondagens mistas, ficou evidente a dificuldade de delimitar as camadas exatas do subsolo, pois a resistividade nos diversos pontos tem uma grande variação. Comprovando a necessidade de obterem-se informações do solo

através de outros ensaios geotécnicos, ou seja, através de método de investigação direta, para poder embasar o resultado da geofísica. Principalmente quando analisada a geofísica pelos dados brutos, com os valores da resistividade em cada ponto medido. Sendo que após o processamento desses valores e analisados os perfis em escala cromática observa-se uma pequena tendência a uma divisão na camada de areia em duas camadas, mas que neste trabalho não foi analisada, devido à grande oscilação dos valores dos dados brutos.

Comparando-se os valores de coeficiente de variação obtidos através das sondagens diretas com os valores referentes à geofísica, constatou-se que as sondagens diretas apresentaram uma menor variabilidade, pois os coeficientes de variação encontrados foram um pouco menores do que a geofísica em quatro das cinco camadas. Apenas a camada (ii) areia argilosa obteve um coeficiente de variação maior nas sondagens diretas do que na geofísica.

Baseando-se as sondagens diretas para auxiliar a interpretação do ensaio de geofísica, obtiveram-se informações da estratigrafia do talude em uma grande área, ou seja, espacialmente, não só pontualmente como nas sondagens mistas, que demonstra a necessidade de correlação de ambos os tipos de investigação (direto e indireto) na interpretação geológico-geotécnica de taludes e áreas amplas em geral.

Outro aspecto interessante observado nas sondagens diretas e constatado na geofísica refere-se ao nível de água, que encontrava próximo da superfície, na parte inferior do talude (junto ao pé do mesmo), e em maior profundidade nas cotas superiores do talude (ao longo do vértice em direção a crista), onde também a declividade aumenta.

Essa falta de correlação entre as heterogeneidades das camadas em diferentes ensaios provavelmente é dada pela grande complexidade do comportamento do solo, onde vários fatores são envolvidos, como a presença ou não de água, o comportamento quando da presença da mesma, bem como os erros inerentes a cada técnica de investigação.

Cabe ressaltar também que a resistividade de solos e rochas é afetada por vários fatores como a composição do material, estado físico, a porosidade, falhas, fraturas e, principalmente, devido à presença de sais minerais, que saturam o meio, podendo causar reduções abruptas de resistividade. A resistividade elétrica sofre muito a interferência da presença de água, o que não foi analisado nesse trabalho, esse também é um fator que contribui para a grande variação dos COV's.

A análise da variação das propriedades do solo dentro de uma mesma camada e no talude como um todo ajudam a engenharia geotécnica nos estudos probabilísticos, onde entra-se com valores de dispersão, levando a uma análise mais detalhada, onde consegue-se simular

as diferentes situações na qual o solo estudado pode se encontrar. Pois a estabilidade de um talude depende de muitos fatores desde a origem dos solos a situação climática do local.

6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho foi possível analisar coeficientes de variação de ensaios em apenas um talude. Analisar os COV's, principalmente da geofísica nas camadas de outros taludes, com o mesmo tipo de formação rochosa e fazer comparações, tornaria o trabalho ainda mais relevante.

Os dados extraídos em campo no ensaio de resistividade elétrica, nesse trabalho, foram modelados no *software* Res2DInv, o qual possui um algoritmo base para inversão dos dados: o *Smoothness-Constrained Least-Squares Method* (Método de Mínimos Quadrados com Vínculo de Suavidade). Assim sugere-se:

- Analisar os dados brutos através de outros modelos e compará-los. Como por exemplo pelo método geoestatístico, modelando os dados georreferenciados no programa ArcGIS;
- Uma análise mais detalhada dos coeficientes de variação em cada camada do talude, buscando interpretar a influência da presença ou não da água.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, B. **O emprego do permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura**. 67 f. Tese (Doutorado em Ciência de Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 1586**: Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. West Conshohocken, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 5298**: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. West Conshohocken, 2003.

ANJOS, A. DOS; R., G. S.; CAMARINHA FILHO, J. A. Estatística II. Departamento de Estatística, UFPR, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15935**: Investigações ambientais — Aplicação de métodos geofísicos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16097**: Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457**: Amostras de solos - preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6484**: Solo - Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502**: Rochas e solos – terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7117**: Solo — Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016b.

BLIGHT, G. E. Origin and Formation of residual soils. In: **Mechanics of Residual Soils**. 2^a ed, Balkena, p.1-392, 2012.

BRAGA, A. C. de O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem**

metodológica e prática. 123 f. Tese (Livre Docência em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

CALLE, J. A. C. **Análise de Ruptura de talude em solo não saturado.** 156f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2000.

CHANDLER, R. J.; HARWOOD, A. H.; SKINNER, P. J. Sample disturbance in London Clay. **Geotechnique**, v. 42, n. 4, p. 577–585, 1992.

CHIOSSI, N. J. **Geologia Aplicada à Engenharia.** 2ª ed. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1979.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRA DE IGUAPE E LITORAL SUL (CBH-RB). **Caderno de informações sobre a Bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos nº 11.** 2011.

CORREA, S. **Probabilidade e estatística.** Belo Horizonte: PUC Minas Virtuais, 2003.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** 6ª ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DELGADO, A. K. C. **Influência da sucção no comportamento de um perfil de solo tropical compactado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2002

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Especificação Técnica:** Sondagens. São Paulo, SP. 2006.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRA-ESTRUTURA. **IN 07:** Instrução normativa para execução de sondagem rotativa. Florianópolis, SC. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO MATO GROSSO (DNER). **Método de Ensaio:** Solos – determinação da densidade real. MT. 1994.

DYAMIS ENGENHARIA GEOTÉCNICA S/C LTDA (DEG). Relatório de Sondagens. São Paulo, SP. 2011.

DOURADO, J. C.; KIANG, C. H.; MALAGUTTI FILHO, W.; BRAGA, A. C. D. O. Utilização de radar de penetração no solo na detecção de estruturas artificiais rasas no solo. **Geociências**, São Paulo, v. 22, n. Especial, p. 75–81, 2003.

DUNCAN, J. M. Factors of Safety and Reliability. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 4, p. 307–316, 2000.

EL-RAMLY, H. **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice.** 391p. Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering), Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta, Canada, 2001.

FALEIROS, F. M. **Evolução de Terrenos Tectono-Metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR).** 306 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FALEIROS, F. M.; PAVAN, M.; FERRARI, V. C. **Mapa Geológico da Folha Eldorado Paulista**, escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil - PGB, CPRM, São Paulo, 2013.

FIORI, A. P. Geologia Regional – Relatório Interno de Visitas de Campo. Projeto 08. Recurso para desenvolvimento Tecnológico – RDT. Curitiba, PR. 2015

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 6, p. 1026–1026, 1994.

FLORES, E. A. F. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo**. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FUGRO IN SITU GEOTECNIA LTDA. **Relatório: Ensaios de Campo e Instalação de Instrumentação RGB-06-GRE-01**. Curitiba, Paraná, 2016.

GANDOLFO, O. C. B. Um Estudo do Imageamento Geométrico na Investigação Rasa, 2007.

GANDOLFO, O. C. B.; ELIS, V. R.; SANCEVERO, S. S. **A geofísica como ferramenta na investigação do meio físico: aplicações em meio ambiente, engenharia e na prospecção de petróleo**. Reunião Anual da SBPC, 2008.

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

GEOTOMO. **RES2DINV ver. 3.59 - Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method Wenner (α, β, γ), dipole-dipole, inline pole-pole, pole-dipole, equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole, Wenner-Schlumberger, gradient and non-conventional arrays**. Penang, Malasia, 2010.

GERSCOVICH, D. M. **Estabilidade de Taludes**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. 2ª ed. São Paulo, SP: Edgard Blücher LTDA, 1984.

HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L. **Fundações: teoria e prática**. 2ª ed. São Paulo, 1998.

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers and Geosciences**, v. 32, n. 9, p. 1283–1298, 2006.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The Landslide Handbook — A Guide to Understanding Landslides**. 2008.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de Exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KRAHN, J.; FREDLUND, D. G. On total, matric and osmotic suction. In: **The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics**, v. 114, n. 5, p. 339–348, 1971.

MARINHO, F. A. M. Investigação Geotécnica Para Quê? Conferência brasileira sobre estabilidade de encostas, 4 **Anais...** Salvador:ABMS v. 2, 2005.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método de papel filtro. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 10. **Anais...** Foz do Iguaçu:ABMS v. 2. p. 515-522, 1994.

MARINHO, F. A. M. **Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados**. 200 f. Texto (Livre Docência em Geomecânica) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MAYNE, P. W. In-Situ Test Calibrations for Evaluating Soil Parameters. Characterization and engineering properties of natural soils, v. 3, p. 1–56, 2006.

MAYNE, P. W.; CHRISTOPHER, B. R.; DEJONG, J. Subsurface Investigations. Security, n. 132031, p. 332, 2002.

MORAIS, C. M. **Estatística Descritiva e Inferência Estatística**. Biblioteca Digital Instituto Politécnico de Bragança, p. 4–26, 2005.

PENHA, H. M. Movimentos de massa. In: **Manual de encostas**. 2ª ed, p.1–26. Rio de Janeiro: GEORIO, 2000

PHOON, K.; NADIM, F.; UZIELLI, M.; LACASSE, S. Soil variability analysis for geotechnical practice. Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, p. 1–103, 2006.

PHOON, K.-K.; KULHAWY, F. H. Characterization of geotechnical variability. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 36, n. 4, p. 612–624, 1999a.

PHOON, K.-K.; KULHAWY, F. H. Evaluation of geotechnical property variability. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 36, n. 4, p. 625–639, 1999b.

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3a ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2006.

PRETTO, J. H. F. **Análise de tensão x deformação de uma encosta natural estudo de caso: Morro do Boi – Balneário Camboriú/SC**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

REYNOLDS, J. M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. 1998.

SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 173–193, 2005.

SCHILLING, G. H. **Instrumentação e Análise dos Movimentos no Escorregamento da Encosta do Soberbo**. 82f. Tese (Doutorado em Ciência de Engenharia Civil) – Instituto Alberto

Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

SCHNAID, F. **Ensaio de Campo e Suas Aplicações à Engenharia de Fundações**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SCHNAID, F. **In Situ Testing in Geomechanics**: The main tests. New York, USA: Taylor & Francis, 2009.

SOILMOISTURE. **Operating Instructions**: Model 2800K1 Guelph Permeameter. 2010.

SOUZA, L. A. P. DE; GANDOLFO, O. C. B. Métodos Geofísicos em Geotecnia e Geologia Ambiental. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 2, p. 9–28, 2012.

SUZUKI, S. **Propriedades Geomecânicas de Alguns Solos Residuais e Coluviais ao Longo do Oleoduto Curitiba-Paranaguá**. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal Rio de Janeiro, 2004.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**, 3ª ed. 1996.

VAZ, L. F. Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais. **Solos e Rochas**, v. 2, p. 117–136, 1996.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (WSDOT). **Geotechnical Design Manual**. 2015.

XAVIER, F. da F. Geofísica Elétrica aplicada a Geotecnia para investigação de estabilidade de taludes. In: Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 7, 2010, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABMS, 2010. vol. 2, p. 1–9.

[illegible]

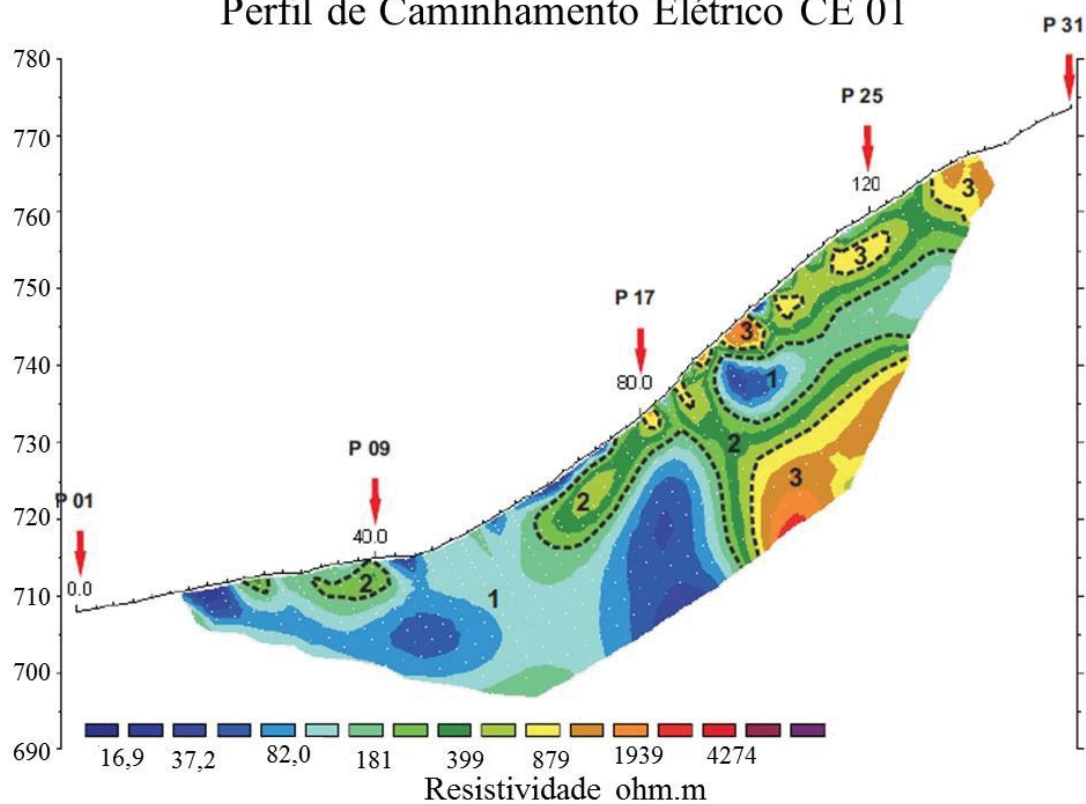
[illegible]

Cota (m)	Colpas / 30 cm	Descrição do Material	Classificação Geológica	Coerência	Grau de Alteração	Preenchimento	Rugosidade	Discontinuidade	Índice de Resistência A Penetração (N)	Folhas por metro (Profundidade)	Índice de Qualidade da Rocha NQD
726		0,00 m to 1,00 m - Argila silícea com restos vegetais, marrom.	COLUMIO								
725	3 4	1,00 m to 3,00 m - Argila silícea com poucos restos vegetais, mole, marrom avermelhado.									
724	3 5										
723	4 4	3,00 m to 4,00 m - Argila silícea com pouca fração de areia média e grânulos milimétricos de quartzo, mole, marrom avermelhado.									
722	6 10	4,00 m to 8,00 m - Argila arenosa com grânulos milimétricos de quartzo, média a dura, cinza variegado. Apresenta estrutura reliquiar e caulínização.	SOLO SAPROLÍTICO								
721	12 15										
720	14 19										
719	19 29										
718	25 30	8,00 m to 10,33 m - Areia fina a média silícea com grânulos milimétricos de quartzo, muito compacta, cinza variegado. Apresenta estruturas reliquias e caulínização.									
717	22 32										
716	44 4518										
715											
714											
713											
712											
711											
710											
709											
708											
707											
706											
705											
704											
703											
702											
25											
24											
23											
22											
21											
20											
19											
18											
17											
16											
15											
14											
13											
12											
11											
10											
9											
8											
7											
6											
5											
4											
3											
2											
1											
0											

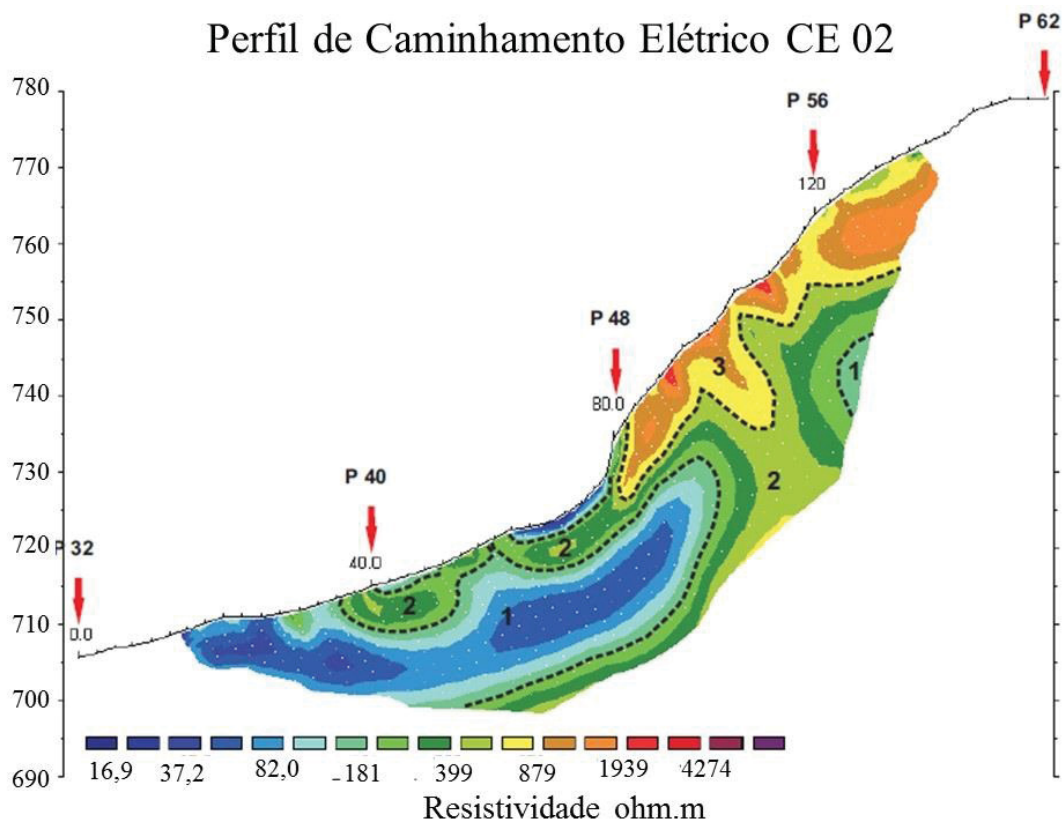
DIÂMETRO DA SONDAGEM		ÍNDICE DE RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO (N)		FOLHAS POR METRO (PROFUNDIDADE)		ÍNDICE DE QUALIDADE DA ROCHA NQD	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"	
100 - 3"		100 - 3"		100 - 3"			

ANEXO B – GEOFÍSICA

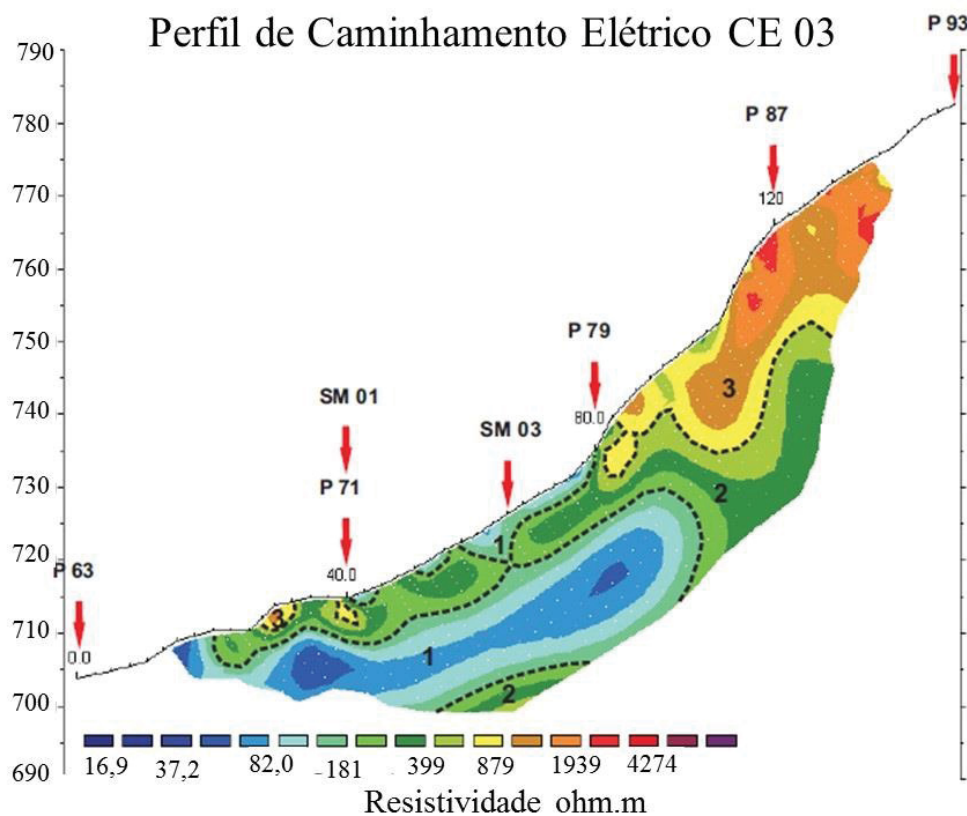
Perfil de Caminhamento Elétrico CE 01



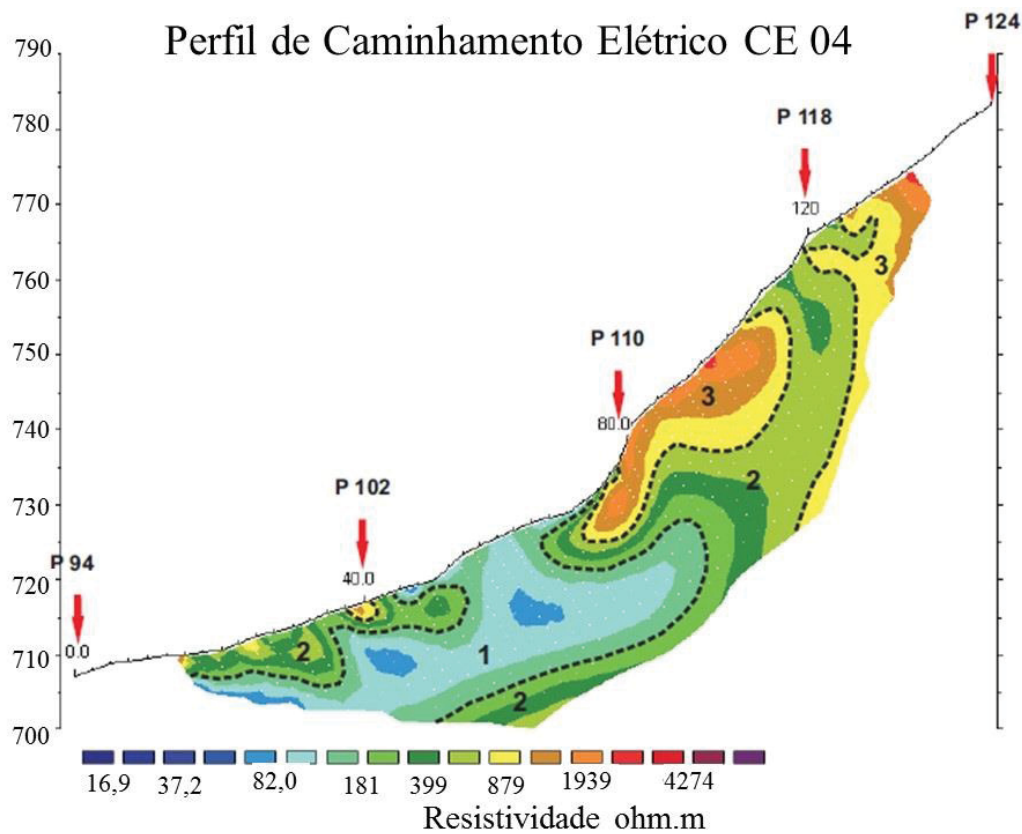
Perfil de Caminhamento Elétrico CE 02



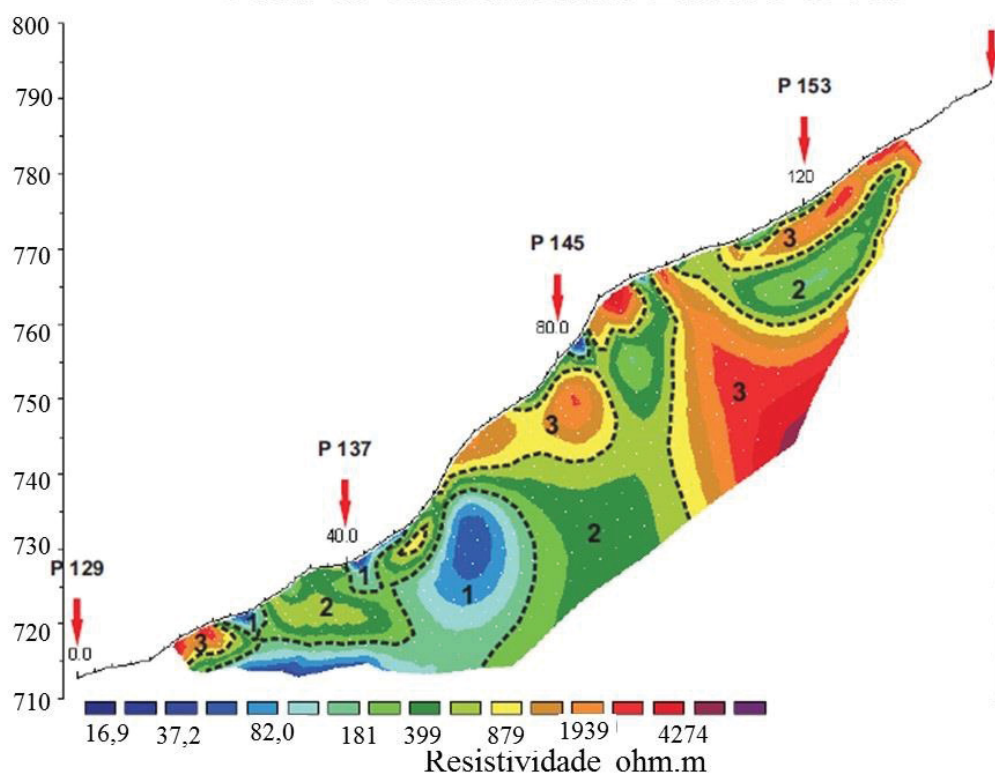
Perfil de Caminhamento Elétrico CE 03



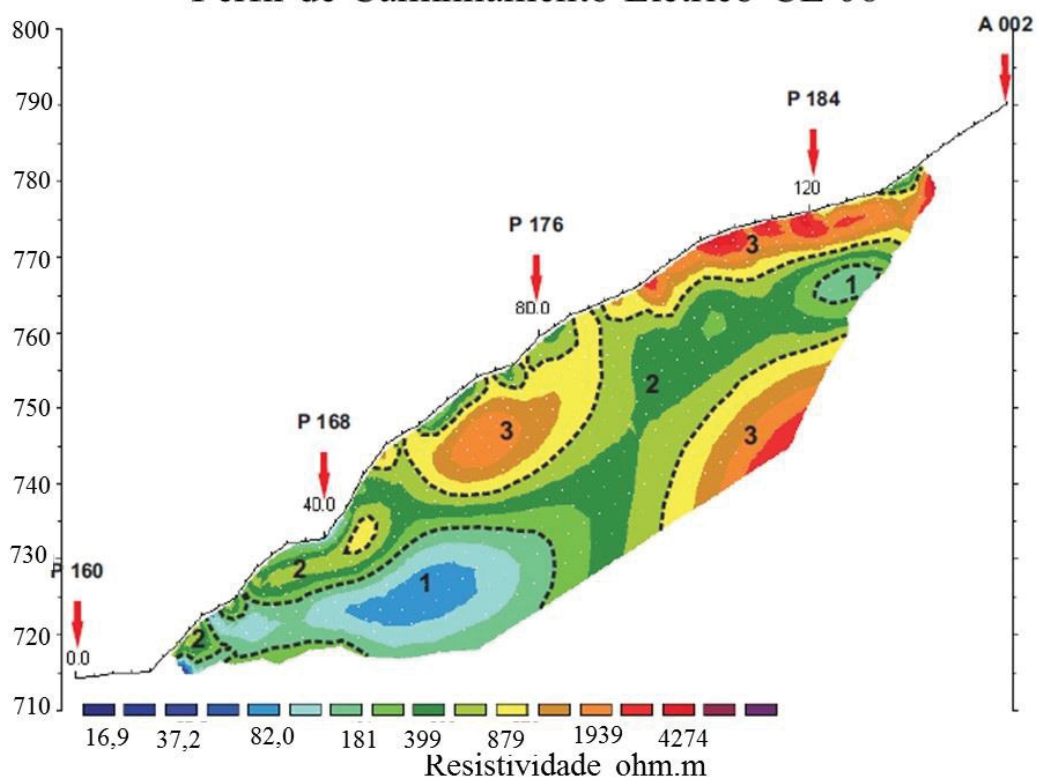
Perfil de Caminhamento Elétrico CE 04



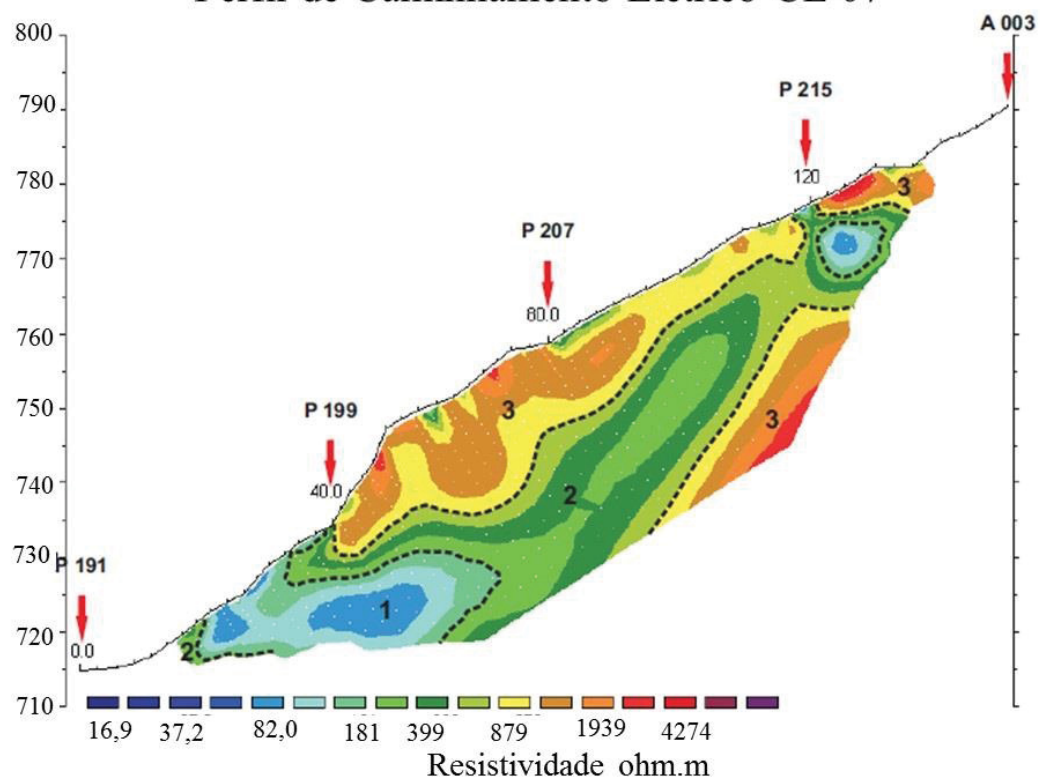
Perfil de Caminhamento Elétrico CE 05



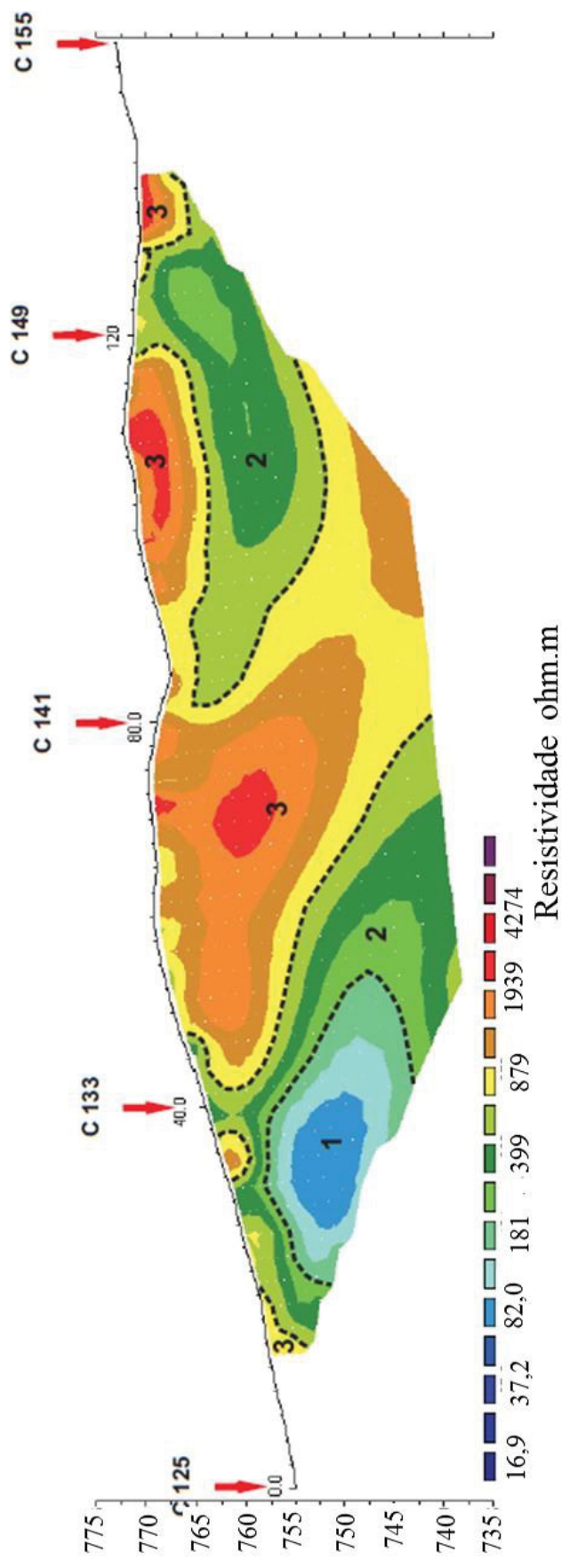
Perfil de Caminhamento Elétrico CE 06



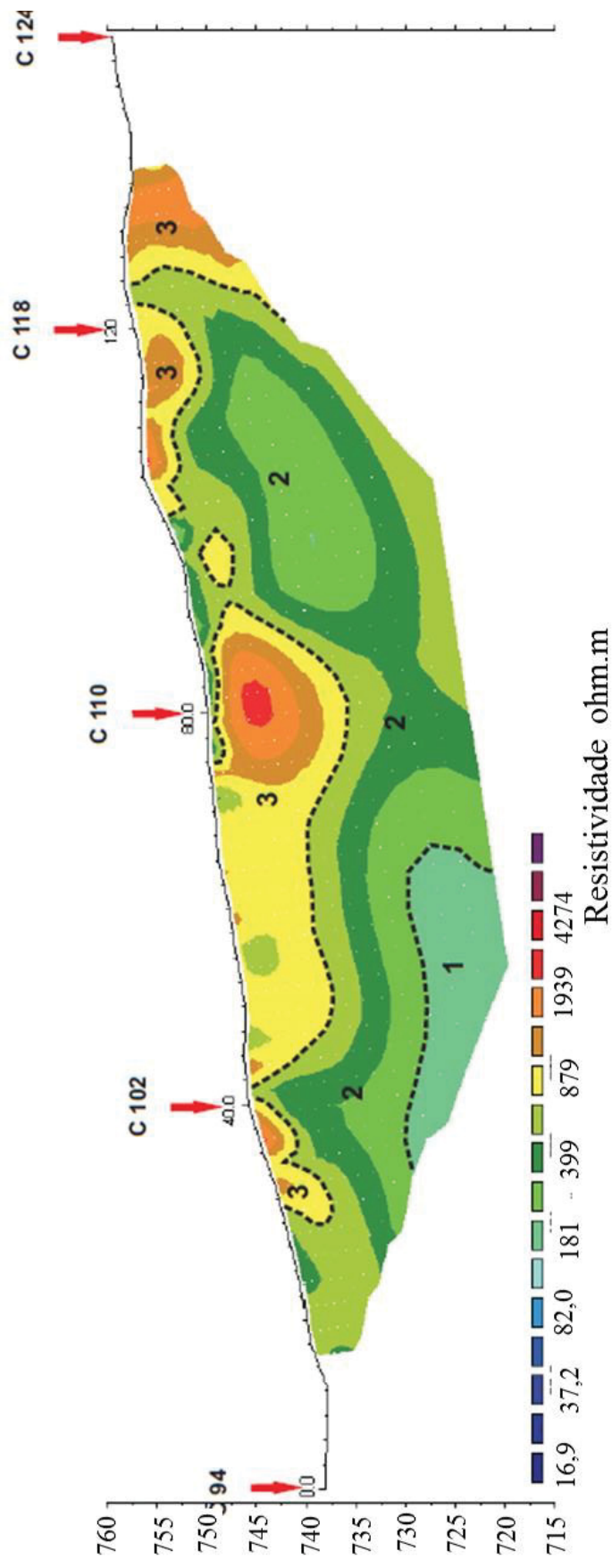
Perfil de Caminhamento Elétrico CE 07



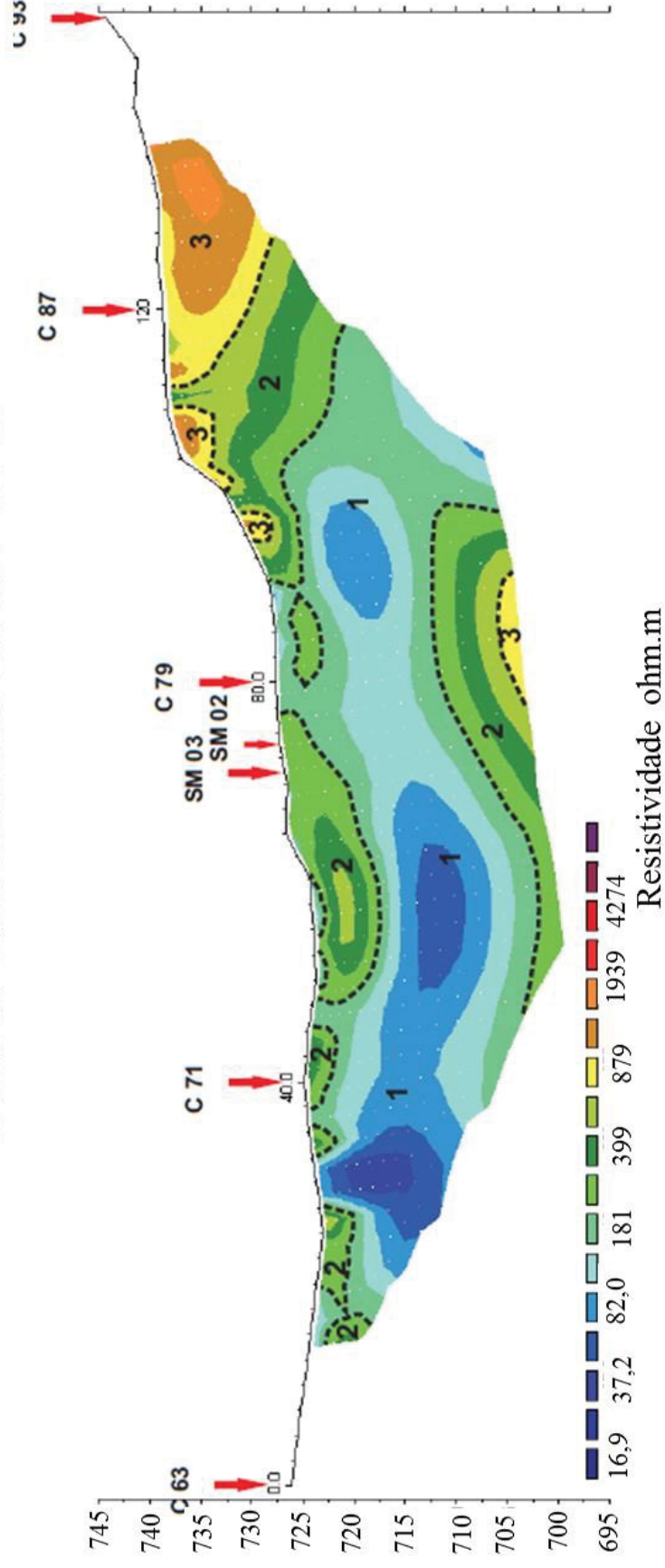
Perfil de Caminhamento Elétrico CE 08



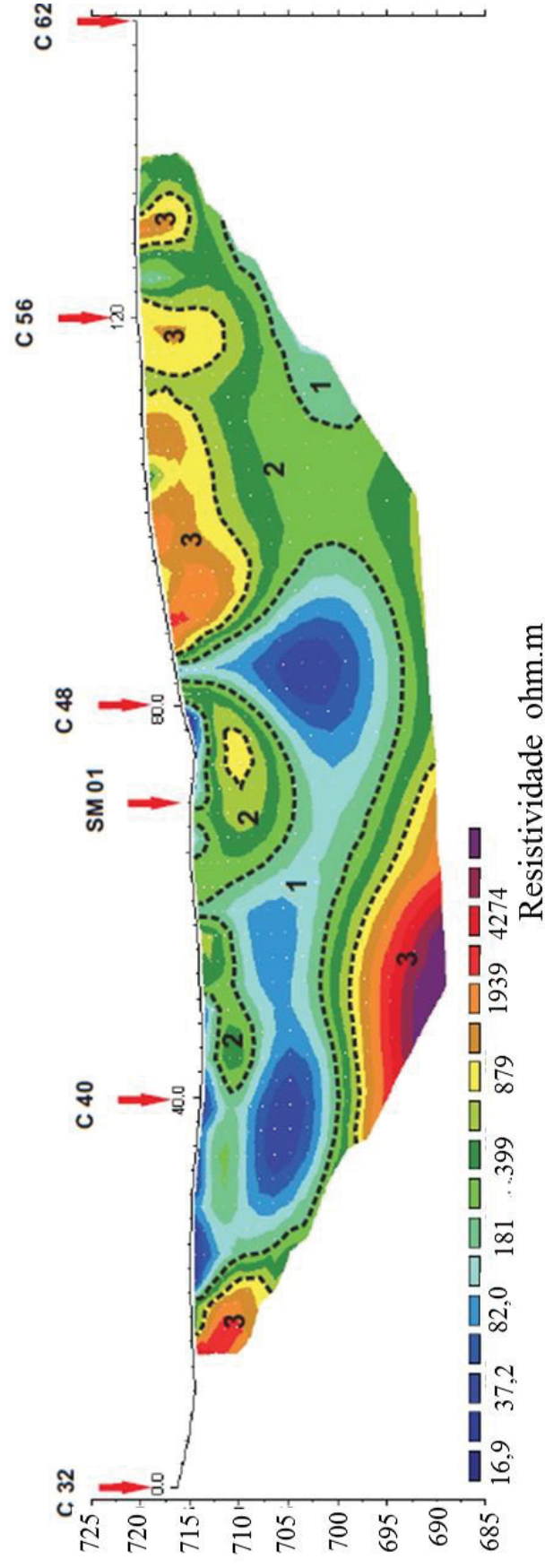
Perfil de Caminhamento Elétrico CE 09



Perfil de Caminhamento Elétrico CE 10



Perfil de Caminhamento Elétrico CE 11



Perfil de Caminhamento Elétrico CE 12

