

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA MATEMÁTICA E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**Renato Cosme dos Santos Pita**

**APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE CAMPO E  
LABORATORIAIS PARA A DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE  
DO SOLO EM ENCOSTA COM DESLIZAMENTO RASO, EM NOVA  
FRIBURGO-RJ.**

**Trabalho Final de Curso  
(Geologia)**

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2014



UFRJ

**Renato Cosme dos Santos Pita**

**APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE CAMPO E  
LABORATORIAIS PARA A DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DO SOLO  
EM ENCOSTA COM DESLIZAMENTO RASO, EM NOVA FRIBURGO-RJ.**

Trabalho Final de Curso de Graduação em  
Geologia do Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro –  
UFRJ, apresentado como requisito  
necessário para obtenção do grau de  
Geólogo.

Orientador(es):

Gerson Cardoso da Silva Jr.

Roberta Pereira da Silva

Rio de Janeiro

Julho de 2014

PITA, Renato Cosme dos Santos.

**Aplicação e Avaliação de metodologias de campo e laboratoriais para a determinação da permeabilidade em encosta com deslizamento raso, em Nova Friburgo-RJ**

/ Renato Cosme dos Santos Pita - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2014.

83 p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2014.

Orientador(es): Gerson Cardoso da Silva Jr; Roberta Pereira da Silva. 1. Geologia. 2. Setor da Graduação – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Silva Jr., Gerson Cardoso da; Silva, Roberta Pereira da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Título.

Renato Cosme dos Santos Pita

APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE CAMPO E LABORATORIAIS  
PARA A DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DO SOLO EM ENCOSTA COM  
DESLIZAMENTO RASO, EM NOVA FRIBURGO-RJ.

Trabalho Final de Curso de Graduação em  
Geologia do Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro –  
UFRJ, apresentado como requisito  
necessário para obtenção do grau de  
Geólogo.

Orientador(es):

Gerson Cardoso da Silva Jr.  
Roberta Pereira da Silva

Aprovada em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

Por:

---

Orientador: Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr. (UFRJ)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Kátia Leite Mansur (UFRJ)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Helena Polivanov (UFRJ)

Ao meu eterno e amado irmão Rafael, meu maior torcedor e incentivador.

## Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por tudo que faz na minha vida e por me possibilitar chegar até aqui.

Aos meus pais, por todo o amor, a dedicação e por terem me dado todas as condições para chegar até aqui e cumprir mais essa etapa importante na minha vida.

Ao meu orientador Gerson Cardoso, pela oportunidade, por todo o apoio, amizade e disponibilidade para ensinar e fazer o melhor em todas as etapas do trabalho.

À minha co-orientadora e companheira de pesquisa Roberta Pereira, além de toda a equipe do laboratório Geoheco, por toda a paciência e disponibilidade ao longo do trabalho. Sem essa parceria seria muito mais difícil de atingir as metas que conseguimos.

Aos técnicos do Laboratório de Caracterização da Coppe Carlinhos e Luizão, pela amizade, disponibilidade e pela cooperação inestimável durante todos os ensaios realizados e, também, em todos os momentos de convivência que tivemos.

Aos professores Leonardo Becker, Ana Paula, Manuel e Ana Luiza pela cooperação essencial em etapas importantes do trabalho de análise granulométrica das amostras.

Ao PIBIC-CNPq, pela concessão da bolsa de iniciação científica que forneceu suporte e contribuiu muito para a realização deste trabalho.

Aos projetos Pensa Rio e INCT-REAGEO, financiados pela FAPERJ e pelo CNPq (coordenados pela Prof.<sup>a</sup> Ana Luiza Coelho Netto, juntamente com outros pesquisadores), que forneceram suporte financeiro para os trabalhos de campo e para toda a realização da pesquisa.

A todos os meus familiares, em especial minha prima Andréa, pela torcida e pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Aos meus amigos Felipe, Maykon, João e Valentim, por toda amizade e apoio ao longo de tantos anos.

A todos os meus colegas e amigos da turma de 2009, pelos momentos inesquecíveis ao longo desses 5 anos de caminhada geológica.

A todos os companheiros de equipe do laboratório de Hidrogeologia, pela amizade, aprendizado e por todos os momentos de apoio durante a convivência no laboratório.

A todos os meus companheiros e amigos da equipe representativa de futebol da UFRJ, que nos momentos convivência pessoal e em torno do esporte, foram grande força e incentivo para continuar na caminhada.

E a todos os professores de graduação em Geologia da UFRJ, por toda a dedicação e a contribuição ao longo de todo o curso.

## Resumo

PITA, Renato Cosme dos Santos. **Aplicação e Avaliação de Metodologias de Campo e Laboratoriais para Determinação da Permeabilidade do Solo em Encosta com Deslizamento Raso, em Nova Friburgo-RJ.** 2014. 83 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Os desastres naturais tornam-se cada vez mais frequentes e causam danos sociais e econômicos irreparáveis em todo o planeta. Sob essa perspectiva, é necessário estudar suas causas e sua dinâmica para buscar mitigar os seus danos. Dessa forma, foi escolhida uma encosta representativa no município de Nova Friburgo, afetada por um deslizamento translacional raso no evento catastrófico de chuvas de janeiro de 2011 para o estudo das propriedades hidrodinâmicas dos materiais geológicos que a compõem. A etapa de campo consistiu na retirada de amostras em cinco posições diferentes da encosta, sendo realizados ali ensaios de permeabilidade *in situ*: na zona saturada e na zona não saturada. Em laboratório, realizou-se a caracterização granulométrica das amostras, pela metodologia com e sem defloculante. Com esses dados calculou-se através de métodos empíricos a condutividade hidráulica de cada uma das amostras. Verificou-se que existem duas camadas de solo distintas em subsuperfície: uma mais argilosa, nos primeiros dois a três metros, sofrendo processo de laterização, classificada como um colúvio, e uma mais arenosa, é um saprolito derivado da rocha matriz granítica. Com os ensaios de campo, obteve-se uma condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-4}$  cm/s para o solo coluvionar e de  $10^{-5}$  cm/s para o solo saprolítico, indicando uma possível descontinuidade hidráulica entre essas camadas. Por fim, compararam-se os resultados com os dos métodos empíricos, calculados com os dados da granulometria com e sem defloculante. Para o solo saprolítico, os métodos empíricos apresentaram resultados satisfatórios quando usou-se a granulometria com defloculante para os cálculos. Quanto aos resultados sem uso de defloculante, a condutividade hidráulica foi superestimada. O método mais adequado na previsão da condutividade hidráulica foi, na opinião do autor, o método de Hazen, seguido de Breyer e, por último, Kozeny-Carman, para os solos saprolíticos. Já nos colúvios, devido ao alto conteúdo de argila e silte, só foi possível calcular a condutividade hidráulica através da granulometria sem defloculante. O método que mais se aproximou dos resultados de campo foi o de Kozeny-Carman, seguido de Breyer e, por último Hazen. A estimativa da condutividade hidráulica dos materiais que compõem a encosta estudada permitiu elaborar um modelo geológico hidrogeológico que coadjuvou as análises do processo de instabilização desta e de outras encostas instáveis na região.

Palavras-chave: condutividade hidráulica; desastres naturais; deslizamentos de encostas; métodos empíricos para determinar permeabilidade; Nova Friburgo-RJ.

## Abstract

PITA, Renato Cosme dos Santos. **Implementation and evaluation of field and laboratory methods for the determination of soil permeability in a slope with a shallow landslide, in Nova Friburgo-RJ.** 2014. 83 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The natural disasters have become more frequent nowadays, causing a lot of social and economic damage all over the planet. From this perspective, it is necessary to study the causes and dynamics of these events, to seek their mitigation. Thus, a representative slope in Nova Friburgo, Rio de Janeiro state, affected by a shallow translational landslide during the catastrophic rainfall events of January 2011, was selected for the study of its geological materials hydrodynamic properties. The field campaigns consisted of taking samples at five different positions of the slope, where *in situ* permeability tests were performed in the saturated and unsaturated zone, to determine the hydraulic conductivity (or relative permeability) of the slope materials. In the laboratory, the particle size characterization of samples with and without use of dispersant was carried out. Empirical methods were used to determine the hydraulic conductivity of each sample. Results show that there are two distinct layers in the slope: more clayey up to two to three meters depth, suffering from laterization process, classified as a colluvium; and a more sandy material, which is a derivative of saprolite granitic rock matrix, down below. In field tests, a hydraulic conductivity of about  $10^{-4}$  cm/s was obtained for the colluvium and  $10^{-5}$  cm/s for the saprolite, indicating a possible hydraulic discontinuity between these layers. Finally, the results were compared with the empirical methods, calculated from the particle size data with and without the use of dispersant. For the saprolite, empirical methods presented satisfactory results when used with the particle dispersant for calculations. As for the results without the use of dispersant, the hydraulic conductivity was overestimated. The most appropriate method for the estimation of soil hydraulic conductivity in saprolite was, in the author's opinion, the method of Hazen, followed by Breyer and, finally, Kozeny-Carman method. In colluvium, due to the high clay content, it was possible to do the calculations from the data only without the use of dispersant. The results were also satisfactory and the more effective method was the Kozeny-Carman, followed by Breyer and finally Hazen. The estimated hydraulic conductivity of the slope materials studied allowed elaboration of a hydrogeological and geological model to assess the instability of this and other unstable slopes in the region.

Key-Words: hydraulic conductivity; natural disasters; landslides; empirical methods for determination of permeability, Nova Friburgo-RJ.



## Lista de figuras

- Figura 1: Visão panorâmica mostrando os vários escorregamentos que ocorreram nas montanhas da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, no dia 12 de janeiro de 2011. A maioria dos deslizamentos foi do tipo translacional raso. Fonte: Avelar *et al.* (2011). ..... 4
- Figura 2: Mapa de localização da área de estudo no município de Nova Friburgo (distrito de Campo do Coelho). ..... 5
- Figura 3: Acesso à área de estudo a partir da cidade do Rio de Janeiro pela BR-116 (Rio-Teresópolis) até Teresópolis e RJ-130 até Campo do Coelho (em azul). Uma rota alternativa (em cinza) pode ser pela BR-101 até Itaboraí, seguindo depois até Nova Friburgo para acessar a RJ-130 até Campo do Coelho. Fonte: Google Maps... 6
- Figura 4: Localização da encosta piloto, próxima à estrada RJ-130 (em amarelo). Fonte: Google Earth. .... 8
- Figura 5: Localização dos orógenos do Sistema Orogênico Mantiqueira no contexto do Gondwana Ocidental. 1- Bacias fanerozoicas. 2- Coberturas cratônicas. 3- Orógenos neoproterozoicos (B- Brasília, A- Araçuaí, R- Ribeira, ZI- Zona de Interferência, AP- Apiaí, DF- Dom Feliciano). 4- Crátons neoproterozoicos (CSF- São Francisco, LA- Luis Alves, RP- Rio de La Plata). Na África localizam-se as faixas neoproterozoicas do Congo Ocidental (CO), Kaoko (K), Damara (D), Gariep (G) e Saldania (S), relacionadas aos crátons do Congo e Kalahari). Fonte: Heilbron *et al.* (2004, p. 206). ..... 10
- Figura 6: Mapa tectônico do setor central da faixa Ribeira, mostrando os terrenos tectono-estratigráficos – Legenda: 1- riftes Cenozoicos; 2- rochas alcalinas do Cretáceo e Terciário; orógeno Brasília (3-4): 3- nappes inferiores, 4- nappes superiores; 5- embasamento do CSF e domínio autóctone; 6- supergrupo São Francisco; 7- metassedimentos do domínio autóctone; Orógeno Ribeira (8-13): 8- domínio Andrelândia, 9- domínio Juiz de Fora do Terreno Ocidental, 10- klippe Paraíba do Sul, 11- terreno oriental, 12- granitoides do arco magmático Rio Negro, 13- terreno Cabo Frio; orógeno Apiaí/Paranapiacaba (14-15): 14- terrenos São Roque e Açunguí, 15- terreno Embu. Fonte: Heilbron *et al.* (2004, p. 212). ..... 10
- Figura 7: Compartimentação tectônica da Faixa Ribeira entre a borda do Cráton do São Francisco e o litoral fluminense, passando pela Região Serrana Fluminense (modificado de Heilbron *et al.*, 2004). 1- Embasamento Paleoproterozoico; 2- Cobertura metassedimentar pós-1,8 Ga; 3 – Sequências metassedimentares à volta do arco magmático, IT, Grupo Italva; BJ, Grupo Bom Jesus do Itabapoana; SF, Grupo São Fidélis; 4 – Complexo Rio Negro, ortognaisses do Arco Mágmató; 5 – Leucognaisses graníticos da Suíte Cordeiro; 6 – Gnaisses metaluminosos da Suíte Serra dos Órgãos; 7 – Granitos da Suíte Nova Friburgo. Fonte: Tupinambá *et al.* (2012, p. 143). ..... 11
- Figura 8: Visão panorâmica da encosta-alvo, com demarcação da cicatriz de deslizamento em vermelho e dos blocos de granito em preto. Alguns blocos foram exumados no evento de 2011. Fonte da foto: Silva (2014). ..... 12
- Figura 9: Bacia do Córrego do Roncador, Nova Friburgo-RJ. .... 14
- Figura 10: Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica do Estado do Rio de Janeiro. (Fonte: Projeto RJ-CPRM, 2001). ..... 16

Figura 11: A) Execução da sondagem SPT. B) Início da sondagem rotativa. C) Retirada das amostras do furo SPT com amostrador padrão. Fonte das fotos: Roberta Pereira da Silva. ....	19
Figura 12: A) Trado mecânico modelo MB2-Honda. B) Operação do trado para execução da sondagem. Fonte das fotos: Roberta Pereira da Silva. ....	20
Figura 13: Mapa de localização das sondagens ao longo da encosta com a respectiva nomenclatura dos poços. Fonte: Modificado de Silva, (2014). ....	20
Figura 14: Esquema de permeâmetro instalado no solo para a realização do ensaio de condutividade hidráulica in situ e suas propriedades. ....	22
Figura 15: A) Instalação do permeâmetro feito com tubo de PVC de 32 mm, ranhurado e revestido de tela nos últimos 30 cm. B) Realização do ensaio de permeabilidade in situ: criação do bulbo de saturação com o derramamento de água no poço. C) Medição da queda do nível d'água no poço durante um determinado intervalo de tempo para a obtenção da condutividade hidráulica. ....	23
Figura 16: Representação esquemática da realização do Slug Test. Fonte: Modificado de In Situ Europe (2014). ....	25
Figura 17: A) Amostras de solo secas ao ar no laboratório. B) Amostras nos picnômetros, sendo resfriadas para a realização do ensaio de densidade real dos grãos. C) Provetas no tanque de sedimentação para o início do ensaio. D) Processo de agitação da amostra durante o ensaio de sedimentação. E) Procedimento de leitura do valor indicado pelo densímetro durante ensaio de sedimentação. F) Densímetro dentro da proveta pronto para leitura. ....	28
Figura 18: Parâmetros medidos durante o Slug Test no Poço MNA. O retângulo preto destaca a fase de recuperação do nível após a inserção do slug e que foi usada para o cálculo da condutividade hidráulica. ....	35
Figura 19: Gráfico do rebaixamento do nível d'água em relação ao tempo, do poço MNA. Solução feita pelo método de Hvorslev. ....	36
Figura 20: Gráfico do rebaixamento do nível d'água em relação ao tempo, do poço MNA. Solução feita pelo método de Hvorslev. ....	36
Figura 21: Localização dos pontos de instalação dos permeâmetros na encosta. ....	37
Figura 22: Perfis Esquemáticos de instalação dos permeâmetros ao longo da encosta, ilustrando a profundidade de instalação e o tipo de solo no local. A) Perfil Esquemático da 1ª posição; B) 2ª posição; C) 3ª posição e D) 4ª posição. ....	38
Figura 23: Gráfico das curvas granulométricas representativas da 1ª posição de sondagem (ST-01), obtidas pelo método de ensaio com defloculante. ....	42
Figura 24: Gráfico das curvas granulométricas representativas da 1ª posição de sondagem (ST-01), obtidas pelo método de ensaio sem defloculante. ....	43
Figura 25: Gráfico da distribuição de cada fração granulométrica em relação à profundidade das amostras que foram analisadas para o furo da 1ª Posição. ....	44
Figura 26: Gráfico da distribuição de cada fração granulométrica em relação à profundidade das amostras para o furo da 2ª Posição. ....	44
Figura 27: Gráfico da distribuição de cada fração granulométrica em relação à profundidade das amostras para o furo da 3ª Posição. ....	45
Figura 28: Gráfico da distribuição de cada fração granulométrica em relação à profundidade das amostras para o furo da 4ª Posição. ....	45
Figura 29: Gráfico da distribuição de cada fração granulométrica em relação à profundidade das amostras para o furo SPT. ....	46
Figura 30: Seção geológica esquemática da encosta, correlacionando as sondagens. ....	47
Figura 31: Diagrama triangular de classificação textural da 1ª posição. ....	48

Figura 32: Diagrama triangular de classificação textural da 1ª posição.....	49
Figura 33: Diagrama triangular de classificação textural da 3ª posição.....	49
Figura 34: Diagrama triangular de classificação textural da 4ª posição.....	50
Figura 35: Diagrama triangular de classificação textural do furo SPT.....	50
Figura 36: Gráfico comparativo dos valores de condutividade hidráulica obtidos pelos ensaios de campo e pelos métodos de laboratório empíricos, através das fórmulas de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer, para o colúvio. ....	59
Figura 37: Gráfico comparativo dos valores de condutividade hidráulica obtidos pelos ensaios de campo e pelos métodos de laboratório empíricos, através das fórmulas de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer, para o solo saprolítico. ....	60
Figura 38: Curvas granulométricas com e sem defloculante das amostras 2,00-2,45m e 8,00-8,45m, pertencentes à sondagem SPT, mostrando a diferença que existe entre as curvas CD e SD do colúvio e do solo saprolítico, de acordo com o método do ensaio de caracterização que é adotado. ....	63

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Valor do coeficiente de Hazen de acordo com a seleção dos sedimentos (FETTER, 2004).....	30
Tabela 2: Resultados de condutividade hidráulica na zona não saturada pelo método de Hvorslev.....	39
Tabela 3: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos da sondagem 1 pela granulometria com defloculante. ....	53
Tabela 4: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer da sondagem 2 pela granulometria com defloculante.....	54
Tabela 5: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer para a sondagem 3 pela granulometria com defloculante. ....	54
Tabela 6: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer da sondagem 4 pela granulometria com defloculante.....	55
Tabela 7: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer da sondagem a percussão (SPT) pela granulometria com defloculante.....	55
Tabela 8: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos da sondagem 1 pela granulometria sem defloculante. ....	56
Tabela 9: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos da sondagem 2 pela granulometria sem defloculante. ....	56
Tabela 10: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos da sondagem 3 pela granulometria sem defloculante. ....	56
Tabela 11: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos da sondagem 4 pela granulometria sem defloculante. ....	57
Tabela 12: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer da sondagem a percussão (SPT), pela granulometria sem defloculante.....	58

## SUMÁRIO

Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	vii
Abstract .....	viii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xii
<b>1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos Gerais .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Objetivos Específicos .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Estrutura do Trabalho .....</b>	<b>3</b>
<b>2 ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Localização e Acessos .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 A Encosta .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Geologia Regional .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4 Geologia Local .....</b>	<b>11</b>
<b>2.5 Clima.....</b>	<b>12</b>
<b>2.6 Geomorfologia .....</b>	<b>13</b>
<b>2.7 Hidrogeologia .....</b>	<b>14</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Bibliografia.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 Metodologia de Campo .....</b>	<b>18</b>
3.2.1 Perfuração dos Poços.....	18
3.2.2 Instalação dos permeâmetros e realização dos ensaios de permeabilidade <i>in situ</i> na zona não saturada.....	21
3.2.3 <i>Slug Test</i> .....	23
<b>3.3 Metodologia de Laboratório .....</b>	<b>25</b>
3.3.1 Ensaios de Caracterização Granulométrica.....	26
3.3.2 Classificação Textural.....	27
3.3.3 Métodos Empíricos .....	29

3.3.3.1	Fórmula de Hazen.....	29
3.3.3.2	Fórmula de Kozeny-Carman .....	30
3.3.3.3	Fórmula de Breyer.....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Etapas de Campo .....</b>	<b>33</b>
4.1.1	Descrição tátil-visual das amostras.....	33
4.1.2	<i>Slug Test</i> .....	34
4.1.3	Ensaio de Permeabilidade <i>in situ</i> na zona não saturada .....	37
<b>4.2</b>	<b>Etapas de Laboratório.....</b>	<b>41</b>
4.2.1	Curvas de Caracterização Granulométrica .....	41
4.2.1.1	Gráficos de barra de distribuição granulométrica das amostras .....	43
4.2.2	Classificação Textural.....	47
4.2.3	Métodos Empíricos .....	52
4.2.3.1	Resultados dos cálculos para as amostras com defloculante .....	53
4.2.3.2	Resultados dos cálculos para as amostras sem defloculante .....	55
<b>4.3</b>	<b>Comparação entre os resultados.....</b>	<b>58</b>
4.3.1	Comparação entre os valores de condutividade hidráulica obtidos pelos métodos de campo e de laboratório .....	58
4.3.2	Comparação entre os ensaios de granulometria com e sem defloculante....	61
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>
	<b>Anexo A - Curvas Granulométricas.....</b>	<b>71</b>

# 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

## 1.1 Introdução

A preocupação com o tema dos desastres naturais tem se tornado cada vez maior na sociedade atual, pois o crescimento urbano desordenado, sem o planejamento territorial necessário, aliado com o aumento populacional e a aceleração das mudanças climáticas nos últimos anos, têm produzido um cenário de desastres naturais bem mais frequentes e que geram cada vez mais prejuízos sociais e econômicos à população em geral (KOBAYAMA *et al.*, 2006).

Os desastres naturais ocorrem em todas as partes do mundo e são fenômenos naturais de ocorrência livre, ou seja, ocorrem independentemente do local do planeta ou da ação humana. Porém alguns fatores de risco encontram-se diretamente relacionados a cada tipo de desastre e, além disso, na maioria dos casos, interferências antrópicas são responsáveis tanto pelo aumento da frequência desses eventos quanto pela potencialização do seu poder de destruição. (FERNANDES *et al.*, 2001; SILVA JR., 1990; KOBAYAMA *et al.*, 2006).

Segundo a Defesa Civil do Estado do Rio de Janeiro, os desastres naturais são classificados, como eventos adversos, naturais ou induzidos, sobre um ecossistema vulnerável, que causam danos humanos, materiais, ambientais e, conseqüentemente, prejuízos ecológicos, sociais, econômicos e culturais. São dependentes da interação entre a magnitude do evento adverso e a vulnerabilidade do sistema, e sua quantificação se dá em função de danos e prejuízos (Defesa Civil/RJ, 2011 *apud* SILVA, 2014).

Segundo dados disponibilizados pelo UNDP (2004), mais de 70% da população mundial habita áreas que já foram afetadas pelo menos uma vez por deslizamentos, ciclones, enchentes, secas ou terremotos entre os anos de 1980 e 2010 (UNDP, 2004 *apud* Silva, 2014), evidenciando e corroborando para a natureza de livre ocorrência desses eventos.

No Brasil, os principais fenômenos relacionados a desastres naturais são derivados da dinâmica externa da Terra, tais como, inundações, enchentes, escorregamentos de solos e/ou rochas e tempestades. Estes fenômenos ocorrem normalmente associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados, nos períodos chuvosos que correspondem ao verão na região sul e sudeste e ao inverno na região nordeste (TOMINAGA *et al.*, 2009). A partir de um banco de dados que registra a ocorrência de deslizamentos de 1900 até os dias de hoje, no Brasil os desastres têm-se tornado notoriamente mais frequentes a partir de 1960, acompanhando a tendência mundial, com 70% das ocorrências registradas entre 1960 e 2009 (TOMINAGA *et al.*, 2009).

Isso certamente se deve aos fatores mencionados anteriormente, como o intenso processo de urbanização vivido pelo país nas últimas décadas, especialmente na região sudeste, que não veio acompanhado de um planejamento adequado de utilização das áreas urbanas, causando assim a ocupação de áreas com características geológicas e geomorfológicas desfavoráveis (TOMINAGA *et al.* 2009).

A pressão antrópica causada por essa ocupação desordenada aumenta ainda mais a vulnerabilidade dessas regiões, elevando assim a ocorrência de

deslizamentos e inundações nessas áreas. Isso faz com que esses eventos tomem proporções catastróficas, com perdas irreparáveis de caráter social e econômico a essas populações. Portanto, é possível observar que no Brasil existe uma relação estreita e direta entre o avanço da degradação ambiental, a intensidade do impacto dos desastres e o aumento da vulnerabilidade humana (MAFFRA e MAZZOLLA, 2007).

Com isso, o presente trabalho vem tratar da problemática dos desastres naturais, tendo como motivação a situação que está sendo observada no Brasil de aumento da ocorrência desses eventos, bem como dos prejuízos sociais e econômicos cada vez maiores causados por eles. Entre os diversos tipos de desastres naturais, o interesse deste trabalho está principalmente nos deslizamentos de terra, que são com certeza os principais tipos de desastres que vêm afetando a população brasileira ultimamente. Outro motivo que contribuiu para essa escolha e serviu de motivação e objeto de pesquisa deste trabalho foi o evento catastrófico ocorrido na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, em janeiro de 2011, e que ganhou notoriedade com os milhares de deslizamentos deflagrados pela chuva nos municípios de Nova Friburgo, Petrópolis e Teresópolis, principalmente, deixando milhares de mortos e desabrigados nessa região.

O evento de chuva de 2011 foi considerado um dos maiores desastres naturais da história do Brasil causando prejuízos econômicos da ordem de R\$ 4,7 bilhões, segundo estudo do Banco Mundial, além de enormes perdas sociais com 38.937 desabrigados e desalojados, 304.562 pessoas afetadas e cerca de 1000 mortos, segundo o referido estudo (BANCO MUNDIAL, 2012).

Os deslizamentos podem ser deflagrados por uma série de fatores que agem isolados ou conjuntamente, que são os mecanismos de ruptura. Entre esses mecanismos destaca-se o aumento da poropressão positiva e a consequente diminuição do fator de segurança, relacionado à saturação dos solos (GUIDICINI & NIEBLE, 1984; HARP *et al.*, 1990 *apud* FERNANDES *et al.*, 2001).

Quando o solo se encontra encharcado, devido aos grandes volumes de chuva, e com isso atinge então o nível de saturação ou próximo a este, diminui consideravelmente o atrito existente entre as partículas, responsável pela estabilidade da massa de solo sobre a encosta, pois os poros, antes preenchidos pelo ar, encontram-se preenchidos por água. Ocorre então uma alteração na tensão efetiva e a resistência do solo ao cisalhamento diminui. Quando essa tensão efetiva é superada pela componente da força da gravidade que puxa o solo para baixo, toda a massa tende a deslizar.

Com isso, considerando a relevância do tema dos desastres naturais para a sociedade de hoje e, especialmente levando-se em consideração a magnitude dos eventos ocorridos em janeiro de 2011, na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, com inúmeras mortes e grandes prejuízos sociais causados por esse evento catastrófico, justifica-se o desenvolvimento deste trabalho na região. O objetivo foi o de auxiliar a busca pela compreensão dos fatores causadores dos deslizamentos na área do estudo, bem como a interação entre tais fatores. Também busca-se compreender o que aumenta a vulnerabilidade de determinadas regiões a esses eventos e potencializa os danos causados pelos mesmos. Dessa forma, pretende-se alcançar um melhor entendimento do mecanismo de ocorrência desses desastres na área estudada, através do estudo de parâmetros do aquífero como a permeabilidade e a granulometria. Assim, como consequência, almeja-se contribuir para ações que possam ao menos diminuir futuros desastres e prejuízos à sociedade.



## 1.2 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem por objetivo principal estudar a dinâmica hidrogeológica de uma área escolhida em Nova Friburgo, buscando conhecer a permeabilidade saturada das camadas aquíferas, além da granulometria, para assim entender a contribuição da água subterrânea e das estruturas geológicas na deflagração dos processos dos deslizamentos. Vale ressaltar que o trabalho tem um caráter descritivo do fenômeno ocorrido e busca através do conhecimento de algumas propriedades obtidas do substrato, estabelecer de forma conceitual o comportamento de subsuperfície da encosta estudada, bem como a sua relação com o desastre natural ocorrido em 2011.

## 1.3 Objetivos Específicos

A fim de atingir a meta e os objetivos gerais propostos para o trabalho, foram definidos alguns objetivos específicos para proporcionar a caracterização das propriedades do solo da encosta e, através disso, conceituar o cenário existente, possibilitando o melhor entendimento da dinâmica hidrogeológica do sistema e sua provável influência no deslizamento ocorrido. Dessa forma os objetivos específicos definidos para o trabalho foram:

- Caracterização da área de estudo em campo e através da literatura;
- Caracterização física do substrato e das estruturas geológicas, que são importantes para a compreensão do sistema hidrogeológico subsuperficial;
- Realização de ensaios de permeabilidade em campo, na zona saturada e na zona não saturada, para obtenção da condutividade hidráulica das diferentes camadas que compõem o perfil da encosta;
- Comparação dos resultados de diferentes métodos para obtenção da permeabilidade.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

O estudo foi desenvolvido em uma encosta piloto no município de Nova Friburgo que foi afetada por escorregamento no evento de chuvas de 2011, a qual é objeto de estudo da pesquisa científica desenvolvida pela aluna de mestrado Roberta Pereira da Silva, vinculada aos projetos Pensa Rio e INCT-REAGEO, financiado pela FAPERJ e pelo CNPq (coordenados pela Prof.<sup>a</sup> Ana Luiza Coelho Netto, juntamente com outros pesquisadores) e esteve integrado a outros estudos desenvolvidos pelo Laboratório GEOHECO-UFRJ em parceria com o Laboratório HIDROGEO-UFRJ (coordenado pelo Prof. Gerson Cardoso da Silva Jr.).

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, sendo neste primeiro capítulo apresentada a introdução ao tema, assim como a motivação do

trabalho, as justificativas para a execução do mesmo e os principais objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2, apresenta-se a caracterização da área de estudo, com as localizações e acessos à encosta-alvo da pesquisa, a geologia regional e local, as condições do clima e a geomorfologia da região, além das características hidrogeológicas da área. No Capítulo 3 trata-se da metodologia de trabalho e dos materiais utilizados na pesquisa.

No Capítulo 4, expõem-se os resultados obtidos através dos ensaios de campo e dos métodos de laboratório que foram desenvolvidos. São incluídas também as interpretações acerca dos gráficos e dos resultados apresentados e algumas discussões pertinentes a eles.

Por fim, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões do trabalho com base nas análises e comparação dos resultados de campo e de laboratório, produzidos durante a pesquisa.



Figura 1: Visão panorâmica mostrando os vários escorregamentos que ocorreram nas montanhas de Nova Friburgo, Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, no dia 12 de janeiro de 2011. A maioria dos deslizamentos foi do tipo translacional raso. Fonte: Avelar *et. al.* (2011).

## 2 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Localização e Acessos

A área de estudo localiza-se no município de Nova Friburgo, no distrito de Campo do Coelho, no estado do Rio de Janeiro. O município de Nova Friburgo está a cerca de 150 km da cidade do Rio de Janeiro e aproximadamente 2 horas e 30 minutos de viagem de carro a partir da capital. O município de Nova Friburgo faz parte da Região Serrana do estado do Rio de Janeiro, juntamente com outros 13 municípios (Figura 2). A escolha deste município para o estudo está diretamente relacionada com os eventos de chuva de janeiro de 2011, que deflagraram uma série de escorregamentos atingindo milhares de pessoas na Região Serrana do Estado.

O principal acesso à área de estudo a partir da cidade do Rio de Janeiro se dá pela Rodovia Rio-Teresópolis (BR-116) até a cidade de Teresópolis, seguindo posteriormente pela RJ-130, que liga o município de Teresópolis a Nova Friburgo (Figura 3).

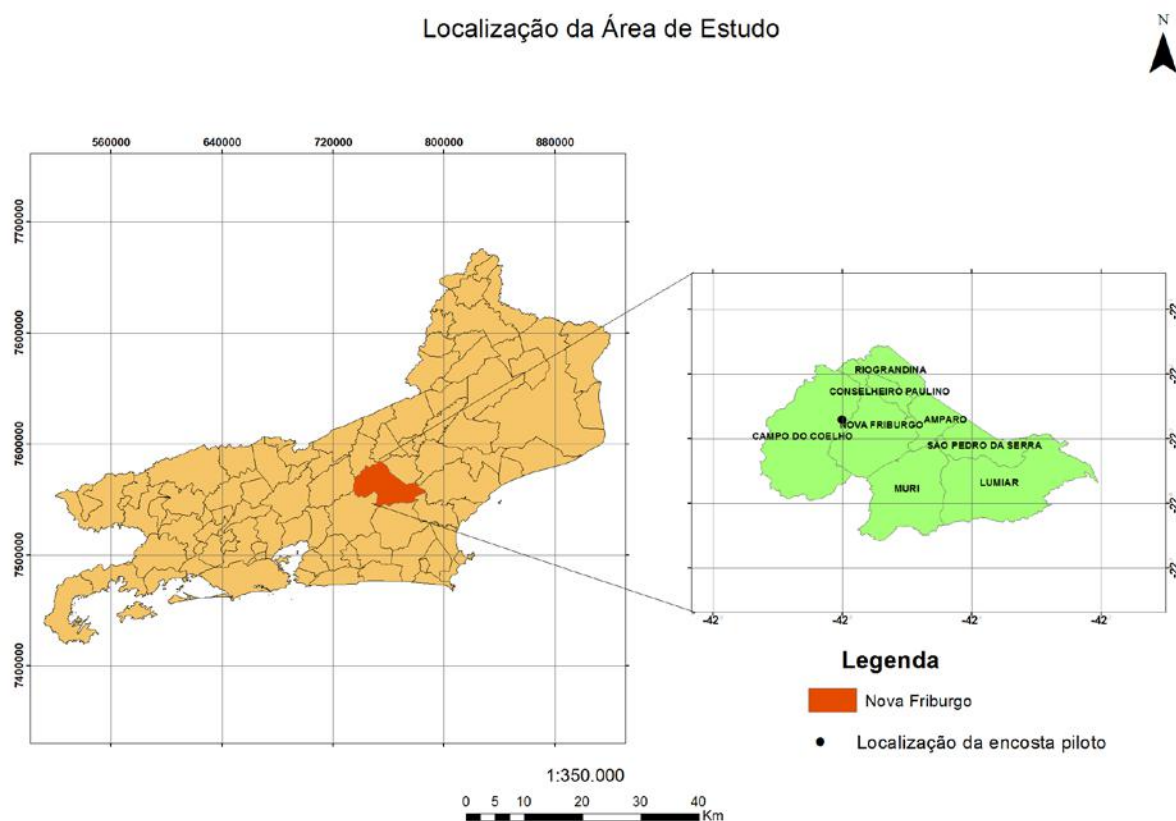


Figura 2: Mapa de localização da área de estudo no município de Nova Friburgo (distrito de Campo do Coelho).

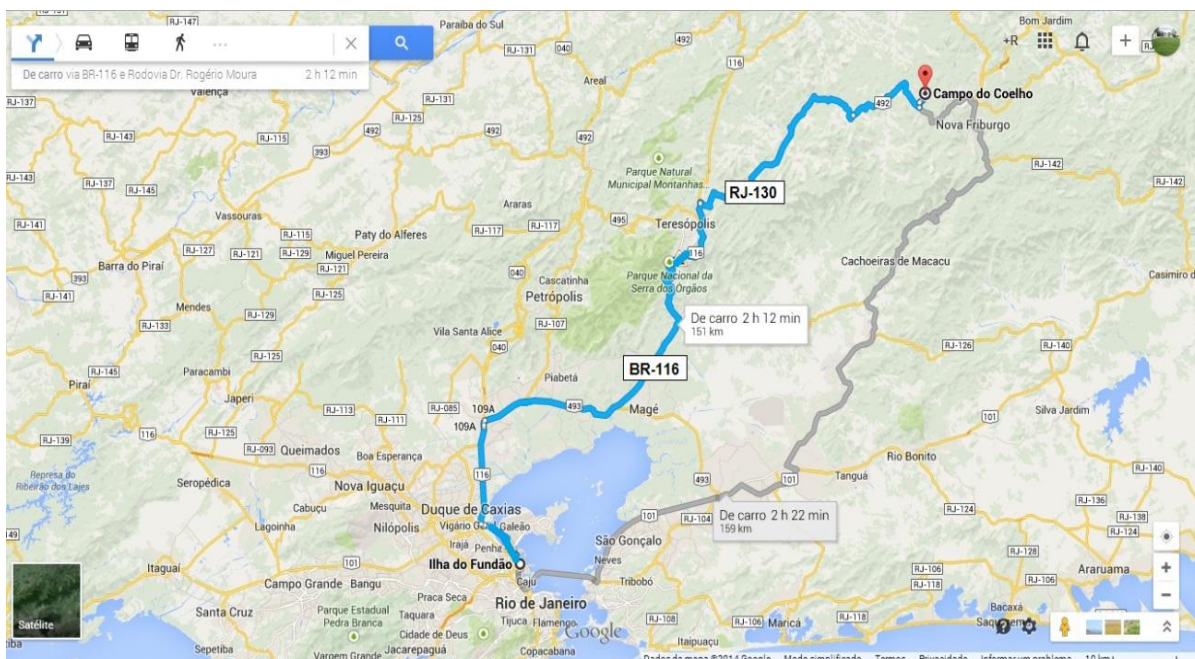


Figura 3: Acesso à área de estudo a partir da cidade do Rio de Janeiro pela BR-116 (Rio-Teresópolis) até Teresópolis e RJ-130 até Campo do Coelho (em azul). Uma rota alternativa (em cinza) pode ser pela BR-101 até Itaboraí, seguindo depois até Nova Friburgo para acessar a RJ-130 até Campo do Coelho. Fonte: Google Maps.

## 2.2 A Encosta

A partir dos eventos catastróficos deflagrados pelas chuvas de janeiro de 2011, com base em uma avaliação prévia (Coelho Netto *et al.*, 2011), foi escolhida uma encosta representativa desses eventos, como alvo de pesquisa do presente trabalho, a fim de detalhar melhor os estudos sobre o comportamento das camadas aquíferas e do substrato rochoso, bem como das estruturas geológicas, em áreas de encosta e sua influência na ocorrência de deslizamentos.

No estudo de Coelho Netto *et al.*, 2011, foi realizado um mapeamento sistemático, logo após o desastre, através de imagens de satélite, onde todos os deslizamentos de terra detectáveis por essa ferramenta na região foram identificados. Dessa forma, foram mapeados 3622 deslizamentos de terra, em uma área de aproximadamente 422 km<sup>2</sup>, ocorridos entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2011, na região entre os municípios de Teresópolis e Nova Friburgo.

A área de estudo encontra-se nas coordenadas UTM aproximadas X= 747272 e Y= 7535193 (fuso 23 Sul 45 W, Datum WGS 84), A encosta se localiza no município de Nova Friburgo, no bairro Jardim Suíço, que pertence ao distrito de Campo do Coelho. Trata-se de uma área rural do município e a encosta localiza-se a aproximadamente 500 m da RJ-130 ou BR-492 (Estrada Teresópolis-Nova Friburgo), em uma estrada secundária que dá acesso à mesma (Figura 4). A encosta sofreu, como dito, um deslizamento do tipo translacional raso no evento de chuva de janeiro de 2011. Na imagem de satélite da figura 4 é possível identificar claramente a cicatriz de deslizamento.

O trabalho de Coelho Netto *et al.* (2011) também incorporou os índices pluviométricos registrados nas estações meteorológicas da Região Serrana, próximo às áreas onde ocorreram deslizamentos. Os dados apontaram um acumulado de chuva próximo ao da precipitação média mensal em menos de 10 horas, na

madrugada do dia 11 para o dia 12 de janeiro de 2011. Relacionando a distribuição espacial e temporal do acumulado de chuva na região com os locais dos deslizamentos, os estudos revelaram que as maiores cicatrizes e os escorregamentos de maior porte se concentraram nas áreas que registraram maior quantidade de chuva nesse pequeno intervalo de tempo (COELHO NETTO *et al.*, 2011). Isso realçou o papel fundamental da água como principal agente deflagrador dos deslizamentos, influenciando também diretamente na magnitude dos eventos.

Segundo Avelar *et al.* (2011), na região do estudo houve predomínio de deslizamentos do tipo translacional raso, que se caracterizam por haver uma clara superfície de ruptura relacionada com alguma descontinuidade mecânica e/ou hidrológica no solo causada pelas heterogeneidades presentes no perfil. Este tipo de deslizamento é muito comum em encostas com solo pouco espesso, sendo os deslizamentos translacionais rasos os mais comuns ao longo de todo o escarpamento da Serra do Mar (Avelar *et al.*, 2011). O escarpamento da Serra do Mar é caracterizado por um perfil de solos pouco profundos combinados com altas declividades devido às grandes escarpas montanhosas, estando assim muito sujeitos a esse tipo de instabilidade (LACERDA, 1997; FERNANDES *et al.*, 2001).

Dessa forma, com base nesses estudos sobre o tema, foram identificadas na encosta-alvo deste trabalho, diversas características como: o tipo de deslizamento e de cicatriz gerada, o tipo de substrato rochoso (granítico) e a espessura do solo que corroboraram para a escolha da área como uma encosta representativa da paisagem e das características geológicas da região. Isto avalizou a mesma para um estudo de maior detalhe acerca das características das camadas aquíferas e suas propriedades, para um melhor entendimento da dinâmica hidrogeológica da encosta e a sua influência sobre a instabilidade do talude.

As pesquisas na área estão sendo conduzidas pelo Laboratório de Geohidroecologia (GEOHECO-UFRJ), ao qual o presente trabalho encontra-se vinculado, em parceria com o Laboratório de Hidrogeologia (HIDROGEO-UFRJ).

### **2.3 Geologia Regional**

As escarpas montanhosas da Serra do Mar e da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro possuem uma história geológica que está ligada a alguns dos eventos de evolução da crosta terrestre no decorrer do tempo geológico. A região de estudo pertence a uma província geológica denominada Província Mantiqueira. Essa Província representa um orógeno Neoproterozoico que se estende ao longo das regiões sul e sudeste do Brasil e engloba as faixas móveis Araçuaí, Ribeira, Brasília Meridional, Dom Feliciano e São Gabriel, que se estendem desde o sul da Bahia até o Rio Grande do Sul (HEILBRON *et al.* 2004). A Província Mantiqueira desenvolveu-se durante a orogenia Neoproterozoica denominada Brasileira-Panafricana que resultou na amalgamação do Paleocontinente Gondwana Ocidental (HEILBRON *et al.* 2004).

A atuação desse orógeno começou com a aproximação de algumas paleoplacas e a extinção dos paleoceanos Adamastor e Goianides situados às margens oeste e leste do paleocontinente São Francisco. Com o início do processo de subducção, foram gerados diversos arcos magmáticos intraoceânicos, seguidos de colisões arco-continente e continente-continente, que se deram diacronicamente nas diferentes regiões da província (HEILBRON *et al.* 2004).

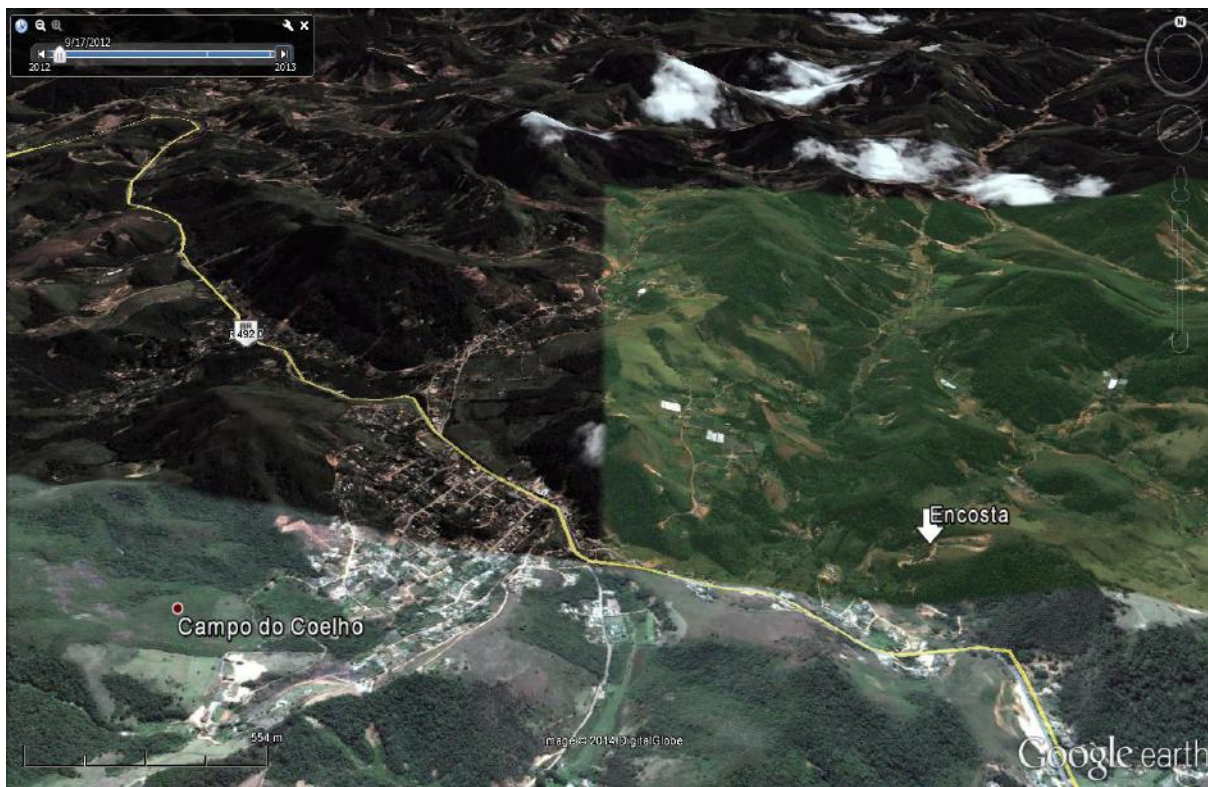


Figura 4: Localização da encosta piloto, próxima à estrada RJ-130 (em amarelo). Fonte: Google Earth.

Devido a essa evolução geotectônica, a Província Mantiqueira torna-se um complexo sistema de orógenos que muitas vezes se sobrepõem, com diversas sequências de rochas de difícil separação e correlação estratigráfica. Apesar dessa diversidade, uma divisão litoestratigráfica e também tectônica tem sido adotada para a Província Mantiqueira e a Faixa Ribeira. Nessa divisão, segundo Tupinambá *et al.* (2013), separam-se três compartimentos tectônicos, que são: embasamento ortognáissico paleoproterozoico, coberturas sedimentares paleo-mesoproterozoicas e sequências sedimentares e granitoides neoproterozoicos a saber:

- a) Embasamento arqueano e/ou paleoproterozoico mais velho que 1,7 Ga;
- b) Sequências metassedimentares paleoproterozoicas a mesoproterozoicas;
- c) Sequências metassedimentares e metavulcanossedimentares neoproterozoicas que incluem sequências de margem passiva (abertura oceânica), sequências relacionadas ao fechamento de oceanos (bacias de antearco e retro-arco), e ao estágio da colisão continental (bacias molássicas e de antepaís);
- d) Granitoides neoproterozoicos pré-colisionais, gerados em arco magmático intra-oceânico ou de margem continental ativa e, portanto, contemporâneos a processos de subducção;
- e) Granitoides neoproterozoicos sin a tardicolisionais;
- f) Granitoides pós-colisionais.

A região Serrana do estado do Rio de Janeiro na área de Nova Friburgo, encontra-se nesse contexto de evolução geológica da Província Mantiqueira, no seu segmento central, e na região do orógeno ou da faixa móvel denominada Ribeira. A Faixa Ribeira é um complexo cinturão de dobramentos e empurrões gerados durante a orogênese Brasiliana na borda sul-sudeste do Cráton São Francisco (HEILBRON

*et al.*, 1995) e representa a raiz de um orógeno colisional que se desenvolveu durante o Ciclo Brasileiro. (TUPINAMBÁ *et al.*, 2012).

A Faixa Ribeira apresenta um *trend* estrutural NE-SW, resultado da interação do Cráton São Francisco com outra placa e/ou microplaca, ou um arco de ilha à sudeste deste cráton bem como da porção sudoeste do Cráton do Congo como se pode ver na Figura 5 (HEILBRON *et al.* 2004). Esse *trend* estrutural é muito importante na configuração geológica e geomorfológica encontrada ao longo da Região Serrana do Rio de Janeiro.

A evolução tectônica da Região Serrana Fluminense, começa no fim do Criogeniano, com a instalação do arco magmático do Complexo Rio Negro e a sedimentação das rochas dos grupos Italva, São Fidélis e Bom Jesus do Itabapoana (TUPINAMBÁ *et al.*, 2012). Durante o Ediacarano ocorre a colisão, por volta de 580 Ma, resultando na amalgamação e no empilhamento de diversos terrenos de leste para oeste-noroeste, com vergência em direção ao Cráton do São Francisco (HEILBRON *et al.*, 1995) e gerando diversos gnaisses migmatíticos denominados de Suíte Cordeiro (TUPINAMBÁ *et al.*, 2012). Seguiu-se à colisão o magmatismo calcálcico da Suíte Serra dos Órgãos. Ao final da evolução, a exumação tectônica do conjunto teria originado um colapso tectônico, com o aparecimento de esforços distensivos na crosta que causaram a intrusão dos granitos pós-colisionais da Suíte Nova Friburgo durante o Cambro-Ordoviciano (TUPINAMBÁ *et al.*, 2012). Com isso, a compartimentação tectônica da Faixa Ribeira se deu em quatro terrenos tectonoestratigráficos diferentes, separados por falhas de empurrão e zonas de cisalhamento oblíquas entre elas, conforme pode ser visto em mapa na Figura 6, e na seção da Figura 7. Esses Terrenos são os seguintes: Terreno Ocidental, Paraíba do Sul, Oriental e Cabo Frio. O Terreno Cabo Frio é de idade Cambriana e foi docado ao orógeno posteriormente, por volta de 520 Ma, não tendo sido gerado na colisão principal de 580 Ma. A região serrana está compreendida no Terreno Oriental, também chamado de microplaca Serra do Mar. Neste Terreno, não há registro de rochas do embasamento com idade superior a 1,7 Ga. Trata-se de terrenos neoproterozoicos, principalmente arcos magmáticos, constituídos de rochas metavulcanossedimentares e é dividido em três domínios denominados: Domínio Cambuci, Domínio Costeiro e Domínio Italva. De acordo com Tupinambá *et al.* (2013), o Domínio Cambuci, se encontra em posição basal e é formado por rochas metassedimentares, mármore e paragnaisses, além de ortognaisses com ambiência tectônica de arco magmático. O Domínio Costeiro é composto por intercalações de biotita-gnaisses migmatíticos da Unidade São Sebastião do Alto com ortognaisses do Complexo Rio Negro, com idades entre 790-620 Ma. Por fim, o Domínio Italva é constituído por sucessões de paragnaisses, anfíbolitos e mármore calcícticos, com provável contribuição vulcânica. (TUPINAMBÁ *et al.*, 2013).

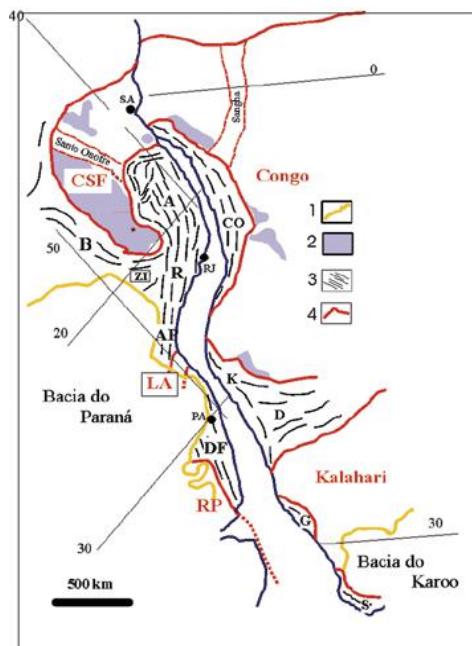


Figura 5: Localização dos orógenos do Sistema Orogênico Mantiqueira no contexto do Gondwana Ocidental. 1- Bacias fanerozoicas. 2- Coberturas cratônicas. 3- Orógenos neoproterozoicos (B- Brasília, A- Araçuai, R- Ribeira, ZI- Zona de Interferência, AP- Apiaí, DF- Dom Feliciano). 4- Crátons neoproterozoicos (CSF- São Francisco, LA- Luís Alves, RP- Rio de La Plata). Na África localizam-se as faixas neoproterozoicas do Congo Ocidental (CO), Kaoko (K), Damara (D), Gariep (G) e Saldania (S), relacionadas aos crátons do Congo e Kalahari. Fonte: Heilbron *et al.* (2004, p. 206).

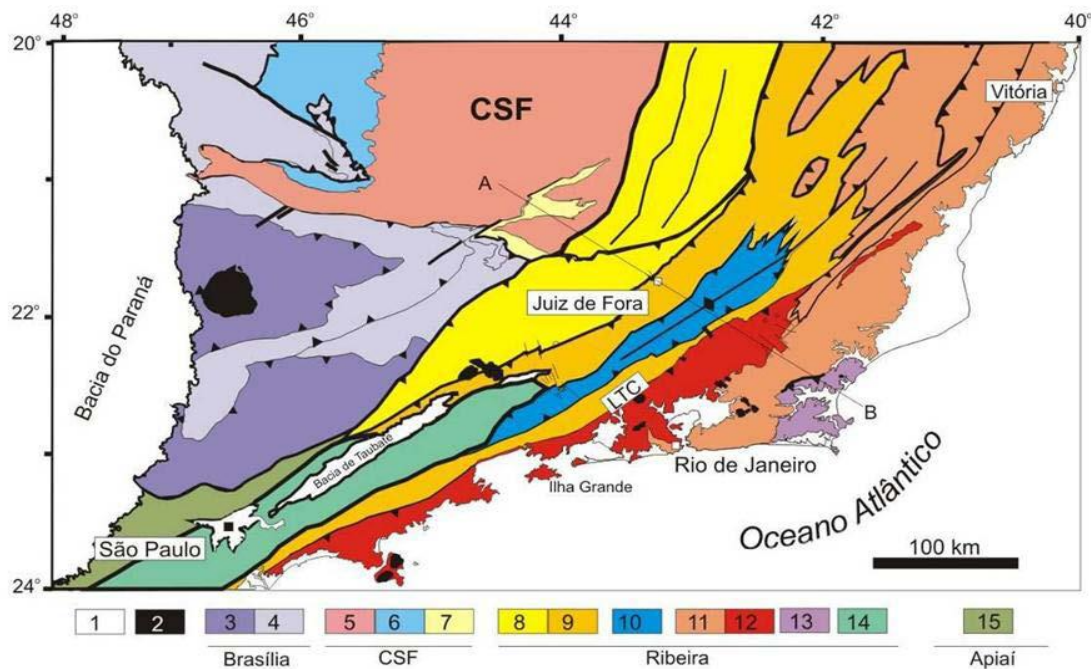


Figura 6: Mapa tectônico do setor central da faixa Ribeira, mostrando os terrenos tectono-estratigráficos – Legenda: 1- riftes Cenozoicos; 2- rochas alcalinas do Cretáceo e Terciário; orógeno Brasília (3-4): 3- nappes inferiores, 4- nappes superiores; 5- embasamento do CSF e domínio autóctone; 6- supergrupo São Francisco; 7- metassedimentos do domínio autóctone; Orógeno Ribeira (8-13): 8- domínio Andrelândia, 9- domínio Juiz de Fora do Terreno Ocidental, 10- klippe Paraíba do Sul, 11- terreno oriental, 12- granitoides do arco magmático Rio Negro, 13- terreno Cabo Frio; orógeno Apiaí/Paranapiacaba (14-15): 14- terrenos São Roque e Açungui, 15- terreno Embu. Fonte: Heilbron *et al.* (2004, p. 212).



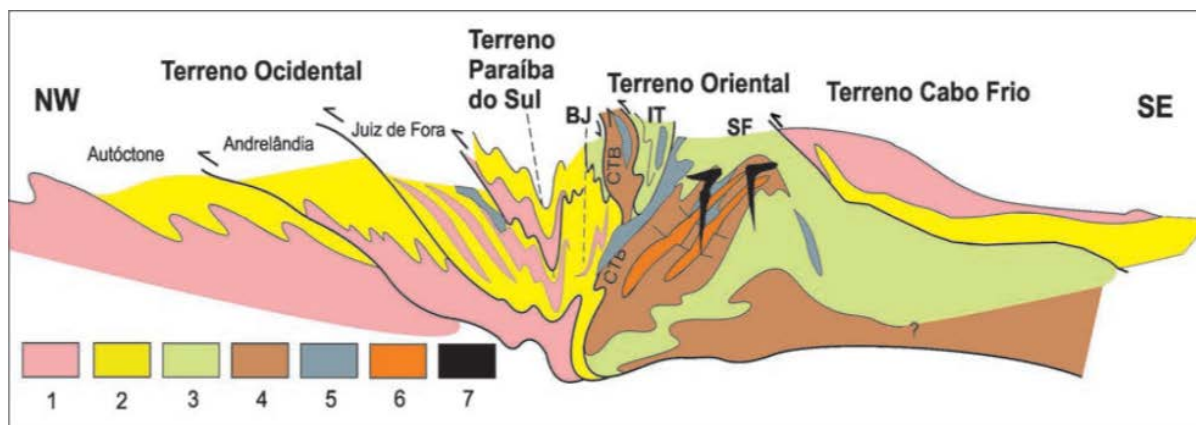


Figura 7: Compartimentação tectônica da Faixa Ribeira entre a borda do Cráton do São Francisco e o litoral fluminense, passando pela Região Serrana Fluminense (modificado de Heilbron et al., 2004). 1- Embasamento Paleoproterozoico; 2- Cobertura metassedimentar pós-1,8 Ga; 3 – Sequências metassedimentares à volta do arco magmático, IT, Grupo Itálva; BJ, Grupo Bom Jesus do Itabapoana; SF, Grupo São Fidélis; 4 – Complexo Rio Negro, ortognaisses do Arco Mágmatco; 5 – Leucognaisses graníticos da Suíte Cordeiro; 6 – Gnaisses metaluminosos da Suíte Serra dos Órgãos; 7 – Granitos da Suíte Nova Friburgo. Fonte: Tupinambá *et al.* (2012, p. 143).

## 2.4 Geologia Local

A região onde está situada a área de estudo, no distrito de Campo do Coelho, em Nova Friburgo, é repleta de escarpas montanhosas dissecadas por vales com coberturas sedimentares quaternárias, gerando inúmeras encostas e taludes sujeitos à instabilidade. O substrato rochoso na encosta alvo da pesquisa é um granito, que normalmente aparece em blocos de dimensão métrica, chegando até no máximo 10 metros de diâmetro aproximadamente (Figura 8). Os blocos são bem arredondados, produto do intenso fraturamento do maciço rochoso em pelo menos duas direções transversais entre si, que com a percolação de água e a alteração produzem o efeito da esfoliação esferoidal, gerando muitos blocos soltos ao longo da encosta. Alguns desses blocos claramente foram exumados durante o deslizamento de 2011 como se pode ver na Figura 8. Isso mostra também, que esses blocos podem ter sido remobilizados algumas vezes durante a história geológica por deslizamentos pretéritos (FERNANDES *et al.*, 2001).

O substrato rochoso da encosta é descrito na literatura como um granito porfírico de granulação fina a média, onde os pórfiros são normalmente de feldspato alcalino não superiores a um centímetro de diâmetro. Ocorre principalmente em grandes blocos, nas proximidades dos distritos de Campo do Coelho e Conselheiro Paulino (JUNHO, 1990 *apud* SILVA, 2014). Essa unidade é denominada granito Andorinha, tendo sido descrito por Penha *et al.* (1979) *apud* Silva (2014), como um granito de textura granular porfírica, com grãos em geral hipidiomórficos, com microclina orientada pelo fluxo magmático e a biotita como o mineral máfico mais abundante. Essa unidade é interpretada na literatura, no contexto regional da Faixa Ribeira e da Província Mantiqueira, como um granito pós-colisional, com idade estimada entre 503-492 Ma (HEILBRON *et al.*, 1995).

Estas rochas constituem o relevo montanhoso bem característico da Região Serrana do Estado. As áreas montanhosas são dissecadas por inúmeras drenagens, que formam diversos vales, sendo estes quase sempre capeados por sedimentos

quaternários inconsolidados. Esses sedimentos que preenchem os vales são principalmente aluvionares, geralmente areias inconsolidadas de granulometria variando de fina a grossa, argilas e seixos depositados nas planícies de inundação dos rios, e também coluvionares e colúvio-aluvionares, também compostos em geral por areias finas a grossas, argila e seixos, nas vertentes e sopés das encostas. Esses sedimentos formam também depósitos de tálus, com camadas de solo não muito espessas ao longo das encostas, inclusive com a presença de blocos e matacões soterrados ao longo do perfil.



Figura 8: Visão panorâmica da encosta-alvo, com demarcação da cicatriz de deslizamento em vermelho e dos blocos de granito em preto. Alguns blocos foram exumados no evento de 2011. Fonte da foto: Silva (2014).

## 2.5 Clima

O clima predominante no município de Nova Friburgo e na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, bem como nos demais planaltos e serras do sudeste brasileiro de maneira geral é o Tropical de Altitude. A temperatura média na região de Nova Friburgo é de 16° C podendo variar entre 37° e - 2° C (COELHO NETTO et al., 2011). O clima é quente e úmido no verão e bem frio e seco no inverno, com as temperaturas caindo bastante devido ao efeito da altitude. O clima Tropical de Altitude sofre influência da massa de ar Tropical Atlântica que provoca altos índices pluviométricos nos meses de verão. A massa de ar úmida proveniente do Oceano quando se desloca e encontra as regiões montanhosas, choca-se com elas provocando assim altos índices de precipitação. Esse fenômeno é muito comum na

região e é conhecido como chuva orográfica. Por isso, nas regiões mais altas os índices pluviométricos são notadamente superiores ao das regiões mais baixas.

O índice pluviométrico médio anual é em torno de 1500 mm/ano na cidade. Porém, esse índice varia muito ao longo do município, sendo que nas regiões de maior altitude esse índice é bem maior, chegando a patamares de 2500 mm/ano (no período de 1977 a 2000) nas regiões mais altas e decrescendo progressivamente para norte, chegando a 1300 mm/ano nas regiões de altitude mais baixa (COELHO NETTO *et al.*, 2008). Os meses mais chuvosos são novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, enquanto os mais secos são junho, julho e agosto.

## 2.6 Geomorfologia

A região de Nova Friburgo apresenta uma geomorfologia caracterizada por áreas montanhosas em um sistema de relevo muito acidentado, com encostas de gradientes elevados, muitas vezes sendo dissecadas por vales alongados e encaixados em estruturas regionais relevantes e em planos de fraqueza das rochas. Os fundos de vale, na Região Serrana, costumam ser estreitos e encaixados em estruturas tectônicas importantes e persistentes, sendo que apenas os rios de grande porte conseguem gerar depósitos fluviais, onde se localiza a maior parte da população da região (AVELAR *et al.*, 2011).

Normalmente, os vales e as drenagens principais da região se encaixam e seguem persistentemente as estruturas de direção NE-SW, que é a direção da foliação principal das rochas da Faixa Ribeira, formadas durante o Ciclo Brasileiro (PINTO & FREITAS, 2012). Algumas vezes essa direção se inflete ligeiramente para norte e algumas drenagens se orientam na direção N-S, que é a direção de fraturamentos e falhamentos gerados pela deformação rúptil juro-cretácea, responsável pela abertura do Oceano Atlântico Sul (PINTO & FREITAS, 2012). Adjacentes a esses vales, escarpas com afloramentos rochosos e encostas íngremes (com até 35° de inclinação) são comuns. Normalmente podem apresentar depósitos de tálus e colúvios ricos em blocos na base, com aproximadamente 10 m de espessura do perfil saprolito mais colúvio (AVELAR *et al.*, 2011).

Nas regiões mais planas, ocorrem algumas pequenas várzeas cortadas por córregos e rios de menor poder de erosão. As encostas menos íngremes são caracterizadas por possuírem um manto intempérico mais bem desenvolvido, devido ao clima úmido vigente, e apresentam coberturas de solo mais espessas. Também podem ser verificados alguns depósitos de tálus, provenientes dos movimentos gravitacionais de massa típicos da região (SILVA, 2014). A combinação dessa cobertura de solo ao longo das encostas com a alta declividade verificada na região, além da presença de blocos de rocha soltos nos vales ou no sopé das encostas, é um fator de risco e favorece bastante a ocorrência de processos de instabilidade e de deslizamentos de terra na região.

A drenagem local apresenta um caráter torrencial e um alto poder de erosão, que se potencializa nos períodos chuvosos de verão, apresentando assim alta probabilidade de ocorrência de processos de instabilidade de encostas, enchentes e de corridas de lama e fluxos de detritos que canalizados pelas drenagens, podem atingir um alto poder de destruição (CANEDO *et al.*, 2011; SILVA, 2014).

A encosta escolhida para ser estudada neste trabalho se localiza na Bacia do Rio Grande e sub-bacia do Córrego do Roncador, próximo ao distrito de Campo do Coelho (Figura 9). É possível perceber que os divisores da bacia formam um vale

assimétrico onde os afluentes do lado direito possuem ligeiramente mais extensão e declive que os afluentes do lado esquerdo que são mais curtos e menos íngremes. A drenagem principal apresenta direção NNE-SSW, que é uma direção ligeiramente infletida em relação à direção principal de falhamento NE-SW das rochas da faixa Ribeira, formadas durante a evolução dessas rochas no ciclo Brasileiro. Essa direção é atribuída à influência das estruturas tectônicas da Faixa Ribeira, fazendo com que as drenagens se encaixem nessa conformação.

Toda essa configuração geomorfológica também é observada em algumas Bacias e regiões subjacentes, como por exemplo, a Bacia do Córrego D'Antas, de acordo com o trabalho e a descrição geomorfológica de Pinto e Freitas (2012) dessa bacia, demonstrando que são todas características relevantes e que se estendem ao longo da região.

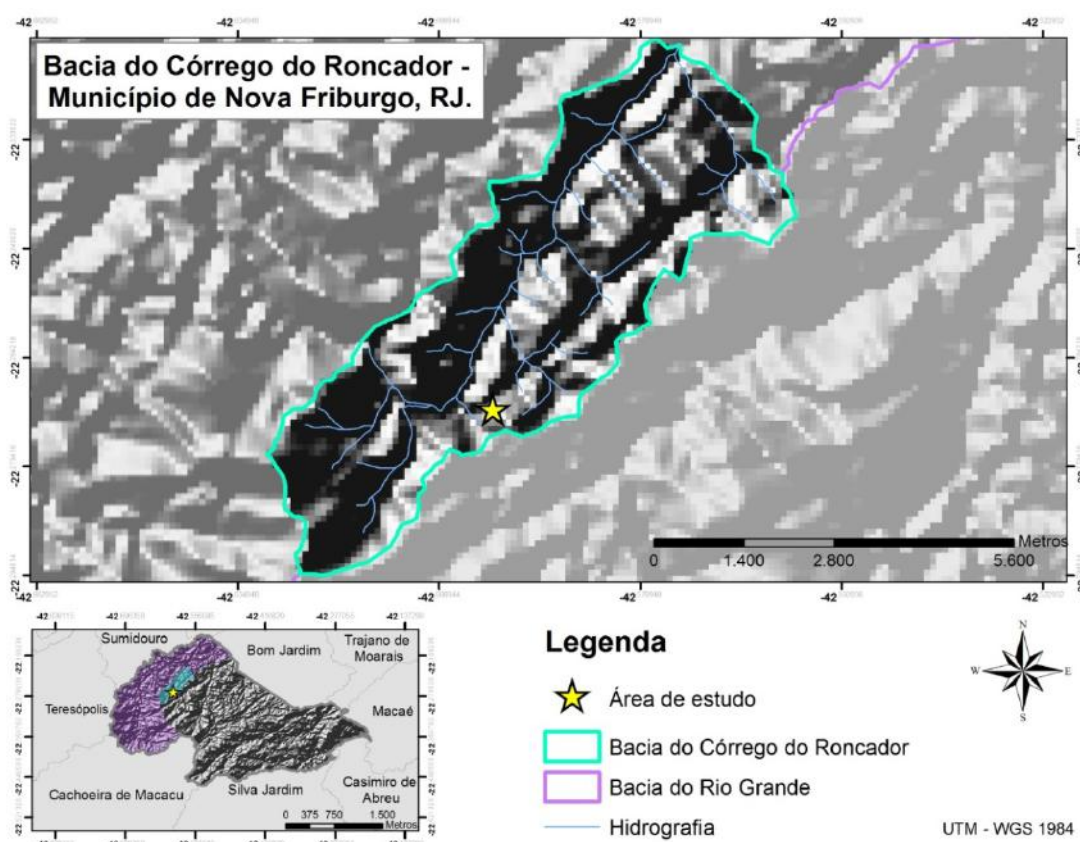


Figura 9: Modelo digital do terreno (MDT) mostrando a Bacia do Córrego do Roncador, Nova Friburgo-RJ.

## 2.7 Hidrogeologia

O Estado do Rio de Janeiro é composto predominantemente por rochas cristalinas, que constituem 80% de todo o seu território. Por esse motivo, as águas subterrâneas estão espacialmente mais distribuídas em aquíferos fissurais, uma vez que os aquíferos porosos estão nas planícies litorâneas e bacias sedimentares, que cobrem apenas cerca de 20% do Estado (MARTINS *et al.*, 2006). A Região Serrana do Estado encontra-se inserida nesse contexto e a maior parte da água subterrânea da região está localizada nos sistemas aquíferos cristalinos fissurais. As rochas da

região são predominantemente de idade pré-cambriana, e estiveram submetidas a diversos esforços tectônicos ao longo do tempo geológico, que produziram diversas direções de falhamentos, fraturamentos e zonas de cisalhamento importantes. Essas estruturas são responsáveis pela acumulação e produção da água subterrânea, que somente pode fluir através da comunicação dessas descontinuidades geológicas.

Em 2001, a CPRM produziu um mapa de favorabilidade hidrogeológica do Estado do Rio de Janeiro (CPRM, 2001, ver a Figura 10). A Região Serrana aparece no mapa com uma hidrogeologia composta essencialmente por aquíferos fissurais de baixa a média favorabilidade, com relevo montanhoso e solos pouco espessos, com vazões de menos de  $1\text{m}^3/\text{h}$ , e outras variando de 1 a  $5\text{m}^3/\text{h}$ . Entretanto, localmente a região apresenta aquíferos de média a alta favorabilidade, onde são verificadas altas vazões (maiores que  $5\text{m}^3/\text{h}$ , podendo atingir até  $60\text{m}^3/\text{h}$  em alguns locais). Geralmente isto se dá em regiões de maior densidade de fraturas, geralmente em áreas de relevo menos acidentado e solos mais permeáveis e espessos, muitas vezes próximos aos aluviões dos rios.

A principal direção de falhamento regional que existe na região é a direção NE-SW, resultante da evolução das rochas durante o ciclo Brasileiro. Nesse evento foram exercidos esforços compressivos que constituem uma zona de fraqueza preferencial do embasamento. Existem também esforços distensivos que geram direções de fraturamento secundárias, como a NW-SE e a E-W, esta última menos frequente, mas também importante, derivada da abertura do Oceano Atlântico (PINTO & FREITAS, 2012). Além disso, as fraturas de alívio de tensão são muito comuns nas rochas da região serrana. Por serem rochas plutônicas, que foram formadas a dezenas de quilômetros de profundidade na crosta, quando chegam à superfície, o alívio de pressão sobre elas produz sistematicamente essas fraturas.

A existência dessas descontinuidades, e a possível comunicação entre elas, torna o sistema aquífero cristalino da Região Serrana bastante heterogêneo e complexo. Em alguns locais, torna-se um sistema bem útil, tanto para o consumo, quanto para a exploração industrial. Além disso, é também um sistema que pode influenciar diretamente nos processos de movimentos de massa que ocorrem na região. Por isso, torna-se essencial o estudo e a compreensão da hidrogeologia da área.

Na região da encosta-alvo do presente trabalho, não existem poços tubulares profundos conhecidos, portanto a caracterização hidrogeológica regional é de difícil determinação e será feita de forma conceitual, de acordo com o modelo regional existente. Contudo, é possível afirmar que, em geral, é uma área de baixa favorabilidade hidrogeológica por ser uma região de encosta e apresentar um solo pouco espesso e pouco permeável. Podem ser definidos basicamente dois sistemas aquíferos presentes na região: o sistema cristalino, confinado a semiconfinado, ligado ao maciço rochoso, e o sistema aquífero granular livre, que está nas camadas mais rasas da encosta e próxima ao aluvião do Córrego do Roncador.

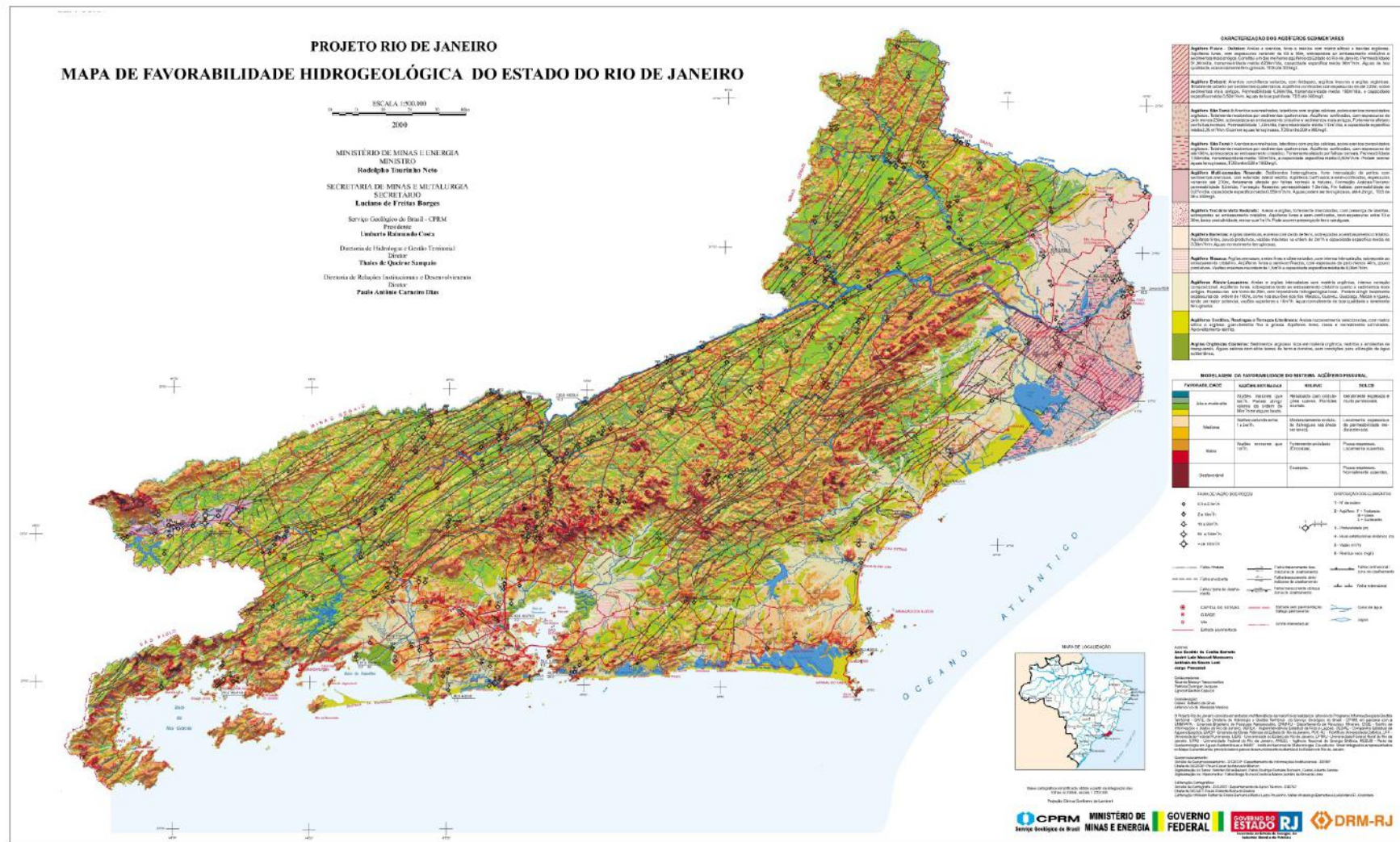


Figura 10: Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica do Estado do Rio de Janeiro. (Fonte: Projeto RJ-CPRM, 2001).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia da presente pesquisa foi dividida em algumas etapas e desenvolvida de forma integrada, a fim de assegurar os melhores resultados e o cumprimento de todos os objetivos propostos para o trabalho. Com isso, a metodologia foi composta das seguintes etapas: 1) Breve revisão bibliográfica, buscando compreender a questão dos desastres naturais na área de estudo escolhida e, além disso, selecionar métodos que permitissem a melhor caracterização das propriedades do material geológico da área; 2) Etapas de campo que incluíram a perfuração dos poços, retirada das amostras e execução dos ensaios de permeabilidade *in situ*; e 3) Etapas de laboratório que compreenderam a realização dos ensaios de caracterização granulométrica das amostras e a posterior análise das curvas, com o uso dos dados para os cálculos de determinação indireta da permeabilidade, através dos métodos empíricos.

Por fim, de posse dos resultados das etapas de campo e de laboratório desenvolvidas, compararam-se os dados obtidos pelas diferentes metodologias, a fim de concluir sobre as características do material estudado e avaliar, também, a adequação e aplicabilidade dos diferentes métodos empíricos que foram utilizados.

#### 3.1 Bibliografia

A revisão bibliográfica se deu de forma breve, como etapa preliminar da pesquisa, buscando compreender a problemática dos desastres naturais através da análise dos principais trabalhos desenvolvidos na Região Serrana do Estado.

Entre os principais estudos na região destaca-se o de Coelho Netto *et al.* (2011), no qual foram mapeadas 3622 cicatrizes de deslizamento existentes entre os municípios de Teresópolis e Nova Friburgo, com base em imagens de satélite no software Geoeye, de 19 de janeiro de 2011, logo após o desastre. Além disso, incorporou-se também ao trabalho os dados de chuva das estações meteorológicas existentes na área investigada. Constatou-se que a chuva acumulada entre os dias 11 e 12 de janeiro aproximou-se da média mensal em um período de apenas 10 horas. Notou-se também que as maiores cicatrizes de deslizamento encontravam-se nas regiões com os mais altos índices pluviométricos registrados, provando o papel fundamental da água na deflagração dos desastres e na magnitude dos eventos.

Segundo Avelar *et al.* (2011), houve predomínio de deslizamentos do tipo translacional raso na região, que se caracterizam por haver uma clara superfície de ruptura relacionada com alguma descontinuidade mecânica e/ou hidrológica no solo causada pelas heterogeneidades presentes no perfil. Essa característica foi observada na encosta-alvo da pesquisa e foi um dos motivos que avalizou a escolha da mesma para o estudo. O deslizamento, porém, diferentemente do mais comum nessa região, não se deu no contato solo-rocha, mas ao longo do perfil de solo, no contato entre duas camadas de propriedades físicas distintas.

Existem ainda outros trabalhos importantes desenvolvidos na região como o de Pinto e Freitas (2012), que fez uma análise dos principais condicionantes geomorfológicos que causaram os deslizamentos, na Bacia do Córrego D'Antas, que é vizinha à área de estudo. Os autores concluíram que os movimentos de massa foram influenciados pela morfologia do relevo (PINTO E FREITAS, 2012). Guidolini *et al.* (2012) avaliou os condicionantes geológicos dos desastres e constatou que os

deslizamentos ocorreram ao longo de todas as litologias, basicamente da mesma forma. Isso mostra que as características mais importantes a serem analisadas são as estruturas e as características texturais das rochas e, principalmente dos solos da região.

O DRM-RJ também realizou um estudo bem abrangente na Região Serrana sobre os desastres ocorridos em 2011. Nesse estudo conclui-se que os fatores efetivos que contribuíram para a ocorrência e a magnitude dos eventos foram o uso e ocupação indevida do solo, com realização de cortes e aterros, as chuvas antecedentes e a erosão fluvial e pluvial. O fator deflagrador foi a chuva intensa em pouco tempo, nos dias 11 e 12 de janeiro (DRM-RJ, 2011). Os desastres foram classificados pelo DRM-RJ segundo o tipo e a região em que foi observado (Tipo Parroca, Catarina, Vale Suspenso, Rasteira ou Corrida de lama). Por fim, as principais ações pós-desastre foram a realização de um mapeamento de risco remanescente na região e o prosseguimento do mapeamento das áreas de maior susceptibilidade a movimentos de massa no Estado (DOURADO *et al.*, 2011).

Após essa avaliação do panorama dos desastres naturais ocorridos na Região Serrana, passou-se ao desenvolvimento dos métodos utilizados na pesquisa, a fim de compreender os principais mecanismos causadores dos movimentos de massa na área de estudo escolhida.

## **3.2 Metodologia de Campo**

As campanhas de campo foram destinadas à compreensão prática da geologia da região e do substrato da encosta, além da realização dos ensaios de permeabilidade. Para isso foram utilizados diversos métodos de pesquisa para a perfuração dos poços, execução dos ensaios de permeabilidade tanto na zona saturada como na zona não saturada, coleta de amostras para descrição tátil-visual e análise granulométrica em laboratório.

### **3.2.1 Perfuração dos Poços**

Para o estudo das propriedades hidrogeológicas do substrato e da dinâmica subsuperficial da encosta, perfurou-se primeiramente um poço pelo método de sondagem à percussão (SPT), com 12,5 m de profundidade, pois atingiu-se nessa profundidade o nível impenetrável à percussão. Depois, perfurou-se um poço através de sondagem rotativa, com 18 m de profundidade. Não foi possível coletar testemunhos rochosos neste trabalho pois, com a sondagem rotativa, que seria a mais adequada para isso, não se conseguiu atingir a rocha sã por limitações de custos e esta acabou sendo interrompida aos 18 m de profundidade. Ambos os poços estão localizados na região média a baixa da encosta, próximo à estrada de terra secundária que dá acesso a área de estudo e atingiram o nível d'água. Somente nesse ponto da encosta foi possível atingir a zona saturada. Na figura 11, podemos ver o maquinário utilizado e a execução da sondagem a percussão SPT.

No poço do SPT, previamente limpo, foi instalado um medidor de nível d'água (MNA), feito com um tubo de PVC de 40 mm de diâmetro e 12 m de comprimento, ranhurado em toda a sua extensão, permitindo assim o monitoramento do nível freático mais próximo da superfície, neste local da encosta. Este poço foi denominado de poço MNA.



No segundo poço, perfurado com a sondagem rotativa, foi feito o revestimento e instalado um piezômetro, a 12 m de profundidade, para a medição da carga hidráulica da camada interceptada, possibilitando assim o monitoramento dessa camada do aquífero granular mais profundo existente na encosta. Este poço foi denominado de poço PZ-1, de acordo com o equipamento de estudo que foi instalado em cada um dos poços. No poço MNA, perfurado através do SPT, foram retiradas amostras, de metro em metro, até 12,45 m de profundidade, totalizando 13 amostras que foram encaminhadas para os ensaios de caracterização granulométrica em laboratório. Não foram retiradas amostras do poço perfurado pela sondagem rotativa, pois como eles se encontravam muito próximos um do outro, assumiu-se que em ambos os poços as características do solo são bastante semelhantes.

Com o objetivo de compreender as variações litológicas e espaciais ao longo da encosta que podem influenciar na dinâmica hidrogeológica subsuperficial da mesma, e também para a realização de ensaios de permeabilidade *in situ*, foram ainda perfurados poços de menor profundidade em quatro posições distintas ao longo da média/alta encosta. Por limitações de custos e pela dificuldade de transporte e manuseio de equipamentos grandes como os necessários para a sondagem SPT e a sondagem rotativa, esses poços foram perfurados manualmente com o uso de um trado mecânico (Figura 12). Todos os poços perfurados a trado se encontram na zona não saturada, pois não é possível atingir o lençol freático em cotas mais altas da encosta, já que este se encontra em profundidades relativamente grandes. Foram coletadas também, continuamente, em cada poço, amostras para análise granulométrica em laboratório.

Na Figura 13 pode-se observar a localização dos poços ao longo da encosta, tanto dos poços PZ-1 e MNA que ficam próximos à estrada de acesso, quanto dos poços perfurados encosta acima, ao longo das quatro posições mostradas no mapa.



Figura 11: A) Execução da sondagem SPT. B) Início da sondagem rotativa. C) Retirada das amostras do furo SPT com amostrador padrão. Fonte das fotos: Roberta Pereira da Silva.

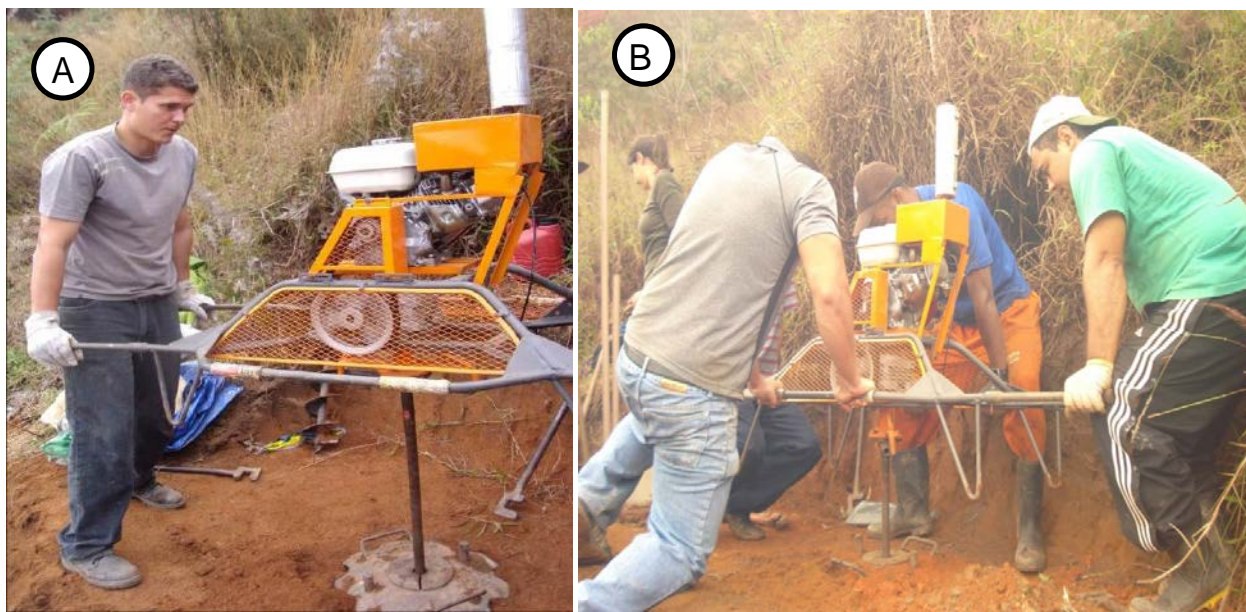


Figura 12: A) Trado mecânico modelo MB2-Honda. B) Operação do trado para execução da sondagem. Fonte das fotos: Roberta Pereira da Silva.

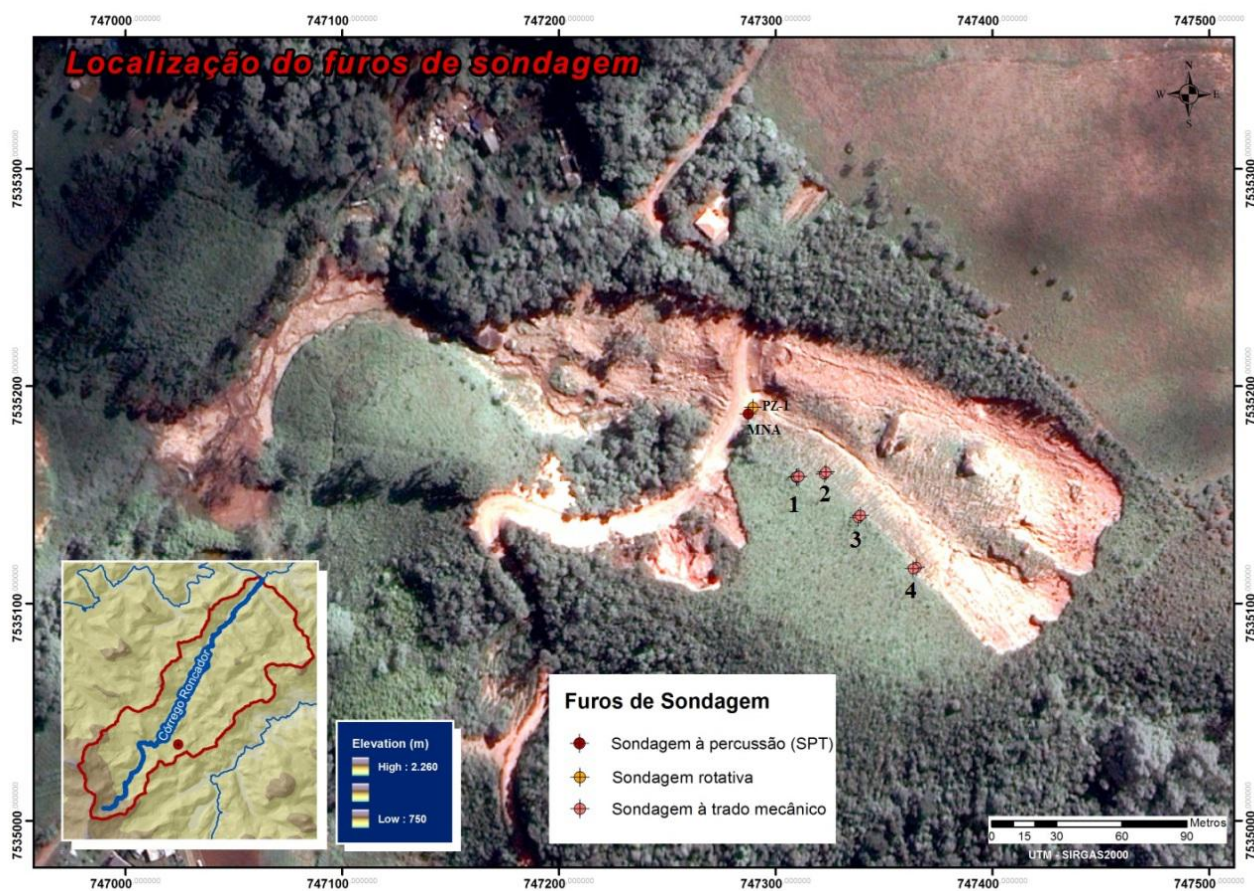


Figura 13: Mapa de localização das sondagens ao longo da encosta com a respectiva nomenclatura dos poços. Fonte: Modificado de Silva, (2014).

### 3.2.2 Instalação dos permeâmetros e realização dos ensaios de permeabilidade *in situ* na zona não saturada

Foram realizados ensaios de permeabilidade *in situ* nos poços ao longo das quatro posições na encosta. Segundo Fernandes *et al.* (2001), o conhecimento da condutividade hidráulica saturada das camadas faz-se necessário para o entendimento dos mecanismos que causam os movimentos de massa. Ainda segundo este autor, para uma maior fidelidade dos dados com a realidade, os ensaios devem ser preferencialmente elaborados *in situ* (FERNANDES *et al.*, 2001).

Por isso, foram realizados em campo ensaios de obtenção da condutividade hidráulica *in situ* do solo, em quatro posições diferentes ao longo da encosta. Segundo Lisboa (2006), existem diversos métodos para se obter a condutividade hidráulica saturada dos solos, tais como:

- a) Método de Poços e Furos (com ensaios de carga constante ou de carga variável);
- b) Método de Hvorslev;
- c) Infiltrômetro de anel duplo;
- d) Perfil Instantâneo;
- e) Câmara de Fluxo.

Devido à dificuldade de acesso e de transporte de material para as regiões mais elevadas, e também pela limitação financeira, foi escolhido o Método de Hvorslev, para a obtenção da condutividade hidráulica saturada dos solos. Esse método foi usado de forma adaptada para obter a condutividade hidráulica do solo em locais em que ele se encontra não saturado.

Para o ensaio foram instalados nos poços permeâmetros fabricados com tubos de PVC de 32 mm de diâmetro, ranhurados e revestidos de tela nos últimos 30 cm (Figura 15). Os tubos foram instalados em diferentes profundidades ao longo do poço, mas de forma que se pudesse ensaiar cada uma das três camadas de solo identificadas ao longo da encosta. Para maior segurança dos ensaios, foram instalados dois permeâmetros em cada poço apenas, em diferentes profundidades, sendo um isolado do outro por uma camada de bentonita a fim de não permitir que a água atingisse o furo inferior, interferindo no ensaio. Em apenas um furo (3ª posição), foram instalados três permeâmetros no mesmo poço. Quando necessário, foi feito mais de um furo, com a profundidade que se desejava ensaiar, em determinada posição. Assim, o método é mais seguro, sem que haja um grande risco de impermeabilização indevida no poço, gerando comunicação da água entre as diferentes camadas de solo e a invalidação do ensaio. Na Figura 14, é apresentado um esquema que representa os permeâmetros que foram instalados para a realização dos ensaios.

Com esses permeâmetros instalados nos poços, foram realizados ensaios de permeabilidade de Hvorslev para a determinação da condutividade hidráulica de cada camada. Através desse método obtém-se uma estimativa da permeabilidade ao longo das direções “x” e “y”, pois se cria um bulbo de saturação no solo com a água que é vertida ao longo do tubo, através da porção ranhurada, posicionada exatamente na camada que se pretende ensaiar. Na figura 15 pode-se ver: A) a confecção e instalação dos permeâmetros; B) a execução do ensaio de permeabilidade *in situ*; e C) Medição da queda do nível d’água no poço durante um determinado intervalo de tempo para a obtenção da condutividade hidráulica. O procedimento de realização do ensaio consiste na criação de um bulbo de saturação

no solo, na profundidade em que se encontra o filtro, e a posterior medição da permeabilidade.

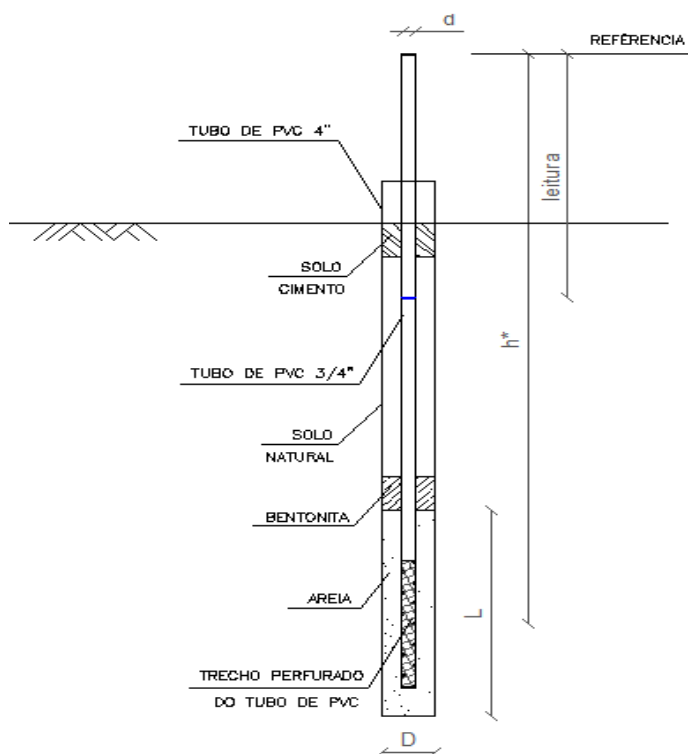


Figura 14: Esquema de permeâmetro instalado no solo para a realização do ensaio de condutividade hidráulica in situ e suas propriedades.

A variação do nível d'água em determinado intervalo de tempo é registrada com o medidor de nível automático, até que se atinja o estado de equilíbrio, a partir do qual se determina a condutividade hidráulica saturada (AGUIAR, 2001). Desse modo, a condutividade hidráulica saturada do solo no ensaio *in situ* foi calculada pela seguinte fórmula (Hvorslev, 1954 *apud* Lambe e Whitman 1969):

$$K_h = \frac{d^2 \cdot \ln\left(\frac{2mL}{D}\right)}{8 \cdot L \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{para } \frac{mL}{D} > 4, \quad \text{sendo } m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$$

OU

$$K_h = \frac{d^2 \cdot \ln\left[\frac{m \cdot L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{m \cdot L}{D}\right)^2}\right]}{8 \cdot L \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{sendo } m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$$

Onde:

$K_h$  = Condutividade hidráulica horizontal

$K_v$  = Condutividade hidráulica vertical

$d$  = Diâmetro do tubo

$D$  = Diâmetro do poço

$m$  = Razão de transformação

$L$  = Comprimento do filtro

$h_1$  = Altura do nível d'água para  $t=1$

$h_2$  = Altura do nível d'água para  $t=2$

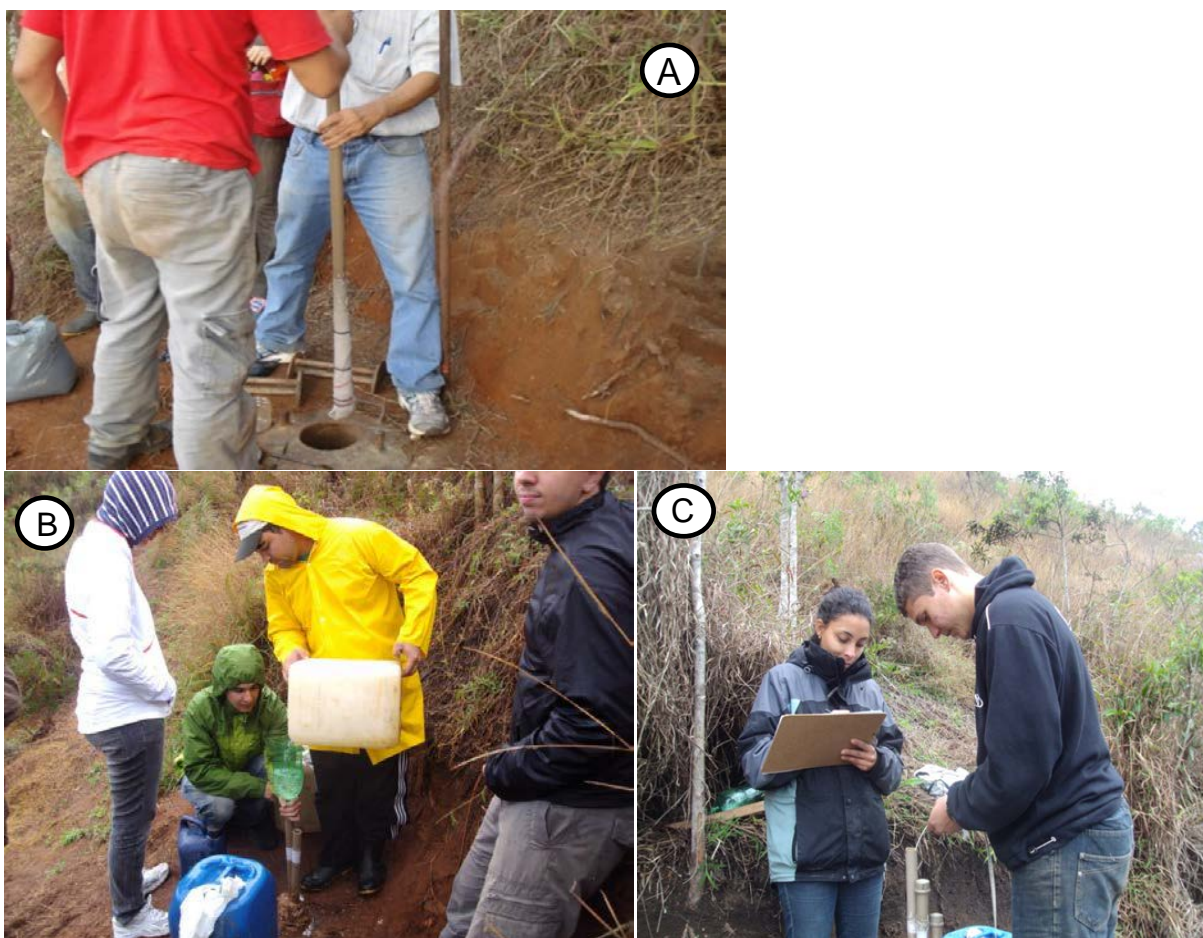


Figura 15: A) Instalação do permeâmetro feito com tubo de PVC de 32 mm, ranhurado e revestido de tela nos últimos 30 cm. B) Realização do ensaio de permeabilidade in situ: criação do bulbo de saturação com o derramamento de água no poço. C) Medição da queda do nível d'água no poço durante um determinado intervalo de tempo para a obtenção da condutividade hidráulica.

### 3.2.3 Slug Test

Na zona saturada da encosta, foi utilizado o ensaio do *Slug Test* para obtenção da condutividade hidráulica. Este teste como foi dito, é realizado na zona saturada e consiste na introdução ou retirada de um cilindro sólido chamado de tarugo ou *slug* dentro do poço de monitoramento, de maneira a induzir uma rápida elevação ou

rebaixamento no nível d'água do poço (Figura 16). O teste consiste em medir essa variação de nível d'água provocada pela introdução do slug no poço e monitorar a descida do nível até a total estabilização, obtendo-se assim a resposta do aquífero, de acordo com a sua permeabilidade. De posse dos dados de variação do nível em relação ao tempo, obtém-se o valor da condutividade hidráulica saturada naquela determinada camada onde foi realizado o teste ou nas imediações dela.

Dessa forma, foi realizado o *slug test* para a determinação da condutividade hidráulica no poço do MNA (perfurado pelo método SPT), na porção onde foi possível atingir a zona saturada na encosta. O teste foi realizado também no poço do piezômetro, poço PZ-1 (perfurado pelo método da sondagem rotativa), porém houve muitas perturbações e interferências ao longo do teste e, além disso, o mesmo não foi feito durante o intervalo de tempo necessário, de modo que com os dados que foram gerados não foi possível calcular corretamente o valor da condutividade hidráulica. Por isso, os valores obtidos com o teste de *slug* são correspondentes apenas ao poço MNA.

O teste propriamente dito foi realizado no campo, introduzindo-se no poço um tarugo de PVC de 20 mm, preenchido com brita e selado, e medindo-se a subida do nível causada por ele, bem como sua posterior recuperação. A medição da variação do nível d'água foi realizada de forma automática utilizando um transdutor de pressão com *data logger* (*diver* da SWS S.A.) que foi posicionado no fundo do poço, sendo realizadas medidas a cada 12 segundos. Todos os dados vão sendo armazenados automaticamente pelo equipamento, gerando-se assim uma planilha Excel com os valores. Posteriormente, os dados dessa planilha foram interpretados no *software Aquifer Test*, utilizando como método de resolução a equação de Hvorslev e de Bouwer-Rice. Segundo o método de resolução de Hvorslev (1951), a condutividade hidráulica do aquífero é dada por:

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L_e}{R}\right)}{2L_e T_o}$$

Onde:

K = Condutividade hidráulica

r = Raio do revestimento

R = Raio do poço

L<sub>e</sub> = Comprimento do Filtro

T<sub>o</sub> = Tempo que leva para o nível d'água cair 37% da variação inicial.

No método de Bouwer & Rice (1976), a condutividade hidráulica é dada pela seguinte equação:

$$K = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e}{R}\right)}{2L_e} \cdot \frac{1}{t} \cdot \ln\left(\frac{H_0}{H}\right)$$

Onde:

$r_c$  = Raio do revestimento do poço

$R$  = Raio do poço

$R_e$  = Distância radial efetiva em que a carga é dissipada

$L_e$  = Comprimento do filtro ou intervalo por onde a água se infiltra

$t$  = Tempo decorrido após  $H=0$

$H_0$  = Rebaixamento no início do ensaio ( $t=0$ )

$H$  = Rebaixamento ao final do ensaio.

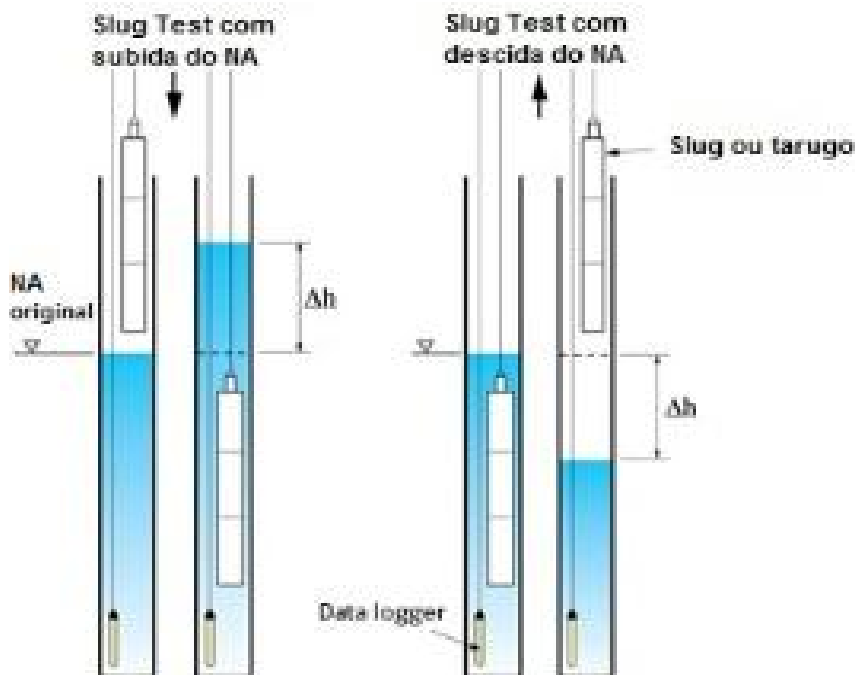


Figura 16: Representação esquemática da realização do Slug Test. Fonte: Modificado de In Situ Europe (2014).

### 3.3 Metodologia de Laboratório

Após a realização das campanhas de campo, nas quais foram retiradas as amostras de todos os poços e realizados os ensaios de permeabilidade *in situ*, muito importantes para a compreensão da dinâmica hidrogeológica subsuperficial do substrato da encosta, desenvolveu-se uma metodologia de laboratório a fim de complementar o estudo, processar a análise das amostras retiradas e analisar os

resultados comparando-os com os obtidos através dos métodos utilizados em campo.

Dessa forma, a metodologia de laboratório consistiu em realizar os ensaios de caracterização granulométrica das amostras retiradas no campo através do método de sedimentação e peneiramento conjunto. Após os resultados de caracterização elas foram classificadas texturalmente de acordo com a sua respectiva distribuição granulométrica. Por fim, foram calculados os valores de condutividade hidráulica de forma indireta, através dos métodos empíricos de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer, a partir dos dados retirados das curvas de distribuição granulométrica, já que é comprovado que a condutividade hidráulica está diretamente relacionada com a distribuição granulométrica das partículas em um meio poroso (FREEZE & CHERRY, 1979). Essa relação é muito utilizada quando os dados de permeabilidade são difíceis de medir de forma direta, ou quando são insuficientes (ODONG, 2007). No caso deste trabalho, os métodos empíricos foram usados para fins de comparação com os resultados obtidos em campo, de forma direta.

### 3.3.1 Ensaios de Caracterização Granulométrica

As amostras deformadas foram coletadas nas quatro posições ao longo da encosta, assim como as do poço SPT. Como tratava-se de centenas de amostras, foram selecionadas para cada camada identificada ao longo do perfil, um número de amostras representativas para serem ensaiadas e conhecidas as suas propriedades. Foram selecionadas um mínimo de duas amostras por camada e um máximo de 16 amostras, na camada saprolítica do furo de sondagem 3, já que era esta a camada mais extensa que foi perfurada.

Todas as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Caracterização (LC-02) da COPPE-UFRJ, para a realização de ensaios de caracterização granulométrica, a fim de se obter a curva de distribuição granulométrica de cada amostra, pelo método de sedimentação e peneiramento conjunto, segundo as normas da ABNT (NBR 7181, 1984) e pelas normas do DNER (DNER-ME 093, 1994b), para o ensaio de densidade real dos grãos.

As análises foram realizadas para todas as amostras, tanto pela metodologia com defloculante da ABNT (NBR 7181, 1984), quanto usando o método sem defloculante, que se trata de uma metodologia adaptada que tem sido muito empregada atualmente. Os ensaios sem defloculante foram realizados pois em campo as partículas podem encontrar-se agregadas, apresentando então um comportamento de distribuição granulométrica diferente do padrão obtido com defloculante. Isso se deve ao fato de que os solos argilosos lateríticos, muito comuns no Brasil, possuem estrutura macroagregada, decorrente da ação cimentante de óxidos e de hidróxidos de ferro que agrega as partículas mais finas, fazendo com que na prática se comportem como siltes e até como areias finas (Albuquerque *et al.*, 2006). Por isso, o uso do método sem defloculante para fins de comparação tem se tornado cada vez mais difundido em vários trabalhos no Brasil por diversos autores (Albuquerque *et al.*, 2006; Arak, 1997; Teixeira *et al.*, 2002). O solo da encosta apresenta nos primeiros dois a três metros comportamento de um colúvio. Por causa disso, o ensaio de caracterização granulométrica foi feito com e sem o uso de defloculante, para que fosse possível comparar a diferença das curvas granulométricas de acordo com o método que foi utilizado.



A metodologia do ensaio consistiu resumidamente em secar ao ar a amostra deformada bruta que foi retirada no campo e, depois de seca, destorroá-la para quebrar os agregados maiores (Figura 17). Passa-se então todo o material destorroado na peneira #10 (2 mm de abertura) e o material mais grosso, que fica retido na peneira, é separado e lavado para retirada dos finos que ainda estejam agregados, e depois de seco na estufa, o seu acumulado é pesado no jogo de peneiras grossas, definindo assim a quantidade de material grosso da amostra.

O material fino, que passa na peneira #10, é então colocado em cápsulas, pesado e levado à estufa para retirada da umidade e obtenção da umidade higroscópica da amostra. Depois de seco na estufa, retira-se o material e ele é pesado novamente. Através dessa diferença obtém-se o valor de umidade da amostra.

A partir desse material que se encontra em umidade higroscópica é realizado o ensaio de densidade real dos grãos (Figura 17), no qual obtém-se a massa específica real da amostra pela norma do DNER (DNER-ME 093, 1994b), e também o ensaio de sedimentação, a partir do qual é feita a separação granulométrica do material mais fino. Para o ensaio de sedimentação, retira-se aproximadamente 70 g do material seco e coloca-se na solução defloculante, nesse caso preparada com hexametáfosfato de sódio, por aproximadamente 24 horas. Após esse procedimento, a amostra foi agitada no dispersor por 15 minutos, para separação maior dos agregados. Logo depois, coloca-se a amostra em uma proveta, completando-se o recipiente com água destilada até o volume de 1 litro, iniciando-se então o ensaio de sedimentação (Figura 17). A amostra é agitada por 1 minuto e depois são realizadas as leituras da densidade no densímetro, após 30s, 1min, 2 min, 5 min, 10 min, 20 min, 40 min, 80 min e 4 horas de agitação. No dia seguinte, faz-se a leitura de 24 horas após o início do ensaio. Através da Lei de Stokes, a partir do tempo de sedimentação das partículas, é possível calcular a distribuição granulométrica da amostra. Esse cálculo foi feito em uma planilha Excel, confeccionada pelo laboratório da COPPE.

Para o ensaio sem defloculante, a metodologia utilizada foi a mesma com uma pequena adaptação. A única variação foi que o ensaio de sedimentação foi realizado somente com água destilada, sem o hexametáfosfato. A amostra foi embebida na água destilada e ficou em repouso por 24 horas. Depois foi colocada na proveta completando-se para o volume de 1 litro, sem a agitação no dispersor. Isso foi feito de forma a não perturbar os agregados naturais que possam existir na amostra para que fosse feita posteriormente uma comparação dos resultados obtidos.

Os dados dos ensaios foram colocados em uma planilha Excel, confeccionada pela equipe do Laboratório de Caracterização da COPPE, para esse fim, e foram plotados no gráfico de distribuição granulométrica acumulada, gerando assim as respectivas curvas granulométricas para cada amostra, bem como a discriminação percentual de cada fração granulométrica presente no solo.

### **3.3.2 Classificação Textural**

A partir dos dados de caracterização granulométrica das amostras, buscou-se fazer uma classificação textural, obtendo assim uma melhor separação das camadas do perfil do solo em termos texturais e uma melhor visualização do comportamento do substrato ao longo da encosta. A classificação foi feita utilizando-

se o Triângulo Textural do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. (USDA, 1987). Esse método foi escolhido porque utiliza a escala granulométrica igual à que foi utilizada no ensaio de caracterização, com as divisões das frações argila, silte, areia e pedregulho, no mesmo diâmetro de grão e por serem facilmente disponíveis na internet tabelas em Microsoft Excel que plotam automaticamente os dados no gráfico triangular. Além disso, é uma divisão muito semelhante à da Embrapa e do Sistema Brasileiro de Estudos do Solo (LEMOS & SANTOS, 1996), sendo também muito utilizada no Brasil.

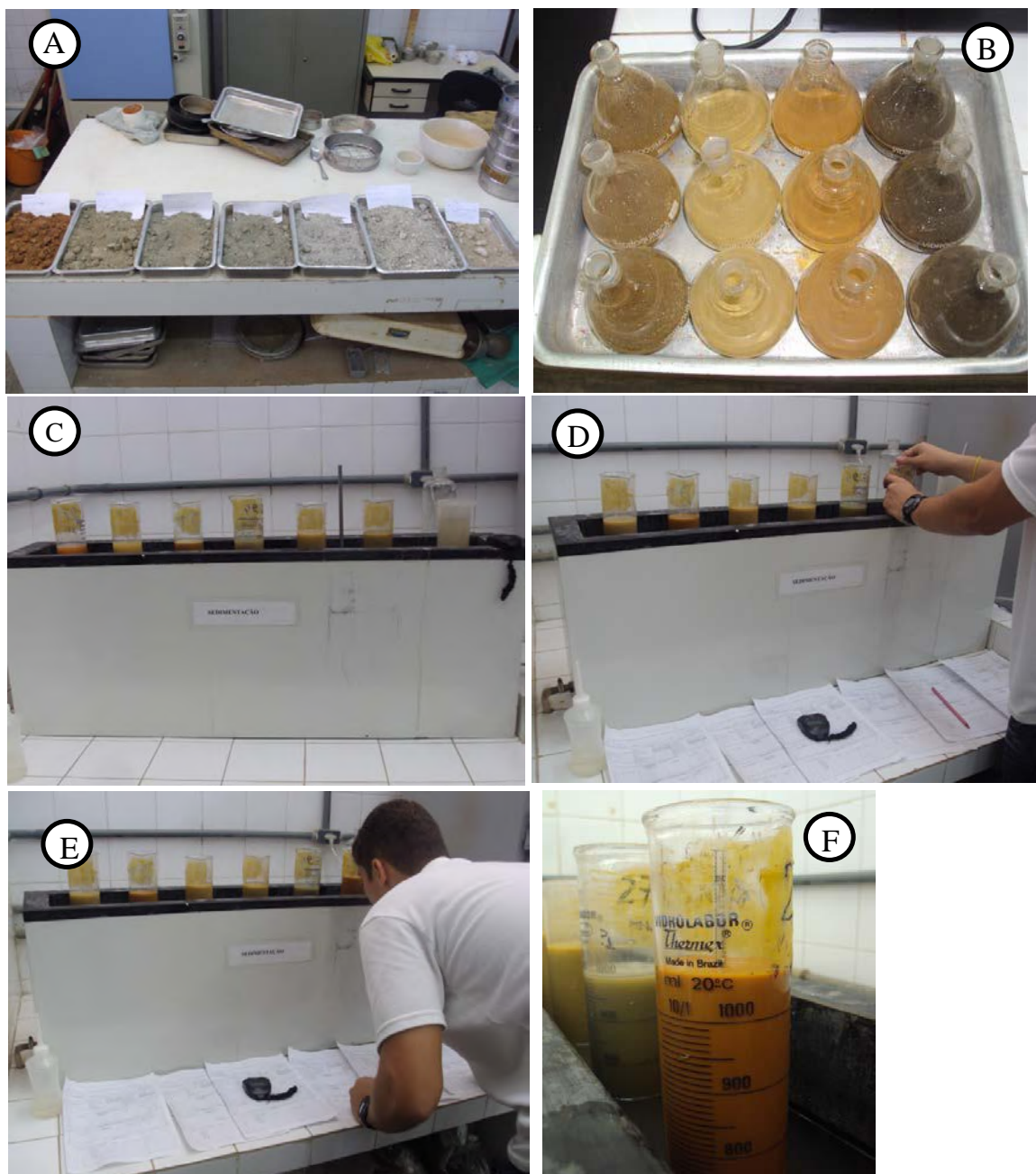


Figura 17: A) Amostras de solo secas ao ar no laboratório. B) Amostras nos picnômetros, sendo resfriadas para a realização do ensaio de densidade real dos grãos. C) Provetas no tanque de sedimentação para o início do ensaio. D) Processo de agitação da amostra durante o ensaio de sedimentação. E) Procedimento de leitura do valor indicado pelo densímetro durante ensaio de sedimentação. F) Densímetro dentro da proveta pronto para leitura.

A classificação é realizada plotando-se as porcentagens de argila, areia e silte de cada amostra, em um gráfico ternário de distribuição onde cada vértice significa 100% de uma determinada fração granulométrica. Assim cada campo no gráfico significa uma textura diferente e as amostras foram assim classificadas. Como algumas amostras apresentavam quantidades relativamente pequenas de pedregulho em sua composição, esses valores foram desconsiderados para essa classificação, pois não influenciavam muito na textura da amostra. O valor da fração pedregulho foi dividido igualmente entre as outras três frações granulométricas existentes. Para as amostras com mais de 20% de pedregulho na sua composição, não foi feita a classificação, pois esta não leva em conta a fração pedregulho para a determinação da textura. Entretanto, apenas duas amostras encontraram-se nessa situação ao longo de todos os furos.

Com isso, obtiveram-se cinco gráficos de classificação textural, pois as amostras foram plotadas separadamente de acordo com as respectivas quatro posições ao longo da encosta na qual se encontravam, além das amostras do furo SPT, na média-encosta (ver as figuras 29 a 33 no capítulo de resultados).

### 3.3.3 Métodos Empíricos

Por fim, utilizando as curvas de distribuição granulométrica elaboradas em laboratório, calculou-se o valor da condutividade hidráulica de cada amostra de maneira indireta, utilizando-se de métodos empíricos. Os métodos utilizados foram as fórmulas de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer, possibilitando assim a comparação dos resultados de laboratório com os valores obtidos através dos métodos de campo. As fórmulas foram retiradas do trabalho de Odong (2007).

#### 3.3.3.1 Fórmula de Hazen

A Fórmula de Hazen foi um dos primeiros métodos empíricos desenvolvidos para previsão da condutividade hidráulica de solos. Esta fórmula foi desenvolvida por Hazen (1892, 1911) durante alguns experimentos em que ele buscava determinar as propriedades físicas de algumas areias que seriam utilizadas como materiais filtrantes para a construção de filtros para purificação de água (CARRIER, 2003). Através desses experimentos, ele obteve o mesmo resultado que Darcy, quando concluiu que a velocidade de filtração de água era proporcional à perda de carga (DA SILVA, 2008). Assim ele verificou que a condutividade hidráulica variava de acordo com o quadrado do diâmetro dos grãos e obteve essa fórmula capaz de obter a permeabilidade saturada de areias, em que:

$$K = Cd_{10}^2$$

Onde:

$K$  = Condutividade hidráulica saturada do solo (em cm/s)

$C$  = Coeficiente de Hazen, que é um parâmetro de acordo com o tipo de solo

$d_{10}$  = Diâmetro efetivo do grão (em cm).

O coeficiente de Hazen (C) varia de acordo com o tipo de solo e a seleção das areias. Ele é em geral usado com o valor de 100, mas pode, de acordo com o autor, apresentar uma variação desde 1 até 1000 (CARRIER, 2003). Para Fetter (2004), esse valor deve ser obtido pela análise da seleção dos sedimentos segundo a tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Valor do coeficiente de Hazen de acordo com a seleção dos sedimentos (FETTER, 2004).

Material	Valor do coeficiente
Areia muito fina mal selecionada	40-80
Areia fina	40-80
Areia média bem selecionada	80-120
Areia grossa mal selecionada	80-120
Areia grossa bem selecionada	120-150

Para o presente trabalho, levando-se em conta que o material arenoso é em geral bem selecionado, sendo composto por areia média na maioria das amostras, foi adotado o valor de 100 para a realização dos cálculos.

Ainda em relação à fórmula, segundo Hazen, o diâmetro a ser usado para os cálculos é o  $d_{100}$ , que corresponde ao diâmetro no qual apenas 10% de todas as partículas da amostra são mais finas que ele, e conseqüentemente 90% de toda a amostra é mais grossa que esse valor, chamado de diâmetro efetivo de grão. Isso porque, segundo seus estudos, esse seria o diâmetro de grão que melhor representaria a resistência ao movimento e que mais se assemelhava ao diâmetro de uma areia ideal inicialmente estudada por ele. Dessa forma, foram retirados das curvas de distribuição granulométrica, os diâmetros efetivos ( $d_{10}$ ) correspondentes à cada amostra para o cálculo da condutividade hidráulica.

### 3.3.3.2 Fórmula de Kozeny-Carman

Esse método foi formulado primeiramente por Kozeny (1927), tendo sido modificado por Carman (1938, 1956) sendo chamada atualmente de equação de Kozeny-Carman (CARRIER, 2003). Trata-se de um método empírico muito utilizado e difundido atualmente para a previsão da condutividade hidráulica de solos, principalmente em materiais mais siltosos e argilosos, tendo uma acurácia bastante satisfatória.

Kozeny (1927) inicialmente mostrou que a permeabilidade de um meio poroso seria inversamente proporcional ao quadrado da superfície específica (superfície exposta ao fluido por unidade de volume) e proporcional ao cubo da porosidade. Kozeny introduziu ainda uma constante de proporcionalidade, para que fosse possível aplicar o método a qualquer meio poroso, já que essa constante leva em consideração a estrutura do meio (LISBOA, 2001).

Carman (1938, 1956) propôs algumas modificações na fórmula. Segundo Lisboa (2001) ele definiu a superfície específica como sendo a relação entre a superfície exposta ao fluido e o volume total de material sólido (e não o volume total

do meio poroso). Outra modificação foi no expoente da porosidade na fórmula. A permeabilidade não era mais proporcional ao cubo da porosidade somente.

Portanto, a Fórmula de Kozeny-Carman usada para o cálculo da condutividade hidráulica de um meio poroso neste trabalho é a seguinte:

$$K = \frac{g}{\nu} \times 8,3 \times 10^{-3} \left[ \frac{n^3}{(1-n)^2} \right] d_{10}^2$$

Onde:

$g$ = Aceleração da gravidade

$\nu$ = Viscosidade cinemática do fluido

$n$ = Porosidade

$d_{10}$ = Diâmetro efetivo de grão

O valor da porosidade ( $n$ ) foi calculado de forma indireta, também através dos dados obtidos com as curvas granulométricas, já que, segundo Vukojevic & Soro (1992) *apud* Odong (2007), o valor da porosidade pode ser deduzido de uma relação matemática com o coeficiente de uniformidade ( $U$ ) do solo, na qual:

$$n = 0,255(1 + 0,83^U)$$

Sendo que o coeficiente de uniformidade ( $U$ ) do solo é dado por:

$$U = \left( \frac{d_{60}}{d_{10}} \right)$$

Onde:

$d_{60}$ = diâmetro (em mm) no qual 60% da amostra total é mais fina que ele;

$d_{10}$ = diâmetro efetivo de grão (em mm), para o qual 10% da amostra total é mais fina que ele.

Para efetuar os cálculos, o valor adotado para a aceleração da gravidade ( $g$ ) foi de 980,7 cm/s<sup>2</sup> e para a viscosidade cinemática do fluido ( $\nu$ ), no caso a água, e foi adotado um valor de 0,0094 cm/s, que é um valor corrigido para a temperatura de 23°C, assumida neste trabalho.

Assim, os cálculos foram feitos e o valor da condutividade hidráulica ( $K$ ) foi obtido em cm/s para que fosse possível realizar uma comparação direta com os resultados dos ensaios de campo.

### 3.3.3.3 Fórmula de Breyer

A equação de Breyer expressa a condutividade hidráulica em função do coeficiente de uniformidade, e não da porosidade, como em algumas outras equações que são usadas, inclusive a Equação de Kozeny-Carman, como foi visto anteriormente. A Fórmula de Breyer é considerada mais adequada para materiais porosos com distribuição granulométrica mais heterogênea e má seleção dos grãos, com coeficiente de uniformidade variando entre 1 e 20 e diâmetro efetivo dos grãos variando entre 0,06 e 0,6 mm (ODONG, 2007).

Dessa forma, a equação de Breyer é definida como:

$$K = \frac{g}{v} \cdot C_b \cdot d_{10}^2$$

Onde:

$$C_b = 6 \times 10^{-4} \log \frac{500}{U}$$

g= Aceleração da gravidade

v= Viscosidade cinemática do fluido

d<sub>10</sub>= Diâmetro efetivo de grão

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Etapas de Campo

Os trabalhos foram divididos basicamente em etapas de campo e de laboratório, que foram desenvolvidas de forma integrada durante a pesquisa. Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através dos métodos de campo utilizados e serão apresentadas também algumas discussões pertinentes em relação a eles.

Como já citado no capítulo anterior, os principais métodos de campo utilizados neste trabalho foram: a avaliação e a descrição tátil-visual de campo das amostras retiradas dos furos SPT e dos furos à trado, os ensaios de permeabilidade *in situ* realizados pelo método de Hvorslev na zona não saturada e o *Slug Test* realizado na zona saturada, nos dois poços SPT localizados na baixa encosta. Portanto, vamos proceder agora a análise detalhada de cada um deles.

#### 4.1.1 Descrição tátil-visual das amostras

Após a coleta das amostras nos furos SPT e nas sondagens à trado, foi feita uma análise tátil-visual de campo, de forma expedita, para observar as características do solo da encosta e separar possíveis camadas com propriedades diferentes ao longo do perfil. Com base nessa descrição, notou-se que as camadas nos poços ao longo da encosta apresentam muita similaridade e continuidade. Dessa forma, foi possível correlacioná-las e compilar as descrições de forma bastante satisfatória devido à repetição de suas características.

A identificação tátil-visual mostrou três camadas de solo com características distintas ao longo da encosta. A primeira é uma camada avermelhada, que aparece em todas as posições, aproximadamente nos três primeiros metros do perfil do solo. É uma camada com maior teor de argila e/ou silte, de cor avermelhada. Os minerais predominantes e mais visíveis em campo são mica, feldspato e quartzo, além dos argilominerais (destacando-se a olho nu a caulinita), produtos da alteração intensa provocada pelo intemperismo, principalmente do tipo químico. Essa camada representa o solo residual maduro da encosta. A segunda camada, também possui grande continuidade ao longo das quatro posições onde foram realizados os furos, e se trata de uma camada acinzentada, de constituição mais arenosa, com os minerais mais visíveis, predominando quartzo, feldspato e micas, principalmente a muscovita e a biotita. Essa camada é interpretada como o solo residual jovem da encosta. A terceira camada aparece nas maiores profundidades alcançadas, desde 6 m em alguns furos a até 14 m no furo mais profundo, sempre mais próxima do nível impenetrável ao trado, mostrando sua maior resistência e a proximidade de suas características com as da rocha matriz da encosta. Essa camada é mais esbranquiçada e é vista como uma continuação ou uma gradação da camada anterior, podendo ser possivelmente a rocha muito alterada já presente nesta altura do perfil, devido à textura mais grossa que apresenta, com a presença de agregados bem maiores, que os observados anteriormente. Contém muita caulinita, que lhe confere a cor esbranquiçada. É possível notar a presença de alguns cristais maiores, de 1 a 3 cm, especialmente de quartzo e de feldspato, que podem representar

fenocristais da rocha mãe presentes no perfil, apesar da alteração que apresentam já ser avançada, principalmente nos feldspatos.

Portanto, foi possível identificar basicamente três camadas distintas de solo na encosta, apresentando uma grande continuidade e sendo assim, bastante correlacionáveis ao longo do perfil. Essa identificação foi usada como base, por exemplo, para a instalação dos permeâmetros no ensaio de Hvorslev. Buscou-se instalá-los em cada uma das três camadas identificadas para que fosse possível estimar a condutividade hidráulica de cada uma delas.

#### 4.1.2 *Slug Test*

Os testes de *slug* foram realizados na zona saturada da encosta, no furo realizado pela sondagem a percussão (SPT). O ensaio foi feito com o interesse principal de obter uma média da condutividade hidráulica no local, já que foi feito em um medidor de nível d'água e não em um piezômetro. O ensaio foi feito de forma contínua, registrando-se todas as leituras desde a colocação até o momento da retirada do *slug* do poço para que fosse possível medir a condutividade elétrica tanto na subida quanto na descida do nível d'água. Os resultados são apresentados a seguir.

Na Figura 18, o gráfico mostra todos os parâmetros medidos pelo aparelho desde que este foi ligado, antes de ser colocado no poço e iniciado o ensaio. Por isso é possível observar que a temperatura inicia a pouco mais de 20,5°C e vai caindo quando o aparelho é colocado em contato com a água mais fria que o ambiente no poço. Da mesma forma, a curva da condutividade elétrica inicia com uma subida quando o equipamento é colocado no poço.

A condutividade elétrica ao longo do ensaio é praticamente constante, ao redor de 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Quando o tarugo é retirado e passa-se a observar a recuperação do nível d'água (NA), possivelmente mobiliza-se água da formação para o interior do poço, com salinidade um pouco superior fazendo com que os valores lidos sejam ligeiramente maiores. Da mesma forma, o nível piezométrico sobe quando o slug é introduzido no poço chegando até 1458 cm aproximadamente (valor bruto, é necessário descontar a pressão atmosférica, de cerca de 900 cm na serra) e começando a cair com a recuperação do aquífero.

Após a retirada, o nível cai e inicia sua recuperação até aproximar-se de novo do nível inicial de estabilidade, em torno de 1400 cm, correspondente à lâmina de água sobre o *diver*, de aproximadamente 500 cm ou 5 m. As oscilações presentes no gráfico são justificadas devido às leituras terem sido elaboradas com um intervalo de tempo pequeno e também pelas perturbações existentes durante o ensaio e inerentes ao método, como por exemplo, durante o processo de colocação e de retirada do tarugo.



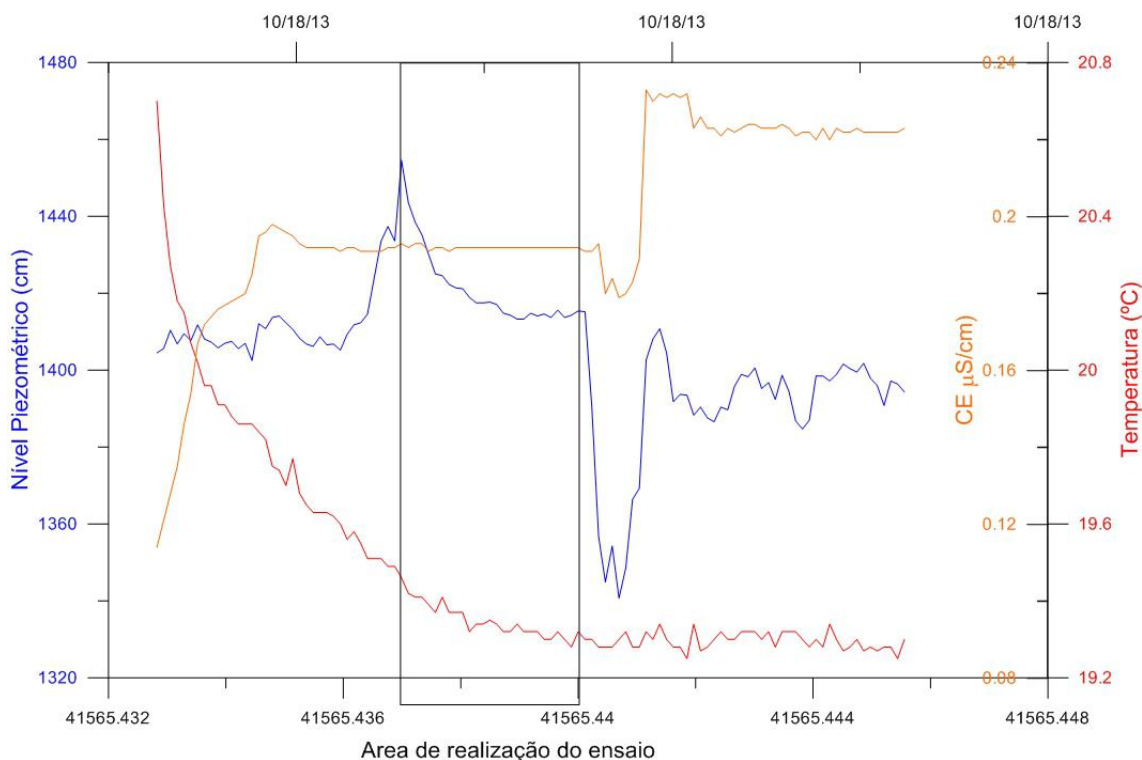


Figura 18: Parâmetros medidos durante o Slug Test no Poço MNA. O retângulo preto destaca a fase de recuperação do nível após a inserção do slug e que foi usada para o cálculo da condutividade hidráulica. Linha superior (amarela) representa a condutividade elétrica (em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), linha média (azul) representa o Nível Piezométrico (em cm) e a linha inferior (vermelha) representa a Temperatura (em  $^{\circ}\text{C}$ ).

Através do gráfico de variação do NA, é possível monitorar e medir a resposta do aquífero, calculando-se a condutividade hidráulica da formação. Na Figura 19 a seguir, é mostrado o gráfico de rebaixamento do NA em relação ao tempo, que foi usado para o cálculo da condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev. O intervalo de queda total do NA ( $y_0$ ) foi de 19,18 cm, obtendo-se um valor de  $K = 0,01861 \text{ cm/s}$ . Já na figura 20, mostra-se o gráfico de recuperação do NA que foi utilizado para a solução de Bouwer-Rice. O intervalo de queda do nível d'água corresponde aproximadamente ao retângulo preto indicado na Figura 18. O intervalo total de queda ( $y_0$ ) foi de 39,41 cm e o valor de condutividade hidráulica obtido para o aquífero pelo método de Bouwer-Rice foi de  $0,02871 \text{ cm/s}$ .

Esse resultado, segundo Fetter (2004), pode ser considerado como uma média representativa da área que foi investigada, porém esses resultados devem ser tratados de forma relativamente cautelosa, para fins de comparação com outros métodos que foram utilizados. Como foram executados em um medidor de nível d'água, ranhurado nos 12 m de sua extensão, são apenas valores médios que levam em conta todas as diferentes camadas existentes nesse intervalo.

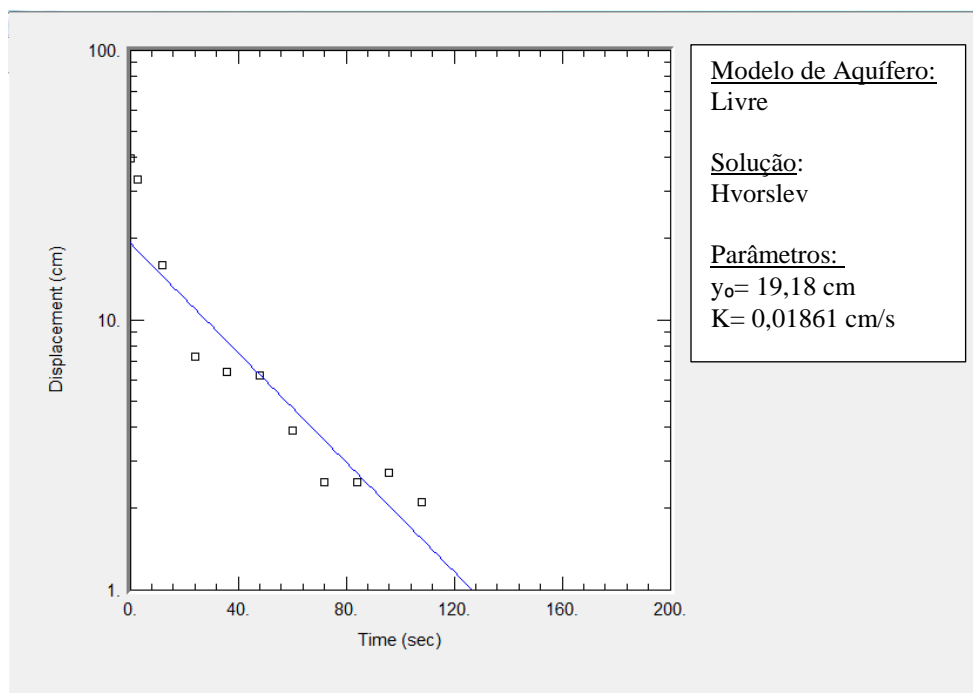


Figura 19: Gráfico do rebaixamento do nível d'água em relação ao tempo, do poço MNA. Solução feita pelo método de Hvorslev.

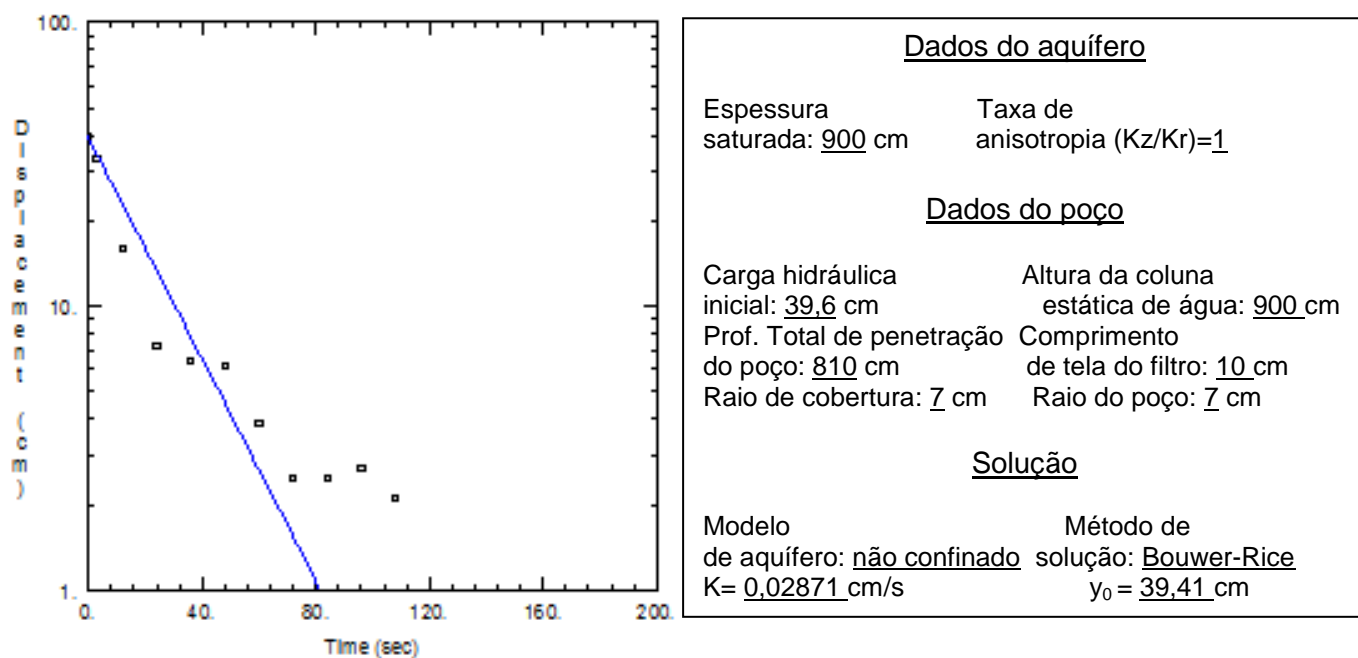


Figura 20: Gráfico do rebaixamento do nível d'água em relação ao tempo, do poço MNA. Solução feita pelo método de Bouwer-Rice.

### 4.1.3 Ensaio de Permeabilidade *in situ* na zona não saturada

Os ensaios de permeabilidade *in situ* foram ferramentas muito importantes no conhecimento das propriedades do substrato da encosta, pois quando o teste é realizado no campo ele preserva integralmente as estruturas do solo que são muito significativas na determinação de parâmetros tão variáveis e sensíveis como é o caso da condutividade hidráulica. Dessa forma, os ensaios *in situ* foram considerados os mais representativos para a determinação da permeabilidade do solo na encosta.

Os ensaios foram realizados na zona não saturada através da metodologia de Hvorslev, como já foi explicado no capítulo anterior. Os permeômetros foram instalados em diferentes profundidades em quatro posições diferentes ao longo da encosta, fora da cicatriz de deslizamento. Na Figura 21, pode-se observar, em planta, a localização das quatro posições onde foram instalados os permeômetros, para a realização dos ensaios, que são as mesmas onde foram realizados os furos de sondagem a trado. Dessa forma, foi possível obter os valores de condutividade hidráulica para as diferentes camadas que compõem o perfil de solo da área em diferentes locais da encosta.



Figura 21: Localização dos pontos de instalação dos permeômetros na encosta.

A figura 22, a seguir, mostra, de forma esquemática, como foi feita a instalação dos permeômetros, em cada posição ao longo da encosta. Como já foi

explicado no capítulo da metodologia, os poços foram perfurados através de sondagem à trado e não existe revestimento nas paredes do furo. Ali foram colocados os permeâmetros, fabricados com um tubo de PVC ranhurado nos últimos 30 cm, para permitir a saída da água e a realização do ensaio na camada de solo desejada. Em cada furo, foram instalados no máximo dois permeâmetros, de modo a garantir a segurança dos ensaios. Além disso, em cada profundidade onde havia um permeâmetro instalado, foi colocado um selo de bentonita, acima do trecho ranhurado do tubo de PVC, para isolar aquele trecho e para que a água de outras profundidades não interferisse no ensaio que era feito abaixo.

A figura 22 ilustra também, em escala, a profundidade exata e a camada de solo em que se encontra cada permeâmetro. A definição do tipo de solo (colúvio ou saprolito) foi feita com base nas amostras que foram retiradas continuamente durante a execução dos furos e com base nos ensaios granulométricos feitos com as mesmas, em laboratório.

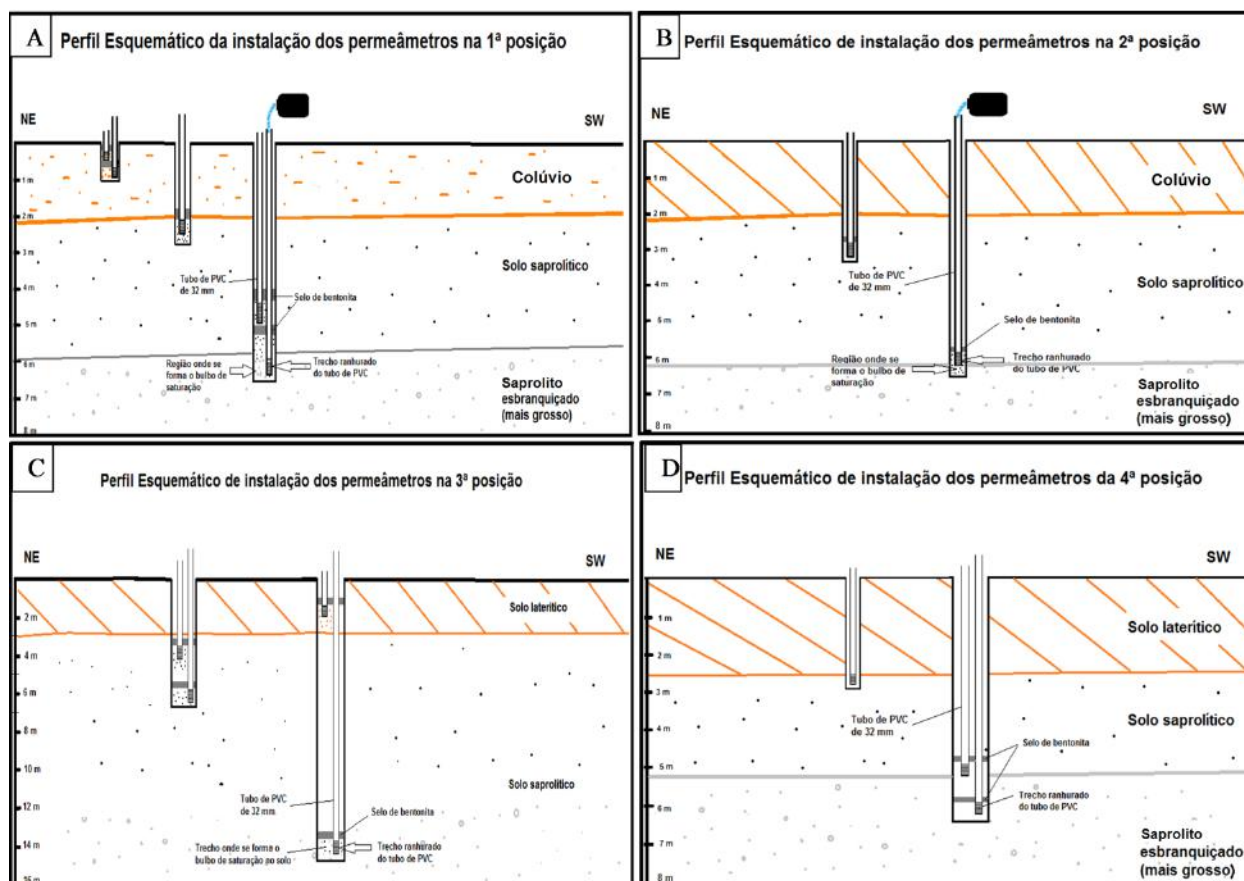


Figura 22: Perfis Esquemáticos de instalação dos permeâmetros ao longo da encosta, ilustrando a profundidade de instalação e o tipo de solo no local. A) Perfil Esquemático da 1ª posição; B) 2ª posição; C) 3ª posição e D) 4ª posição.

Na tabela 2 a seguir, seguem os resultados da condutividade hidráulica obtida em cada permeâmetro, de acordo com a posição de sondagem na encosta e sua respectiva profundidade, bem como do tipo de solo que esse resultado representa.

Tabela 2: Resultados de condutividade hidráulica na zona não saturada pelo método de Hvorslev.

Permeâmetro	Profundidade (m)	Cond. Hidráulica (cm/s)	Tipo de solo
Posição 1	0,49	$1,10 \times 10^{-4}$	Colúvio
Posição 1	0,95	$6,10 \times 10^{-4}$	Colúvio
Posição 1	2,44	$4,10 \times 10^{-5}$	Saprolito
Posição 1	4,85	$2,10 \times 10^{-5}$	Saprolito
Posição 1	6,30	$2,10 \times 10^{-5}$	Saprolito
Posição 2	3,11	$3,50 \times 10^{-5}$	Saprolito
Posição 2	6,19	$2,50 \times 10^{-5}$	Saprolito
Posição 3	1,95	$1,10 \times 10^{-5}$	Colúvio
Posição 3	4,18	$1,10 \times 10^{-5}$	Saprolito
Posição 3	6,50	$1,50 \times 10^{-5}$	Saprolito
Posição 3	14,20	$2,50 \times 10^{-5}$	Saprolito
Posição 4	2,81	$4,10 \times 10^{-5}$	Saprolito
Posição 4	5,21	$4,10 \times 10^{-5}$	Saprolito
Posição 4	6,23	$3,50 \times 10^{-5}$	Saprolito
<b>Valor médio</b>		<b><math>2,44 \times 10^{-4}</math></b>	<b>Colúvio</b>
		<b><math>2,72 \times 10^{-5}</math></b>	<b>Saprolito</b>

Observando os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica apresentados na tabela 2, verifica-se primeiramente, que não existe uma grande variação espacial dos valores ao longo da encosta. Inicialmente, através da descrição tátil-visual das amostras, foi feita uma divisão conceitual do solo em três camadas distintas e buscou-se instalar o permeâmetros em três profundidades diferentes, a fim de obter a condutividade hidráulica dessas camadas. Essa divisão foi realizada de acordo com a mudança de textura que se via durante a perfuração dos poços e a análise tátil-visual das amostras que se obtinha. Porém, notou-se que a camada mais arenosa da encosta não apresenta muitas variações de permeabilidade conforme a profundidade vai aumentando, e pode-se assim

considerar as variações visuais que foram detectadas como uma gradação para camadas com texturas mais grossas e menos alteradas do perfil.

A permeabilidade das camadas se comporta de forma bem homogênea durante os perfis das quatro posições. A única variação que se dá é apenas no que diz respeito à profundidade do colúvio nos primeiros metros do perfil e mesmo assim é uma variação pequena. Geralmente, o solo coluvionar aparece nos primeiros 2 a 2,50 m de profundidade dando lugar ao solo saprolítico logo depois, solo este que se comporta de forma relativamente gradacional e homogênea em todos os perfis. Apenas na sondagem da 3ª posição, verificou-se um colúvio um pouco mais espesso, chegando a até 4 m de profundidade, verificado através das amostras retiradas da sondagem e do ensaio de granulometria.

Tendo isso em conta, podemos concluir que os valores de permeabilidade obtidos podem ser considerados como bastante representativos de cada camada de solo que eles representam. Foi calculado ainda um valor médio, através da média aritmética de todos os ensaios, que pode representar satisfatoriamente o valor da condutividade hidráulica daquela respectiva camada de solo da encosta.

Portanto, podemos afirmar que, através dos ensaios de permeabilidade *in situ* que foram realizados, os primeiros dois a três metros do perfil de solo apresentam uma condutividade hidráulica da ordem de grandeza de  $10^{-4}$  cm/s, com um valor médio de  $2,44 \times 10^{-4}$  cm/s, sendo este solo, de acordo com as características texturais observadas, denominado de solo coluvionar da encosta. A partir daí, o solo torna-se bem menos argiloso, apresenta maior conteúdo de areia, geralmente areia média, bem selecionada, e foi tratado como um solo saprolítico, que apresenta características próximas da rocha cristalina que lhe deu origem. A condutividade hidráulica nesse solo é da ordem de grandeza de  $10^{-5}$  cm/s, apresentando um valor médio de  $2,72 \times 10^{-5}$  cm/s, de acordo com os ensaios realizados.

Diferentemente do esperado, o solo mais argiloso (colúvio) apresentou valores de permeabilidade maiores que os solos mais arenosos, de origem saprolítica, que se encontram nas profundidades maiores ao longo do perfil. Essa inversão de valores observada pode ser explicada exatamente pela natureza laterítica do solo mais argiloso. Esse tipo de solo, em geral, encontra-se mais tempo exposto ao intemperismo, sofrendo um intenso processo de lixiviação e de retirada dos íons mais solúveis, concentrando os compostos mais insolúveis, principalmente os óxidos de ferro, alumínio e manganês. A concentração desses compostos provoca a formação de agregados no solo, devido à existência de cargas elétricas positivas e negativas entre as partículas, que as une entre si. Assim, apesar de apresentar grande quantidade de argila e silte, formam-se grãos de diâmetro maior, geralmente na fração areia e, com isso, o solo se comporta como se possuísse uma composição granulométrica mais grossa, em geral como areia fina, ou areia siltosa.

Esse é o chamado processo de laterização do solo e foi interpretado como o processo responsável pelos valores atípicos de permeabilidade encontrados através dos ensaios conduzidos. Essa explicação é corroborada pelos ensaios de caracterização granulométrica com e sem defloculante que foram feitos. Na comparação que foi realizada entre os dois métodos, na seção 4.3.2 deste trabalho, será mais bem explicada essa afirmação.

Comparando ainda esses valores de condutividade hidráulica, obtidos através dos ensaios, com valores existentes na literatura, tanto o colúvio, quanto o saprolito, possuem em linhas gerais, valores de condutividade hidráulica típicos de areia siltosa ou areia fina, já que possuem um K médio de  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  cm/s. Segundo a tabela de valores de condutividade hidráulica de Fetter (2001) *apud* Salgueiro

(2005), esses materiais possuem valores de  $K$  variando entre  $10^{-3}$  e  $10^{-5}$  cm/s. De uma maneira geral, pode-se dizer que essa classificação condiz com as características do material que foi identificado ao longo da encosta, principalmente o material das camadas mais superficiais. Tais valores de permeabilidade classificam os solos estudados, de acordo com a literatura, como solos de baixa permeabilidade (Terzaghi & Peck *apud* Lambe & Whitman, 1969).

Verifica-se ainda, que existe, de alguma forma, uma descontinuidade hidráulica entre essas duas camadas de solo, logo nos primeiros metros do perfil da encosta, existindo uma camada mais permeável que capeia uma camada mais arenosa, porém menos permeável. Essa possível descontinuidade pode ter contribuído para o deslizamento que ocorreu, já que este foi um deslizamento raso, localizado nos primeiros metros do solo da encosta.

## **4.2 Etapas de Laboratório**

As principais atividades de laboratório desenvolvidas nessa pesquisa foram os ensaios de caracterização granulométrica, como já comentado na etapa de metodologia. Através dos dados de caracterização granulométrica produziram-se todos os outros resultados: a classificação do solo através do Triângulo Textural e calculou-se a condutividade hidráulica de forma indireta, por métodos empíricos através das Fórmulas de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer. Os resultados e discussões são apresentados a seguir.

### **4.2.1 Curvas de Caracterização Granulométrica**

No total foram 56 amostras encaminhadas ao laboratório, tendo sido feitos ensaios com e sem defloculante, para cada uma delas, totalizando assim 112 ensaios. Por ser um número muito grande de amostras e conseqüentemente de curvas granulométricas geradas, será mostrado aqui o gráfico da sondagem 1, como exemplo representativo das curvas que foram geradas. Na Figura 23, são apresentadas todas as curvas granulométricas obtidas pelo método com defloculante e na Figura 24, as curvas obtidas utilizando o métodos sem defloculante.

Em todas as sondagens, observou-se um padrão semelhante a esse, com as amostras nos primeiros dois a três metros, apresentando um alto teor de silte e argila em sua composição. A partir daí, com o aumento da profundidade, o solo se torna cada vez mais arenoso, e as curvas se apresentam mais abaixo no gráfico. Quando observa-se o padrão das curvas obtidas pelo método sem defloculante (Figura 24), verifica-se que o teor de silte e argila é bem menor nos primeiros metros do perfil, do que o observado no gráfico das curvas com defloculante. Isto se dá devido ao fenômeno de laterização que ocorre no solo. Esse processo resulta na formação de macroagregados entre as partículas do solo, fazendo com que este assumira um comportamento granulométrico mais grosso no ensaio, em relação ao que é observado no método com defloculante. O solo em geral se comporta como areia fina ou areia siltosa.

As curvas individuais de cada amostra são apresentadas integralmente no Anexo A deste trabalho. Cada gráfico mostra a curva obtida através dos métodos com e sem defloculante, de cada amostra selecionada para o ensaio. As amostras

estão identificadas de acordo com a sondagem a que pertencem e a profundidade em que foram retiradas. As sondagens estão identificadas pelas letras ST-01 (Sondagem a trado 01 que equivale à 1ª posição) até ST-04 (sondagem a trado 04 que equivale à 4ª posição), além da sondagem denominada SPT (sondagem a percussão). Para verificar a localização das sondagens na encosta basta ver novamente a Figura 13.

Além disso, são colocadas também no anexo, gráficos das curvas agrupadas de acordo com a posição de sondagem para os dois métodos de ensaio (com e sem defloculante).

### Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos

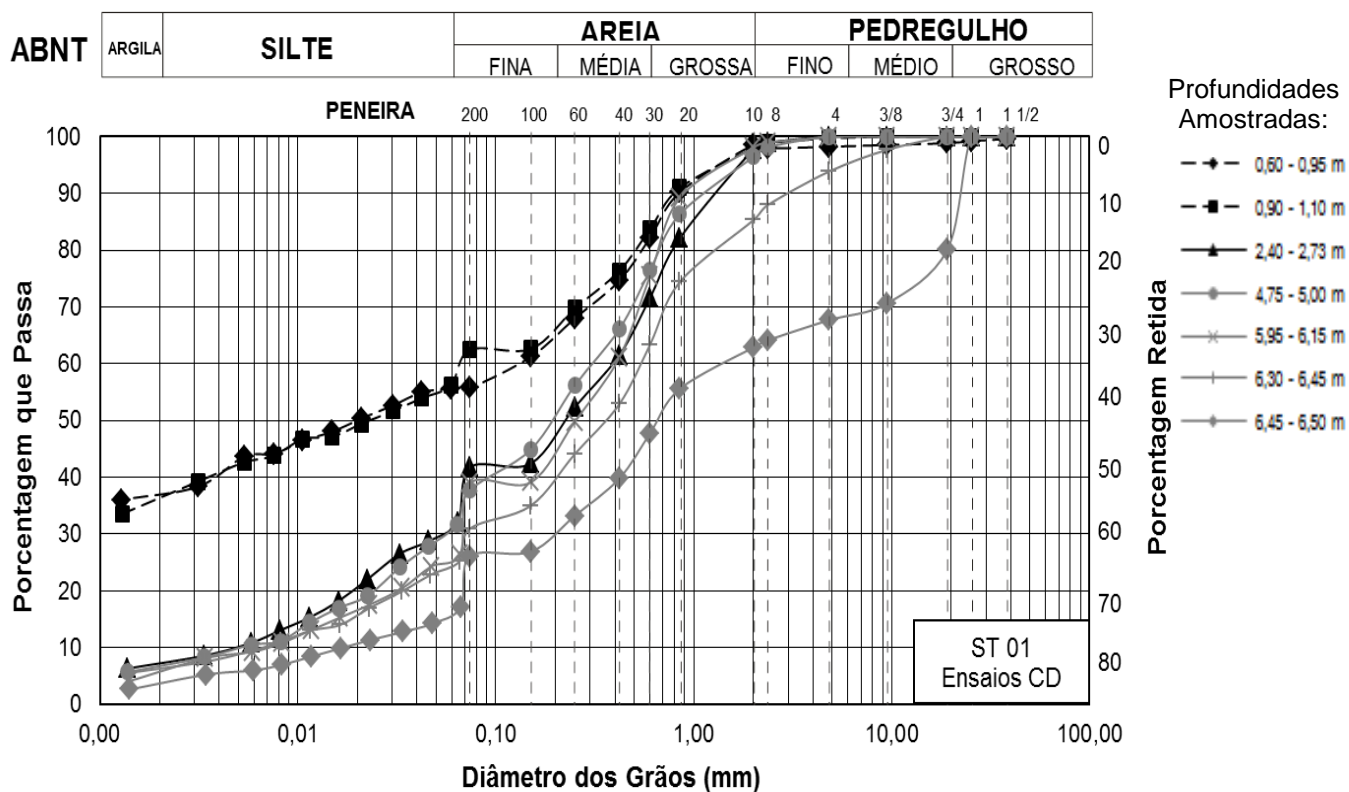


Figura 23: Gráfico das curvas granulométricas representativas da 1ª posição de sondagem (ST-01), obtidas pelo método de ensaio com defloculante.



## Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos

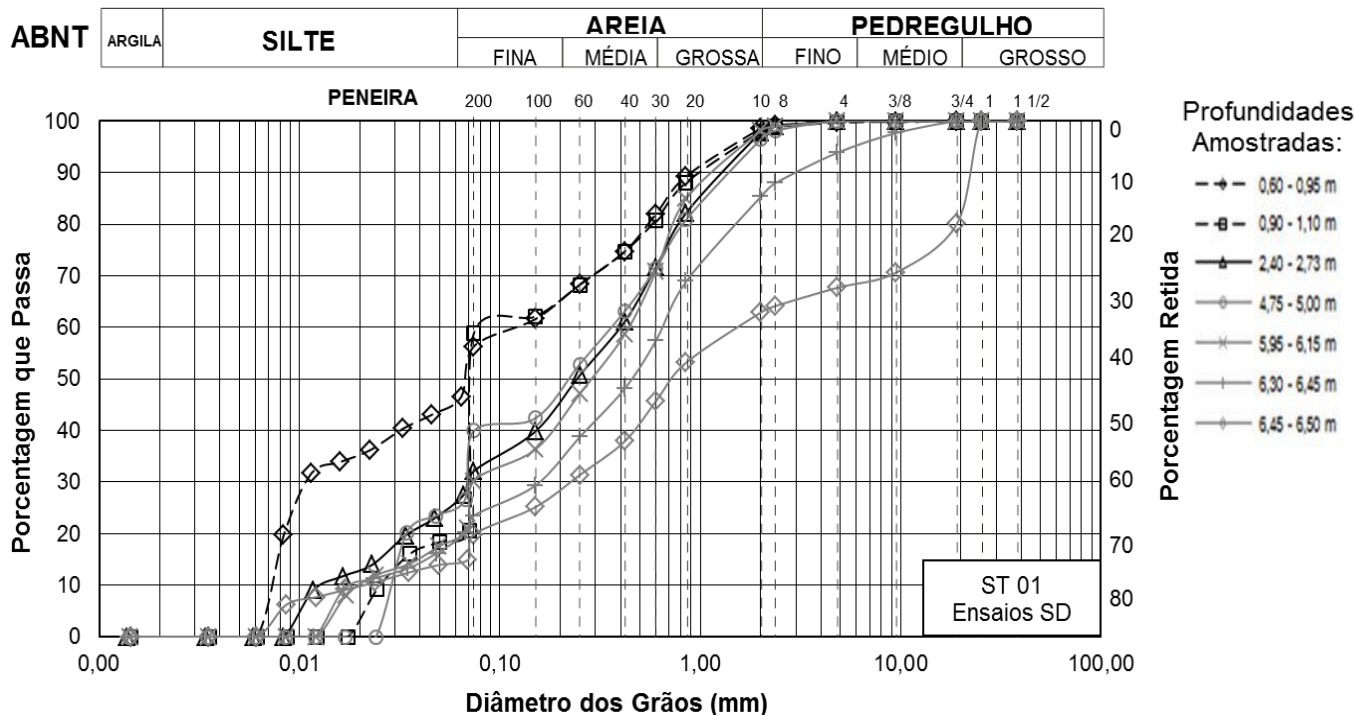


Figura 24: Gráfico das curvas granulométricas representativas da 1ª posição de sondagem (ST-01), obtidas pelo método de ensaio sem defloculante.

### 4.2.1.1 Gráficos de barra de distribuição granulométrica das amostras

A partir das curvas granulométricas individuais, elaborou-se uma tabela contendo as porcentagens de cada fração granulométrica para cada amostra, separadas respectivamente por furo. A partir dessa tabela foram confeccionados gráficos da profundidade pela porcentagem de cada fração granulométrica presente nas amostras. Os gráficos foram gerados um para cada posição de sondagem. As posições de onde foram retiradas as amostras são as mesmas em que foram realizados os ensaios de permeabilidade (Ver figura 21), tratados na seção 4.1.3. As amostras foram coletadas durante a realização das sondagens e selecionadas de acordo com a sua representatividade ao longo do perfil. Com isso, foram gerados cinco gráficos, sendo um para as amostras do furo SPT e os demais correspondendo às respectivas quatro posições onde foram feitos os furos à trado.

Observa-se nos gráficos das figuras 25 a 29, a partir da variação da granulometria ao longo dos perfis verticais realizados, que existe uma clara divisão das camadas do solo da encosta em relação à profundidade que se encontra a amostra. Nota-se claramente que nos primeiros 2 a 3 metros do perfil, nos gráficos da 1ª até a 4ª posição, aparece uma camada de solo com alto teor de argila e silte, chegando a totalizar por volta de 50% da composição das amostras ou até um pouco mais. Isso mostra que existe ali uma camada superficial já bastante alterada pelos agentes intempéricos e que hoje se encontra muito rica em componentes finos, especialmente argila. Esta observação está de acordo com a descrição tátil-visual apresentada anteriormente dessa camada, de cor avermelhada no campo e

muito rica em silte e argila. Entende-se esta camada como o solo residual maduro da encosta. É, portanto, uma camada com uma espessura relativamente pequena em relação ao perfil da encosta, mas provavelmente muito importante para a dinâmica hidrogeológica da mesma, devido às suas características.

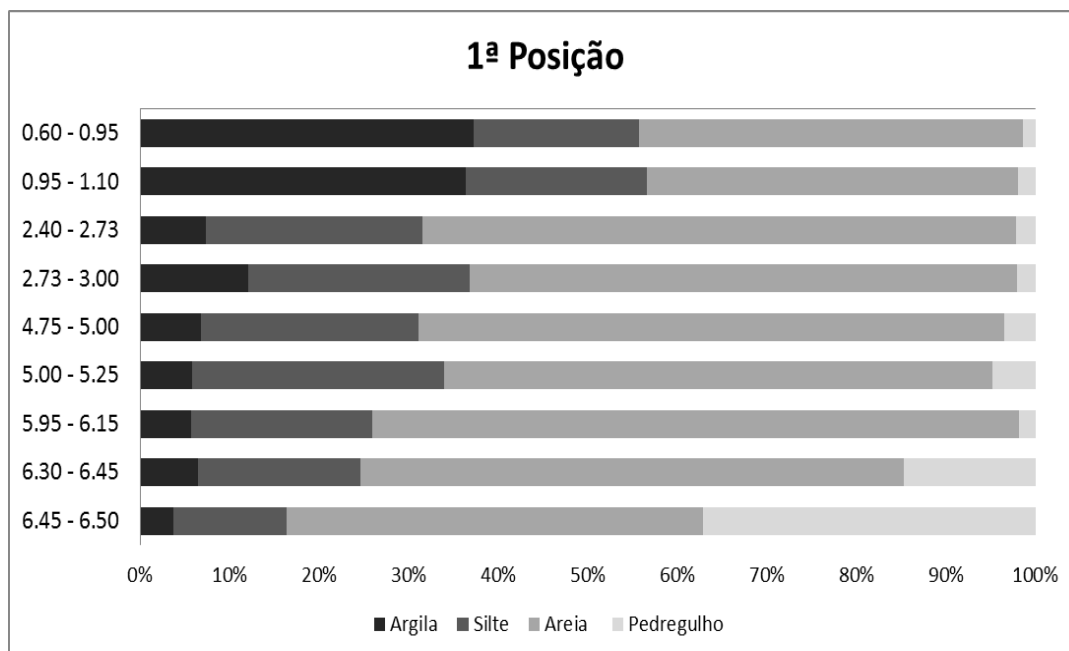


Figura 25: Gráfico da distribuição de cada fração granulométrica em relação à profundidade das amostras que foram analisadas para o furo da 1ª Posição.

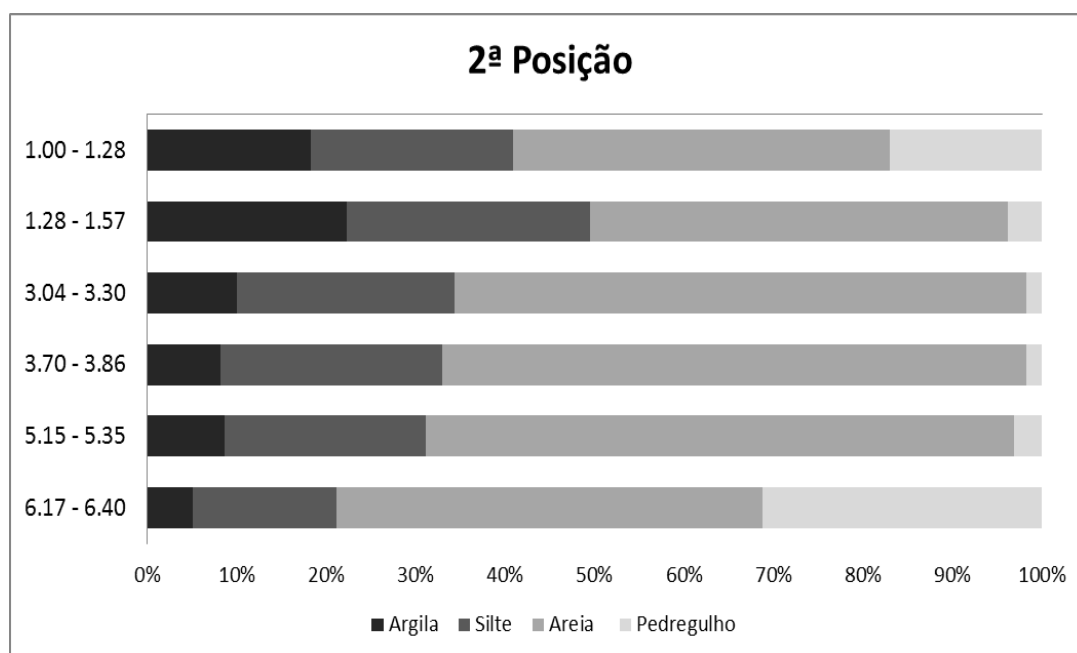


Figura 26: Gráfico da distribuição de cada fração granulométrica em relação à profundidade das amostras para o furo da 2ª Posição.

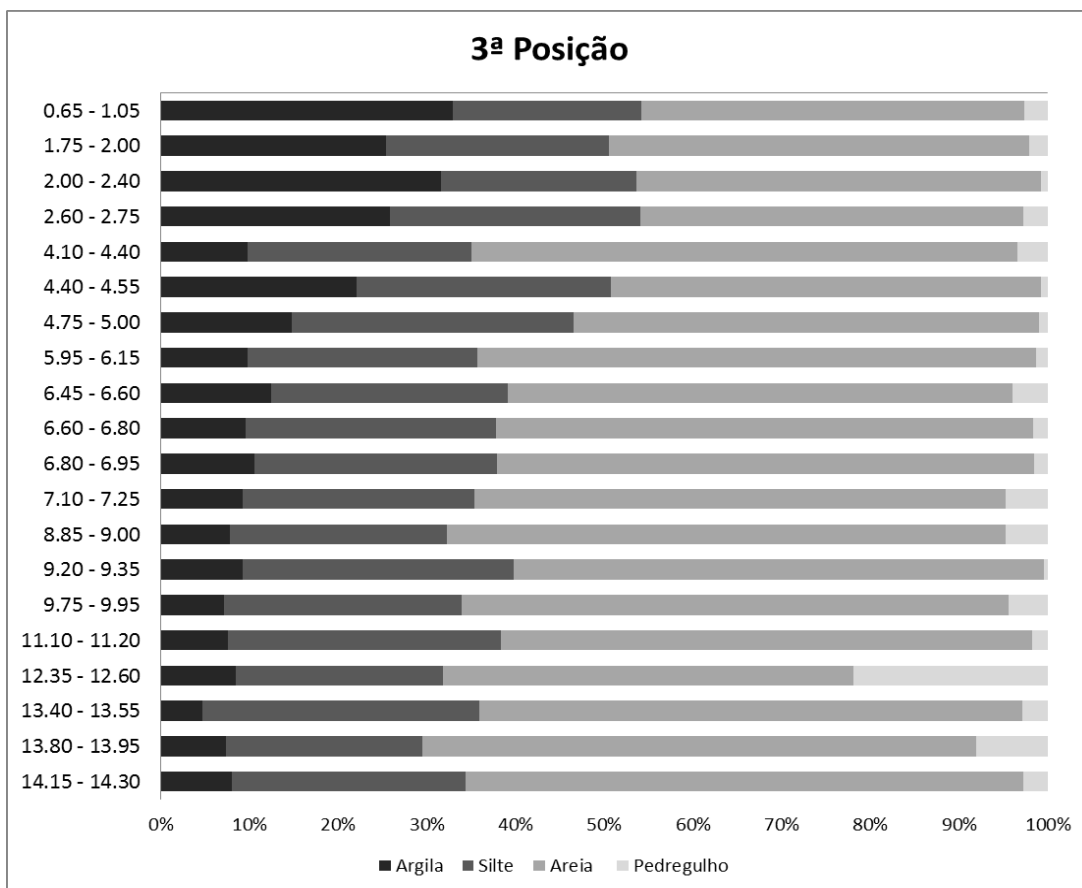


Figura 27: Gráfico da distribuição de cada fração granulométrica em relação à profundidade das amostras para o furo da 3ª Posição.

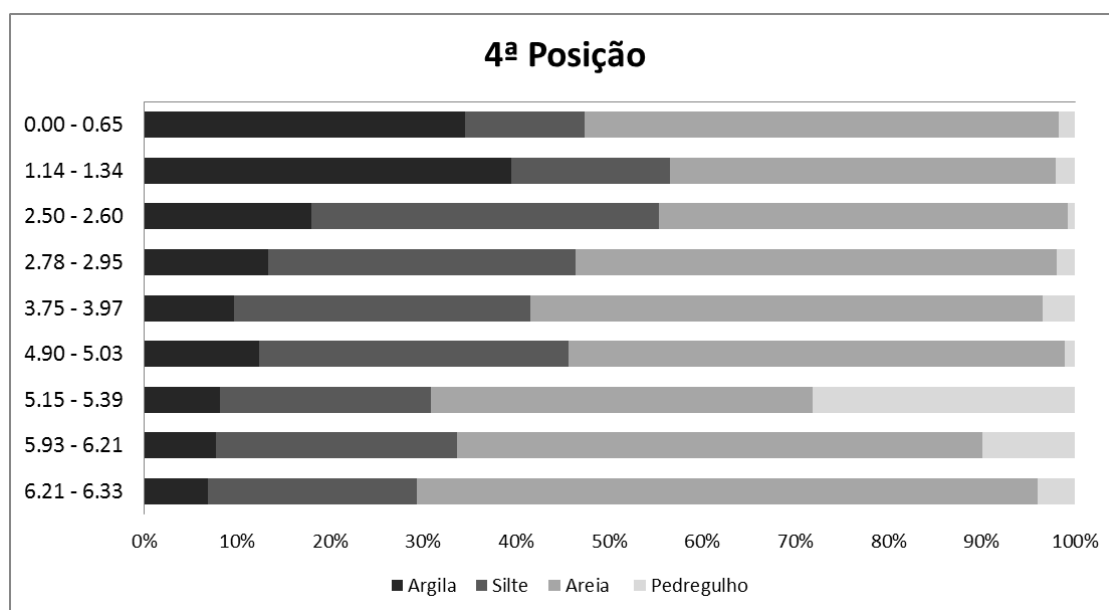


Figura 28: Gráfico da distribuição de cada fração granulométrica em relação à profundidade das amostras para o furo da 4ª Posição.

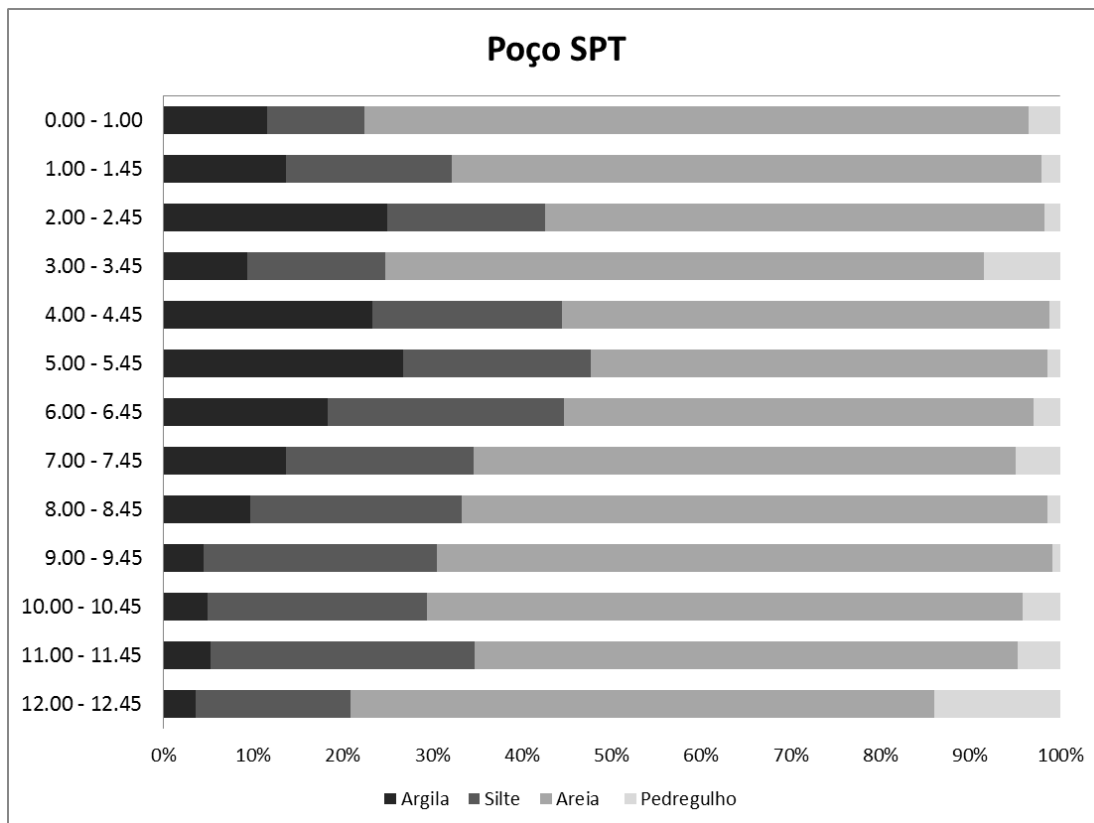


Figura 29: Gráfico da distribuição de cada fração granulométrica em relação à profundidade das amostras para o furo SPT.

A partir daí, vê-se uma gradação das camadas em todas as quatro posições de sondagem, com uma diminuição do teor de argila e um aumento da areia, sendo que o silte se mantém praticamente com a mesma contribuição na composição total das amostras. Essa camada corresponde à camada mais acinzentada e bastante arenosa, descrita anteriormente, e ela se estende por volta dos 6 m de profundidade claramente nos gráficos da 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> posições. Na 3<sup>a</sup> posição, no furo mais profundo que foi feito com uso do trado, essa camada tem maior extensão, indo até por volta dos 12 m de profundidade.

Por fim, começa a haver uma contribuição maior da fração pedregulho nas camadas mais profundas dos perfis. Aparecem amostras com porcentagens de 10% até 20% dessa fração granulométrica mais grossa a partir dos 6 m de profundidade nas posições 1, 2 e 4 e a partir dos 12,35 m na posição 3. Isso pode indicar uma gradação do solo para camadas menos intemperizadas, com grãos mais grossos e de características mais próximas da rocha matriz.

No poço aberto pelo método de sondagem SPT, essa configuração apresenta algumas variações. Percebe-se que existe uma camada com um teor de argila e silte significativo até por volta de 2,45 m, que começa a gradar para uma camada mais arenosa e logo depois observa-se de novo uma camada argilo-siltosa significativa entre 4,00 e 6,45 m. O nível freático foi encontrado nessa camada, ficando sempre em torno de 6,15 m de profundidade com pequenas variações ao longo do tempo de estudo.

Logo depois, ocorre novamente uma gradação para camadas mais arenosas, com diminuição grande do teor de argila e de silte, com o aumento da fração areia,

estendendo-se até por volta dos 10 m de profundidade. A partir daí, como nos furos anteriores, existe um aumento da fração mais grossa (pedregulho) nas profundidades maiores do perfil.

Portanto, a partir das análises granulométricas que foram realizadas com as amostras e dos gráficos de barra acima analisados, foi possível obter um perfil geológico para cada posição de sondagem. A partir daí foi elaborada uma seção geológica esquemática (Figura 30), correlacionando todas as sondagens que foram elaboradas, com o objetivo de facilitar a visualização das posições dos furos ao longo da encosta, além de fornecer uma melhor caracterização do substrato geológico que foi analisado e descrito ao longo da área de estudo. Também foi possível posicionar o nível d'água de forma conceitual, nessa figura, através da medição que foi realizada no piezômetro instalado.

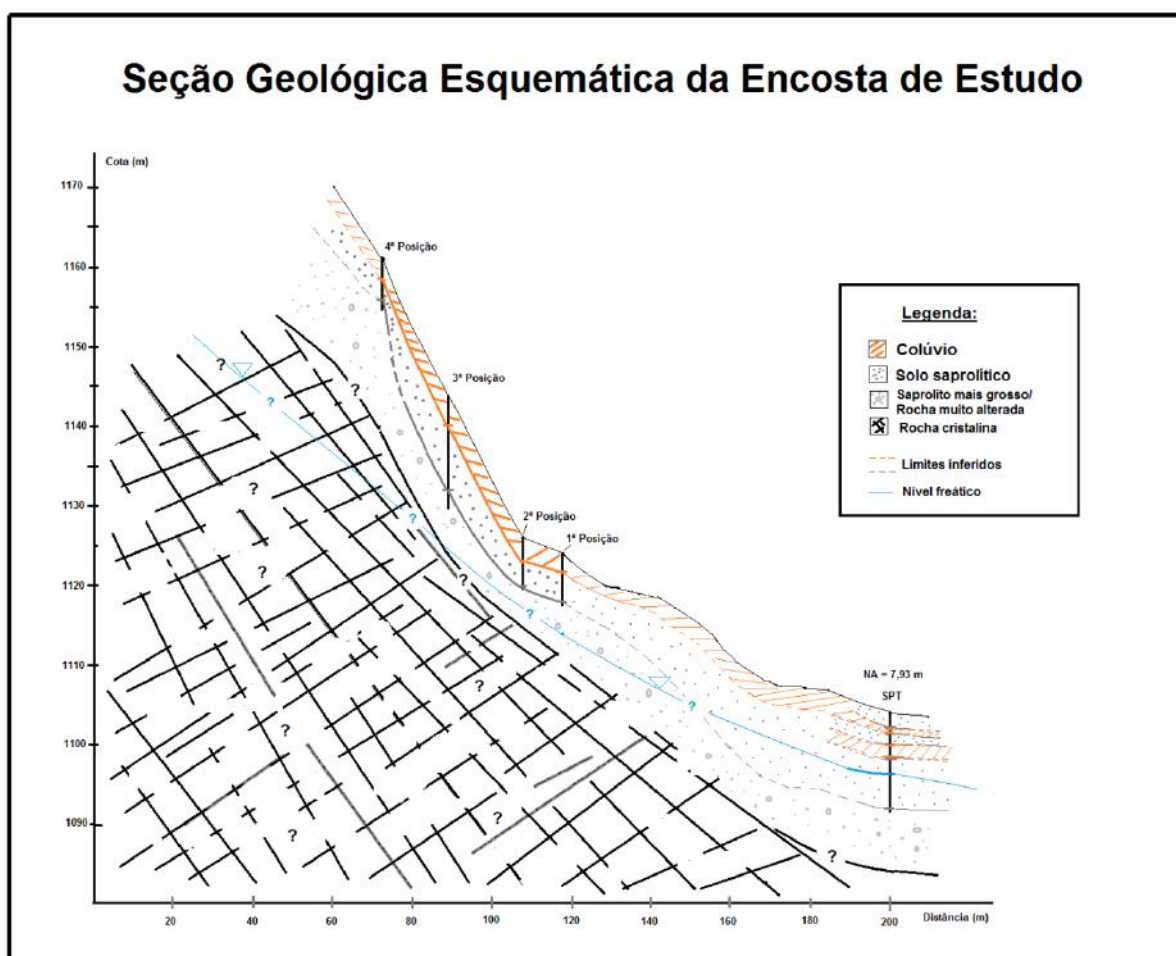


Figura 30: Seção geológica esquemática da encosta, correlacionando as sondagens.

#### 4.2.2 Classificação Textural

A classificação textural das amostras foi elaborada utilizando-se o Triângulo Textural do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 1987), que é bastante utilizado e é muito semelhante ao método da Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (LEMOS & SANTOS, 1996)

Sendo assim, são apresentados abaixo, os gráficos obtidos, separados de acordo com os cinco poços dos quais foram retiradas amostras. A interpretação e as discussões acerca dos resultados são apresentadas a seguir.

Interpretando os gráficos das figuras 31 a 35, observa-se que, como já foi constatado nas análises dos gráficos de barra, os primeiros dois a três metros do perfil apresentam uma camada de solo com uma textura mais argilosa, derivada do seu maior tempo de exposição ao intemperismo e da intensa lixiviação e alteração sofrida por essa camada. A partir daí, nota-se, mais uma vez, que o solo começa a apresentar uma textura mais arenosa, típica de solos derivados de rocha granítica ou gnáissica, como é o caso do maciço em estudo, apresentando características mais próximas da rocha matriz.

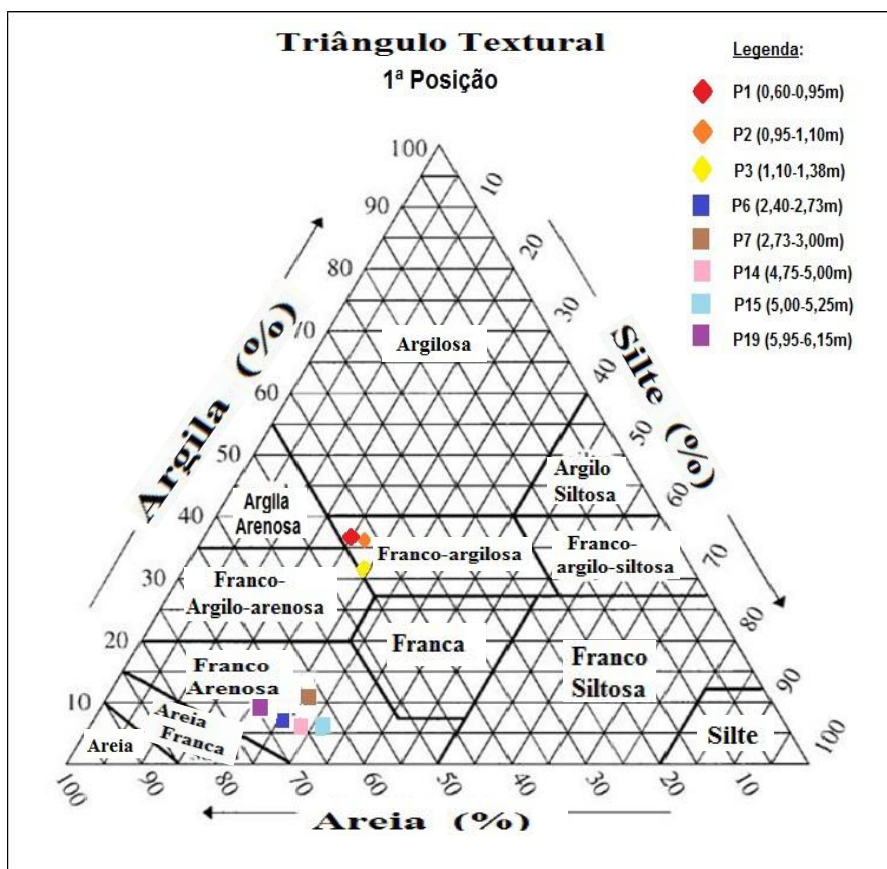


Figura 31: Diagrama triangular de classificação textural da 1ª posição.

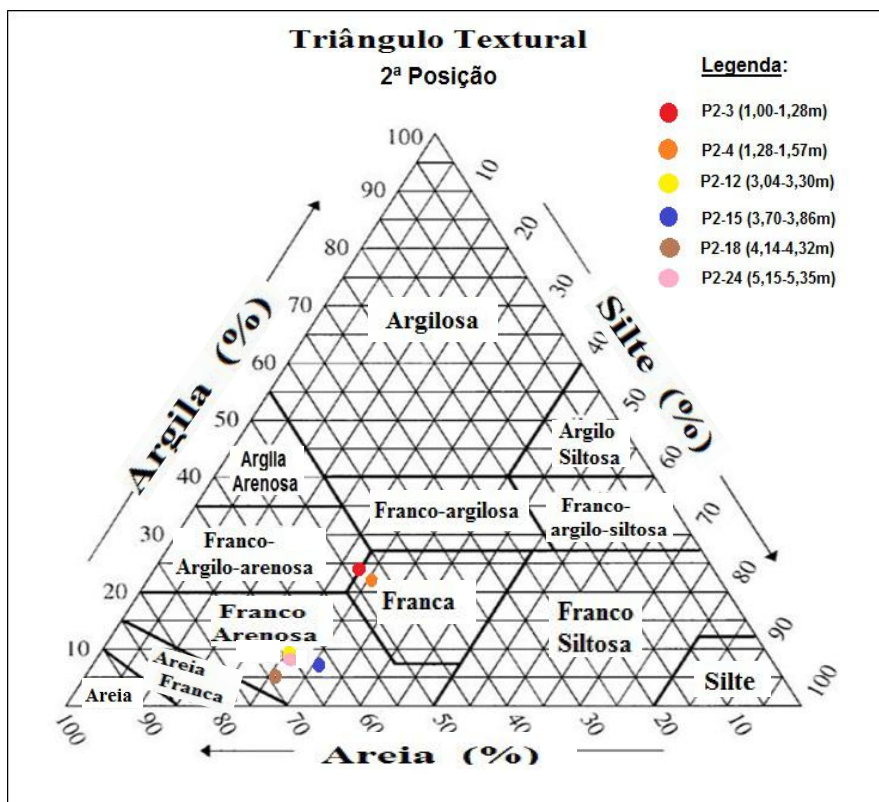


Figura 32: Diagrama triangular de classificação textural da 1ª posição.

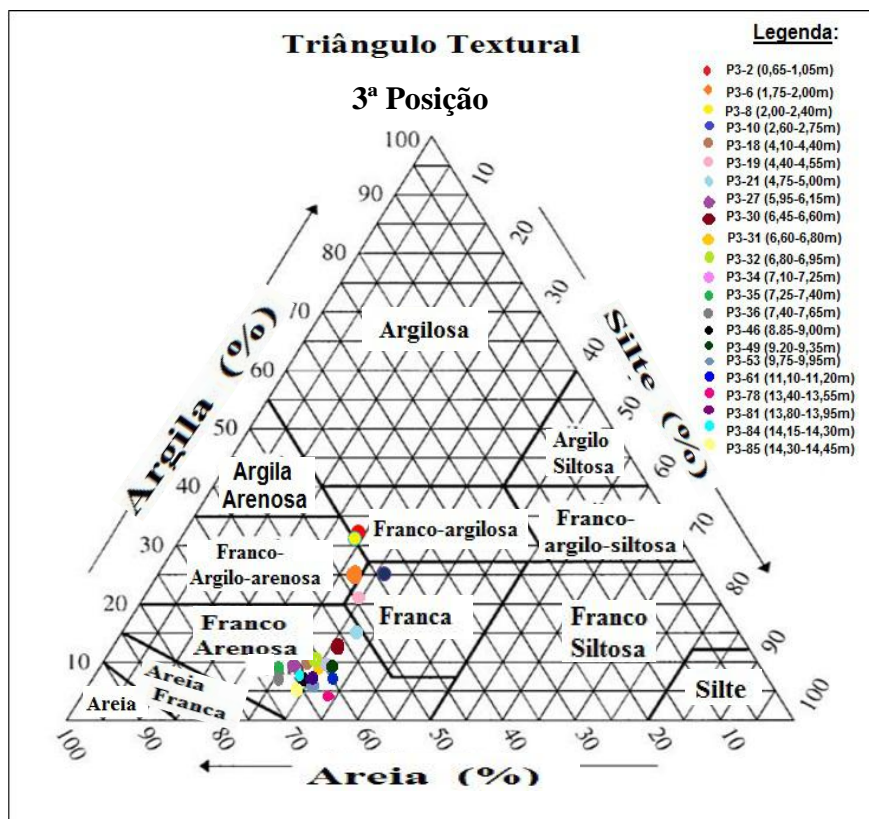


Figura 33: Diagrama triangular de classificação textural da 3ª posição.

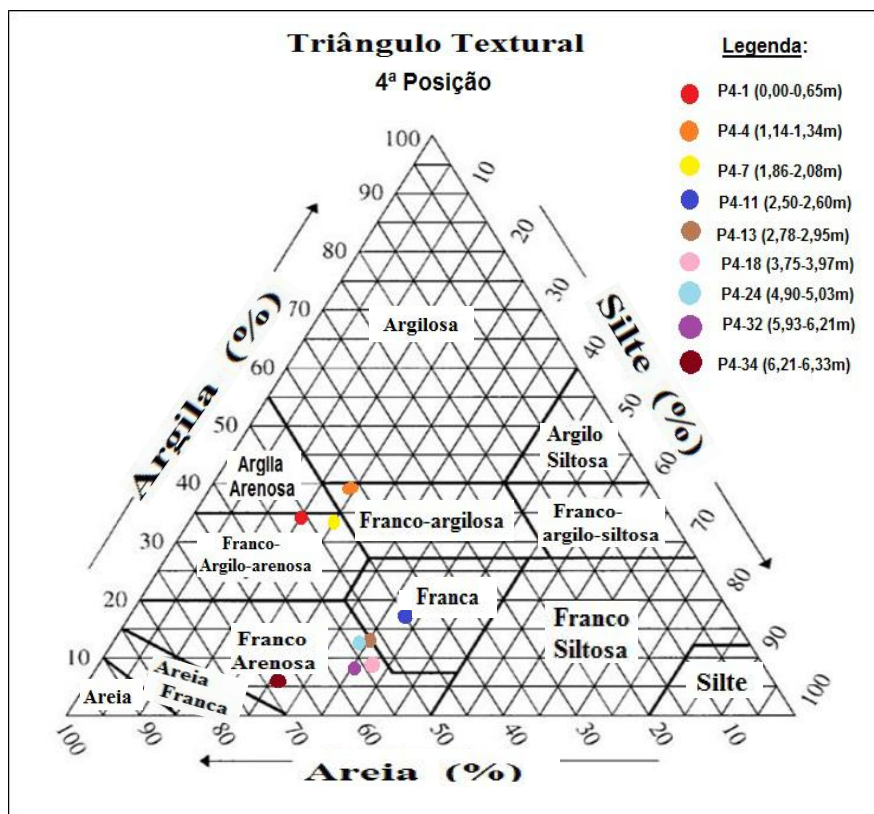


Figura 34: Diagrama triangular de classificação textural da 4ª posição.

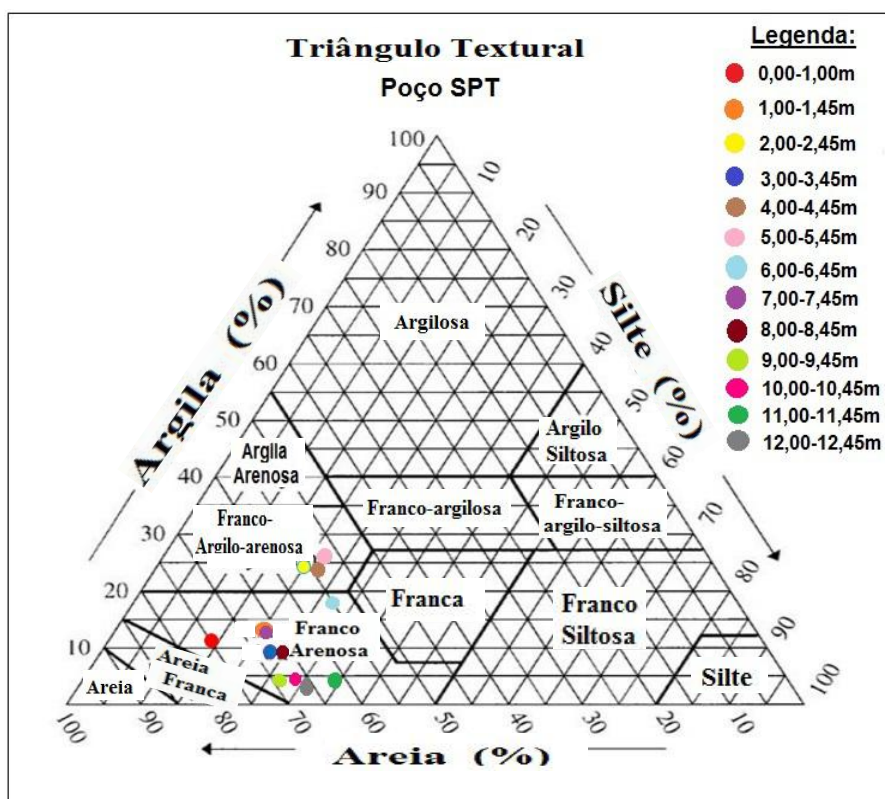


Figura 35: Diagrama triangular de classificação textural do furo SPT.



Nos furos da 1ª e da 2ª posição vemos claramente essa distribuição. Na 1ª posição, as amostras P1, P2 e P3 apresentam a textura denominada franco-argilosa e na 2ª posição as amostras P2-3 e P2-4 apresentam uma textura com menos contribuição de argila, denominada de franca, mas que também apresenta grande predominância de finos em sua composição. Essas amostras foram retiradas de uma profundidade bem semelhante, de aproximadamente 1,50 m nos dois furos o que mostra uma boa correlação e continuidade dessa camada, com esta textura, entre as duas posições. A partir daí todas as amostras apresentaram textura franco-arenosa até 6 m de profundidade, mostrando correlação entre as camadas nessas duas posições com uma continuidade bem razoável em termos de um perfil geral da encosta.

Nas amostras da 4ª posição a configuração também é bem semelhante à das posições anteriores. Percebem-se apenas algumas pequenas variações que, apesar de causar mudança no campo textural, mantém, de uma forma geral, a lógica vertical do perfil. Uma dessas pequenas variações é que, nos primeiros dois a três metros, existe um teor de areia um pouco maior, variando localmente a textura de algumas amostras. Dessa forma, as amostras P4-1 e P4-7 foram classificadas como franco-argilo-arenosa e a P4-4, com um pouco menos de areia, é franco-argilosa. Na amostra P4-11 (2,50-2,60m), de textura franca, vemos uma transição para camadas mais arenosas em maior profundidade. A partir daí é vista novamente, até os 6,33 m, a ocorrência da textura franco-arenosa para todas as amostras de solo analisadas.

No perfil da 3ª posição, a configuração se mantém semelhante ao perfil geral já identificado. Nos primeiros 4 m do perfil as amostras apresentam texturas variando entre franco-argilosa (P3-2 e P3-8), franco-argilo-arenosa (P3-6) e a textura franca (P3-10 e P3-19). Pode ser notada, inclusive, uma certa transição entre as camadas: conforme a profundidade vai aumentando ocorre também incremento de silte e da fração areia na composição textural, em detrimento da argila. As amostras P4-19 (4,40-4,55 m) e P3-21 (4,75-5,00 m), com textura franca, podem ser vistas como uma transição entre o solo residual maduro e o solo residual jovem, de composição bem mais arenosa, existente na encosta. A partir dessa profundidade até os 14,45 m do poço, todas as amostras retiradas apresentam textura franco-arenosa, sendo interpretadas como o solo residual jovem derivado das alterações do maciço cristalino da encosta.

Por fim, analisando a distribuição textural do furo SPT, localizado na média-encosta, nota-se uma distribuição um pouco diferente daquela que foi observada ao longo das quatro posições anteriores. O solo parece apresentar uma textura bem mais grossa que nas cotas superiores ao longo das quatro posições analisadas. Não existe um solo residual maduro tão bem marcado como é visto nos outros poços. As amostras de 0,00-1,00 m e de 1,00-1,45 m apresentam textura franco-arenosa. Somente a amostra de 2,00-2,45 m apresenta uma presença de finos e de argila mais significativa, sendo de textura franco-argilo-arenosa. Percebe-se também que existe uma camada mais argilosa entre 4,00 e 5,50 m de profundidade aproximadamente, confirmada pelas outras duas amostras de textura franco-argilo-arenosa identificadas no gráfico. A partir daí, é possível classificar que há uma transição razoavelmente gradual para uma camada mais arenosa, já que a amostra de 6,00-6,45 m é de textura franco-arenosa. No entanto, esta amostra apresenta ainda um teor de argila um pouco maior que as outras mais profundas que a sucedem. Depois disso, todas as amostras apresentam a textura franco-arenosa, correspondente ao solo saprolítico da encosta.

A explicação para a existência dessa configuração diferente dos outros poços que se encontram em cotas mais altas pode ser exatamente o movimento de massa ocorrido no local, tanto o último de 2011 quanto eventuais deslizamentos pretéritos. Sendo essa uma área mais baixa, pode receber uma acumulação de material deslizado e que pode ter alterado principalmente a dinâmica das camadas mais superficiais, nos primeiros metros do perfil, com esse material deslizado da encosta. Isso é muito comum em áreas afetadas por deslizamentos de grande porte como esse e geralmente causa uma nova configuração à qual o sistema aquífero tem de se adaptar (GEOHAZ CONSULTING, 2008).

Portanto, com essa classificação textural e a análise dos gráficos de barra, podemos separar a partir de agora com bastante precisão pelo menos duas camadas, de comportamento granulométrico e textural bem distinto ao longo do perfil vertical da encosta.

A primeira camada que aparece normalmente nos primeiros 2 a 3 m de profundidade, podendo em alguns locais estender-se um pouco mais até aproximadamente 4 metros, é de um colúvio, de cor avermelhada, com conteúdo de matéria orgânica e raízes no primeiro metro de perfil, bastante rico em finos, principalmente argila e silte, bastante lixiviado e alterado, e provavelmente com isso, mais concentrado em materiais insolúveis como óxidos de ferro, por exemplo. Este solo foi chamado de colúvio da encosta e as amostras pertencentes a ele foram agrupadas para as análises de permeabilidade dos métodos empíricos que serão mostrados a seguir, de forma que os resultados obtidos possam representar o comportamento dessa camada do perfil. As amostras que compõem esse solo são todas aquelas que apresentam as texturas mais argilosas que foram observadas: franco-argilo-arenosa, franco-argilosa e franca.

A segunda camada que aparece é uma camada mais acinzentada, tornando-se às vezes esbranquiçada, bem mais arenosa, com pouco conteúdo de argila e silte, sendo os minerais mais visíveis principalmente quartzo e feldspato, com características bem mais próximas da rocha matriz que se encontra mais abaixo. Essa camada foi chamada de solo saprolítico da encosta e constam dela todas as amostras de textura mais arenosa que foram vistas nos gráficos acima.

#### **4.2.3 Métodos Empíricos**

Baseado nas curvas granulométricas obtidas através dos ensaios de caracterização em laboratório, foram obtidos os parâmetros necessários para o cálculo indireto da condutividade hidráulica, através de métodos empíricos, que são muito utilizados para a previsão desta propriedade. De forma a comparar também a validade e a adequação desses métodos às características específicas de cada amostra retirada da encosta, o cálculo foi feito através de três metodologias diferentes: Hazen, Kozeny-Carman e Breyer. Os resultados também serão comparados com os obtidos em campo, através dos ensaios *in situ*.

As tabelas 3 a 12 mostram os resultados dos cálculos, que foram feitos individualmente para cada amostra, através de cada método empírico citado. Os cálculos foram feitos tanto para as curvas que foram obtidas através do método de laboratório com defloculante, quanto sem defloculante. Isso foi feito porque o diâmetro efetivo de grão varia de acordo com a metodologia, variando também o resultado final do cálculo.

Para algumas amostras, na metodologia com defloculante, não foi possível calcular a condutividade hidráulica, pois não se conseguiu obter o diâmetro efetivo ( $d_{10}$ ) através da curva granulométrica, pois devido à amostra ser bastante argilosa, a curva apresenta uma cauda bastante alongada e não corta o eixo de 10% de material acumulado, possuindo um  $d_{10}$  muito pequeno e inviável de ser detectado pelo gráfico. Dessa forma, nos cálculos dos métodos empíricos através das curvas com defloculante, somente as amostras do solo saprolítico possuem dados de condutividade hidráulica. Todas as amostras que não possuem dados são do colúvio da encosta, que apresenta uma textura mais argilosa, afirmativa esta confirmada pela classificação textural que foi apresentada anteriormente.

Por isso também o cálculo foi feito para as amostras sem defloculante, pois foi observado que, entre os solos lateríticos, há uma grande diferença na curva de uma mesma amostra de acordo com o método (com ou sem defloculante). Isso possibilitou que se obtivesse a condutividade hidráulica empírica também para essas amostras.

#### 4.2.3.1 Resultados dos cálculos para as amostras com defloculante

As tabelas 3 a 7 a seguir mostram os resultados dos cálculos para cada amostra de acordo com a respectiva sondagem de onde esta foi retirada. Além disso, foi calculado o valor médio da condutividade hidráulica para o solo saprolítico em cada sondagem, já que é uma textura de solo que foi observada e que se comporta de maneira bem homogênea e contínua, podendo assim ser agrupada permitindo que seja calculado um valor médio que represente toda a camada.

Tabela 3: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos da sondagem 1 pela granulometria com defloculante.

Amostra	Profundidade	Hazen	Kozeny	Breyer
<b>P1.1</b>	0,60-0,95	—	—	—
<b>P1.2</b>	0.90-1.10	—	—	—
<b>P1.3</b>	1.10-1.38	—	—	—
<b>P1.6</b>	2.40-2.73	$2,5 \times 10^{-5}$	$6,47 \times 10^{-6}$	$1,25 \times 10^{-5}$
<b>P1.7</b>	2.73-3.00	$1,96 \times 10^{-6}$	$5,07 \times 10^{-7}$	$4,52 \times 10^{-7}$
<b>P1.14</b>	4.75-5.00	$3,36 \times 10^{-5}$	$8,71 \times 10^{-7}$	$2,08 \times 10^{-5}$
<b>P1.15</b>	5.00-5.25	$3,36 \times 10^{-5}$	$8,71 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-5}$
<b>P1.19</b>	5.95-6.15	$6,4 \times 10^{-5}$	$1,66 \times 10^{-5}$	$4,01 \times 10^{-5}$
<b>P1.21</b>	6.30-6.45	$4,9 \times 10^{-5}$	$1,27 \times 10^{-5}$	$2,49 \times 10^{-5}$
<b>P1.22</b>	6.45-650	$2,89 \times 10^{-4}$	$7,48 \times 10^{-5}$	$1,36 \times 10^{-4}$
<b>Valor médio</b>	<b>Solo saprolítico</b>	$7,09 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$3,65 \times 10^{-5}$

Tabela 4: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer da sondagem 2 pela granulometria com defloculante.

Amostra	Profundidade	Hazen	Kozeny	Breyer
P2.3	1,00-1,28	—	—	—
P2.4	1,28-1,57	—	—	—
P2.12	3,04-3,30	$4,0 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-6}$	$1,51 \times 10^{-6}$
P2.15	3,70-3,86	$3,6 \times 10^{-5}$	$2,82 \times 10^{-6}$	$5,15 \times 10^{-6}$
P2.18	4,14-4,32	$1,96 \times 10^{-6}$	$1,70 \times 10^{-5}$	$4,47 \times 10^{-5}$
P2.24	5,15-5,35	$4,9 \times 10^{-5}$	$9,31 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-5}$
P2.32	6,17-6,40	$3,6 \times 10^{-5}$	$4,37 \times 10^{-5}$	$8,60 \times 10^{-5}$
<b>Valor médio</b>	<b>Solo saprolítico</b>	$5,71 \times 10^{-5}$	$1,48 \times 10^{-5}$	$3,16 \times 10^{-5}$

Tabela 5: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer para a sondagem 3 pela granulometria com defloculante.

Amostra	Profundidade	Hazen	Kozeny	Breyer
P3.2	0,65-1,05	—	—	—
P3.6	1,75-2,00	—	—	—
P3.8	2,20-2,40	—	—	—
P3.10	2,60-2,75	—	—	—
P3.18	4,10-4,40	$4,0 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-6}$	$1,51 \times 10^{-6}$
P3.19	4,40-4,55	—	—	—
P3.21	4,75-5,00	—	—	—
P3.27	5,95-6,15	$5,29 \times 10^{-6}$	$1,37 \times 10^{-6}$	$1,93 \times 10^{-6}$
P3.30	6,45-6,60	$1,96 \times 10^{-6}$	$5,07 \times 10^{-7}$	$5,49 \times 10^{-7}$
P3.31	6,60-6,80	$7,84 \times 10^{-6}$	$2,03 \times 10^{-6}$	$3,67 \times 10^{-6}$
P3.32	6,80-6,95	$4,0 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-6}$	$1,51 \times 10^{-6}$
P3.34	7,10-7,25	$1,16 \times 10^{-5}$	$2,99 \times 10^{-6}$	$5,78 \times 10^{-6}$
P3.35	7,25-7,40	$3,6 \times 10^{-5}$	$9,33 \times 10^{-6}$	$2,47 \times 10^{-5}$
P3.36	7,40-7,50	$1,16 \times 10^{-5}$	$2,99 \times 10^{-6}$	$4,55 \times 10^{-6}$
P3.46	8,85-9,00	$1,16 \times 10^{-5}$	$2,99 \times 10^{-6}$	$6,02 \times 10^{-6}$
P3.49	9,20-9,35	$6,25 \times 10^{-6}$	$1,62 \times 10^{-6}$	$2,95 \times 10^{-6}$
P3.53	9,75-9,95	$3,6 \times 10^{-5}$	$9,32 \times 10^{-6}$	$2,25 \times 10^{-5}$
P3.61	11,10-11,20	$1,16 \times 10^{-5}$	$2,99 \times 10^{-6}$	$6,02 \times 10^{-6}$
P3.70	12,35-12,50	$1,16 \times 10^{-5}$	$2,99 \times 10^{-6}$	$3,27 \times 10^{-6}$
P3.78	13,40-13,55	$3,6 \times 10^{-5}$	$9,33 \times 10^{-6}$	$2,47 \times 10^{-5}$
P3.81	13,80-13,95	$2,03 \times 10^{-5}$	$5,24 \times 10^{-6}$	$8,06 \times 10^{-6}$
P3.84	14,15-14,30	$1,09 \times 10^{-5}$	$2,82 \times 10^{-6}$	$5,25 \times 10^{-6}$
P3.85	14,30-14,15	$1,6 \times 10^{-5}$	$4,14 \times 10^{-6}$	$9,41 \times 10^{-6}$
<b>Valor médio</b>	<b>Solo saprolítico</b>	$1,49 \times 10^{-5}$	$3,86 \times 10^{-6}$	$8,19 \times 10^{-6}$

Tabela 6: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer da sondagem 4 pela granulometria com defloculante.

Amostra	Profundidade	Hazen	Kozeny	Breyer
P4.1	0,00-0,65	—	—	—
P4.4	1,14-1,34	—	—	—
P4.11	2,50-2,60	$1,0 \times 10^{-6}$	$2,59 \times 10^{-7}$	$3,88 \times 10^{-7}$
P4.13	2,78-2,95	$1,0 \times 10^{-6}$	$2,59 \times 10^{-7}$	$3,10 \times 10^{-7}$
P4.18	3,75-3,97	$4,84 \times 10^{-6}$	$1,25 \times 10^{-6}$	$2,46 \times 10^{-5}$
P4.24	4,90-5,03	$1,96 \times 10^{-6}$	$5,07 \times 10^{-6}$	$6,68 \times 10^{-6}$
P4.26	5,15-5,39	$3,6 \times 10^{-5}$	$9,31 \times 10^{-6}$	$1,23 \times 10^{-5}$
P4.32	5,93-6,21	$4,23 \times 10^{-5}$	$1,11 \times 10^{-5}$	$3,20 \times 10^{-5}$
P4.34	6,21-6,33	$6,4 \times 10^{-5}$	$1,67 \times 10^{-5}$	$4,82 \times 10^{-5}$
<b>Valor médio</b>	<b>Solo saprolítico</b>	$2,16 \times 10^{-5}$	$5,63 \times 10^{-6}$	$1,38 \times 10^{-5}$

Tabela 7: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer da sondagem a percussão (SPT) pela granulometria com defloculante.

Amostra	Profundidade	Hazen	Kozeny	Breyer
SP.01	0.00-1.00	$1,96 \times 10^{-6}$	$5,07 \times 10^{-7}$	$1,38 \times 10^{-7}$
SP.01	1.00-1.45	$1,96 \times 10^{-6}$	$5,07 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$
SP.01	2.00-2.45	—	—	—
SP.01	3.00-3.45	$9,0 \times 10^{-6}$	$2,33 \times 10^{-6}$	$2,69 \times 10^{-6}$
SP.01	4.00-4.45	—	—	—
SP.01	5.00-5.45	—	—	—
SP.01	6.00-6.45	$1,0 \times 10^{-6}$	$2,59 \times 10^{-7}$	$1,88 \times 10^{-7}$
SP.01	7.00-7.45	$1,69 \times 10^{-6}$	$4,37 \times 10^{-7}$	$2,23 \times 10^{-7}$
SP.01	8.00-8.45	$1,16 \times 10^{-5}$	$2,99 \times 10^{-6}$	$4,63 \times 10^{-6}$
SP.01	9.00-9.45	$7,23 \times 10^{-5}$	$1,87 \times 10^{-5}$	$4,69 \times 10^{-5}$
SP.01	10.00-10.45	$6,72 \times 10^{-5}$	$1,74 \times 10^{-5}$	$4,25 \times 10^{-5}$
SP.01	11.00-11.45	$3,6 \times 10^{-5}$	$9,32 \times 10^{-6}$	$2,25 \times 10^{-5}$
SP.01	12.00-12.45	$2,56 \times 10^{-4}$	$6,65 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-4}$
<b>Valor médio</b>	<b>Solo saprolítico</b>	$4,59 \times 10^{-5}$	$1,19 \times 10^{-5}$	$3,00 \times 10^{-5}$

#### 4.2.3.2 Resultados dos cálculos para as amostras sem defloculante

Assim como no tópico anterior, as mesmas amostras tiveram os ensaios realizados sem defloculante. Com essa metodologia, buscou-se observar o comportamento real do solo no campo, onde não há esse artifício laboratorial presente e as partículas podem apresentar um comportamento floculado e agregado. Foi possível observar claramente através disso, que principalmente as

partículas das camadas mais rasas, o colúvio da encosta, encontram-se bem mais agregadas que as camadas mais profundas. Com isso, foi possível obter o  $d_{10}$  dessas amostras, que não tinha sido possível anteriormente, e calcular a sua condutividade hidráulica em laboratório, de forma indireta, pelas fórmulas.

Os resultados são mostrados nas tabelas 8 a 12 a seguir, com as amostras mais uma vez sendo agrupadas de acordo com a sondagem à qual pertencem:

Tabela 8: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos da sondagem 1 pela granulometria sem defloculante.

Amostra	Profundidade	Hazen	Kozeny	Breyer
<b>P1.1</b>	0,60-0,90	$5,18 \times 10^{-5}$	$1,18 \times 10^{-4}$	$7,93 \times 10^{-5}$
<b>P1.2</b>	0,90-1,10	$6,25 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-3}$	$8,81 \times 10^{-4}$
<b>P1.6</b>	2,40-2,73	$1,44 \times 10^{-4}$	$3,75 \times 10^{-5}$	$1,06 \times 10^{-4}$
<b>P1.7</b>	2,73-3,00	$3,24 \times 10^{-4}$	$8,89 \times 10^{-5}$	$2,74 \times 10^{-4}$
<b>P1.14</b>	4,75-5,00	$8,41 \times 10^{-4}$	$3,09 \times 10^{-4}$	$8,45 \times 10^{-4}$
<b>P1.15</b>	5,00-5,25	$8,41 \times 10^{-4}$	$3,32 \times 10^{-4}$	$8,65 \times 10^{-4}$
<b>P1.19</b>	5,95-6,15	$4,0 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$	$3,40 \times 10^{-4}$
<b>P1.21</b>	6,30-6,45	$2,89 \times 10^{-4}$	$7,50 \times 10^{-5}$	$2,02 \times 10^{-4}$
<b>P1.22</b>	6,45-6,50	$4,0 \times 10^{-4}$	$1,04 \times 10^{-4}$	$1,99 \times 10^{-4}$
<b>Valor</b>	<b>Colúvio</b>	$3,38 \times 10^{-4}$	$5,74 \times 10^{-4}$	$4,80 \times 10^{-4}$
<b>Médio</b>	<b>Solo saprolítico</b>	$4,63 \times 10^{-4}$	$1,51 \times 10^{-4}$	$4,04 \times 10^{-4}$

Tabela 9: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos da sondagem 2 pela granulometria sem defloculante.

Amostra	Profundidade	Hazen	Kozeny	Breyer
<b>P2.3</b>	1,00-1,28	$1,30 \times 10^{-3}$	$4,39 \times 10^{-4}$	$1,26 \times 10^{-3}$
<b>P2.4</b>	1,28-1,57	$1,85 \times 10^{-3}$	$1,47 \times 10^{-3}$	$2,24 \times 10^{-3}$
<b>P2.12</b>	3,04-3,30	$1,0 \times 10^{-4}$	$2,62 \times 10^{-5}$	$7,65 \times 10^{-5}$
<b>P2.15</b>	3,70-3,86	$1,09 \times 10^{-3}$	$3,74 \times 10^{-4}$	$1,07 \times 10^{-3}$
<b>P2.24</b>	5,15-5,35	$5,76 \times 10^{-4}$	$1,63 \times 10^{-4}$	$5,04 \times 10^{-4}$
<b>P2.32</b>	6,17-6,40	$1,68 \times 10^3$	$4,39 \times 10^{-4}$	$1,26 \times 10^{-3}$
<b>Valor</b>	<b>Colúvio</b>	$1,57 \times 10^{-3}$	$9,53 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-3}$
<b>Médio</b>	<b>Solo saprolítico</b>	$8,62 \times 10^{-4}$	$2,50 \times 10^{-4}$	$7,27 \times 10^{-4}$

Tabela 10: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos da sondagem 3 pela granulometria sem defloculante.

Amostra	Profundidade	Hazen	Kozeny	Breyer
<b>P3.2</b>	0,65-1,05	$1,6 \times 10^{-3}$	0,00362857	$2,44 \times 10^{-3}$
<b>P3.6</b>	1,75-2,00	$7,84 \times 10^{-4}$	$6,81 \times 10^{-4}$	$9,67 \times 10^{-4}$
<b>P3.8</b>	2,20-2,40	$1,6 \times 10^{-3}$	$1,17 \times 10^{-3}$	$1,91 \times 10^{-3}$
<b>P3.10</b>	2,60-2,75	$1,6 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$
<b>P3.18</b>	4,10-4,40	$8,41 \times 10^{-4}$	$3,16 \times 10^{-4}$	$8,51 \times 10^{-4}$

Amostra	Profundidade	Hazen	Kozeny	Breyer
P3.19	4,40-4,55	$4,84 \times 10^{-4}$	$2,37 \times 10^{-4}$	$5,27 \times 10^{-4}$
P3.21	4,75-5,00	$3,24 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$	$3,16 \times 10^{-4}$
P3.27	5,95-6,15	$9,61 \times 10^{-4}$	$3,31 \times 10^{-4}$	$9,43 \times 10^{-4}$
P3.30	6,45-6,60	$1,09 \times 10^{-3}$	$4,84 \times 10^{-4}$	$1,16 \times 10^{-3}$
P3.31	6,60-6,80	$2,25 \times 10^{-4}$	$6,36 \times 10^{-5}$	$1,97 \times 10^{-4}$
P3.32	6,80-6,95	$1,44 \times 10^{-4}$	$4,20 \times 10^{-5}$	$1,29 \times 10^{-4}$
P3.34	7,10-7,25	$6,25 \times 10^{-4}$	$1,94 \times 10^{-4}$	$5,85 \times 10^{-4}$
P3.35	7,25-7,40	$9,0 \times 10^{-4}$	$3,26 \times 10^{-4}$	$8,99 \times 10^{-4}$
P3.36	7,40-7,50	$1,16 \times 10^{-5}$	$2,99 \times 10^{-6}$	$4,55 \times 10^{-6}$
P3.46	8,85-9,00	$8,1 \times 10^{-5}$	$2,10 \times 10^{-5}$	$5,69 \times 10^{-5}$
P3.49	9,20-9,35	$1,44 \times 10^{-4}$	$3,79 \times 10^{-5}$	$1,11 \times 10^{-4}$
P3.53	9,75-9,95	$9,0 \times 10^{-4}$	$3,14 \times 10^{-4}$	$8,87 \times 10^{-4}$
P3.61	11,10-11,20	$7,84 \times 10^{-4}$	$2,87 \times 10^{-4}$	$7,86 \times 10^{-4}$
P3.70	12,35-12,50	$5,76 \times 10^{-4}$	$2,11 \times 10^{-4}$	$5,78 \times 10^{-4}$
P3.78	13,40-13,55	$9,0 \times 10^{-4}$	$3,14 \times 10^{-4}$	$8,87 \times 10^{-4}$
P3.81	13,80-13,95	$9,0 \times 10^{-4}$	$2,54 \times 10^{-4}$	$7,88 \times 10^{-4}$
P3.84	14,15-14,30	$4,84 \times 10^{-4}$	$1,42 \times 10^{-4}$	$4,36 \times 10^{-4}$
P3.85	14,30-14,15	$6,25 \times 10^{-4}$	$2,11 \times 10^{-4}$	$6,08 \times 10^{-4}$
<b>Valor</b>	<b>Colúvio</b>	$1,15 \times 10^{-3}$	$1,26 \times 10^{-3}$	$1,45 \times 10^{-3}$
<b>Médio</b>	<b>Solo saprolítico</b>	$5,69 \times 10^{-4}$	$1,97 \times 10^{-4}$	$5,51 \times 10^{-4}$

Tabela 11: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos da sondagem 4 pela granulometria sem defloculante.

Amostra	Profundidade	Hazen	Kozeny	Breyer
P4.1	0,00-0,65	$1,296 \times 10^{-3}$	$8,45 \times 10^{-4}$	$1,51 \times 10^{-3}$
P4.4	1,14-1,34	$1,296 \times 10^{-3}$	$8,45 \times 10^{-4}$	$1,51 \times 10^{-3}$
P4.11	2,50-2,60	$1,296 \times 10^{-3}$	$7,76 \times 10^{-4}$	$1,48 \times 10^{-3}$
P4.13	2,78-2,95	$7,84 \times 10^{-4}$	$1,37 \times 10^{-3}$	$1,12 \times 10^{-3}$
P4.18	3,75-3,97	$1,156 \times 10^{-3}$	$4,64 \times 10^{-4}$	$1,19 \times 10^{-3}$
P4.24	4,90-5,03	$7,84 \times 10^{-4}$	$4,26 \times 10^{-4}$	$8,76 \times 10^{-4}$
P4.26	5,15-5,39	$6,76 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-4}$	$4,71 \times 10^{-4}$
P4.32	5,93-6,21	$1,156 \times 10^{-3}$	$4,27 \times 10^{-4}$	$1,16 \times 10^{-3}$
P4.34	6,21-6,33	$1,681 \times 10^{-3}$	$7,15 \times 10^{-4}$	$1,77 \times 10^{-3}$
<b>Valor</b>	<b>Colúvio</b>	$1,296 \times 10^{-3}$	$8,447 \times 10^{-4}$	$1,507 \times 10^{-3}$
<b>Médio</b>	<b>Solo saprolítico</b>	$1,076 \times 10^{-3}$	$6,221 \times 10^{-4}$	$1,153 \times 10^{-3}$

Tabela 12: Valores de condutividade hidráulica calculados através dos métodos empíricos de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer da sondagem a percussão (SPT), pela granulometria sem defloculante.

Amostra	Profundidade	Hazen (cm/s)	Kozeny (cm/s)	Breyer (cm/s)
SP.01	0.00-1.00	$4,9 \times 10^{-3}$	$3,03 \times 10^{-3}$	$5,63 \times 10^{-3}$
SP.01	1.00-1.45	$4,9 \times 10^{-3}$	$3,76 \times 10^{-3}$	$5,89 \times 10^{-3}$
SP.01	2.00-2.45	$7,29 \times 10^{-4}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$7,54 \times 10^{-4}$
SP.01	3.00-3.45	$1,6 \times 10^{-3}$	$5,15904 \times 10^{-4}$	$1,53 \times 10^{-3}$
SP.01	4.00-4.45	$9,0 \times 10^{-4}$	$4,81 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-3}$
SP.01	5.00-5.45	$7,84 \times 10^{-4}$	$4,47 \times 10^{-4}$	$8,85 \times 10^{-4}$
SP.01	6.00-6.45	$7,29 \times 10^{-4}$	$3,81 \times 10^{-4}$	$8,07 \times 10^{-4}$
SP.01	7.00-7.45	$2,89 \times 10^{-4}$	$7,76 \times 10^{-5}$	$2,36 \times 10^{-4}$
SP.01	8.00-8.45	$7,225 \times 10^{-5}$	$1,87 \times 10^{-5}$	$4,28 \times 10^{-5}$
SP.01	9.00-9.45	$2,89 \times 10^{-4}$	$7,59 \times 10^{-5}$	$2,23 \times 10^{-4}$
SP.01	10.00-10.45	$4,0 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-4}$	$3,45 \times 10^{-4}$
SP.01	11.00-11.45	$5,76 \times 10^{-4}$	$1,61 \times 10^{-4}$	$4,98 \times 10^{-4}$
SP.01	12.00-12.45	$5,76 \times 10^{-4}$	$1,54 \times 10^{-4}$	$4,69 \times 10^{-4}$
<b>Valor</b>	<b>Colúvio</b>	$8,04 \times 10^{-4}$	$4,07 \times 10^{-4}$	$8,80 \times 10^{-4}$
<b>Médio</b>	<b>Solo saprolítico</b>	$1,43 \times 10^{-3}$	$8,28 \times 10^{-4}$	$1,57 \times 10^{-3}$

### 4.3 Comparação entre os resultados

#### 4.3.1 Comparação entre os valores de condutividade hidráulica obtidos pelos métodos de campo e de laboratório

Nesta seção será feita uma comparação entre os principais resultados das etapas de campo em relação aos resultados obtidos através dos métodos laboratoriais que foram desenvolvidos. As Figuras 36 e 37 apresentam dois gráficos comparativos entre os valores da condutividade hidráulica dos ensaios de permeabilidade *in situ* de Hvorslev que foram realizados e aqueles obtidos por meio das equações de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer aplicados para as amostras que foram retiradas das quatro posições de sondagem ao longo da encosta e passaram pelo ensaio de granulometria, fornecendo os dados para os cálculos.

Um gráfico das referidas figuras mostra a comparação dos valores para o colúvio da encosta, aquele que é encontrado nos primeiros 2 a 3 m do perfil, e o outro gráfico mostra a comparação para o solo saprolítico, que é encontrado desde 2 metros até o final das sondagens a trado que foram feitas. Vale lembrar que as amostras foram retiradas do mesmo furo de sondagem onde foram feitos os ensaios *in situ* e, portanto, representam fielmente as camadas que também passaram pelos ensaios de campo.

Nesses gráficos (Figuras 36 e 37), primeiramente foram plotados os valores de permeabilidade obtidos através dos ensaios *in situ* já expostos na seção 4.1.3 deste trabalho. Depois, para que fosse feita uma comparação mais fiel em relação à profundidade de cada amostra, obteve-se uma média da condutividade hidráulica



através de um determinado método empírico entre todas as amostras até uma determinada profundidade onde havia um permeâmetro instalado. Dessa forma, por exemplo, na profundidade de 4,85 m, na 1ª posição, havia um permeâmetro instalado.

Assim, para saber a condutividade hidráulica empírica naquela profundidade optou-se por usar a média do solo saprolítico contendo todas as amostras que têm valores calculados até aquele ponto. Sendo assim, para esse ponto, a condutividade hidráulica utilizada foi a média das amostras P1.6, P1.7 e P1.14, que representam o solo saprolítico da encosta até aquela profundidade. Com isso, espera-se que tenha sido eliminado um eventual erro que poderia ocorrer pontualmente, se fosse usada somente a amostra daquele ponto e, também, porque se sabe que o bulbo de saturação criado pode invadir camadas superiores ou inferiores, que não estejam representadas pela amostra que foi retirada na profundidade exata do permeâmetro instalado.

Dessa forma, os resultados obtidos e que foram utilizados para fins de comparação representam valores médios da condutividade hidráulica naquele determinado tipo de solo da encosta. Para o conhecimento de resultados pontuais acerca de um determinado local do talude, bem como de alguma profundidade específica, basta olhar nas tabelas que foram apresentadas anteriormente na seção 4.2.3 e que fornecem o valor da condutividade hidráulica empírica individual para cada amostra.

Portanto, observando os gráficos nas figuras 36 e 37 é possível visualizar melhor a variação dos valores obtidos pelos diferentes métodos e discutir sobre eles.

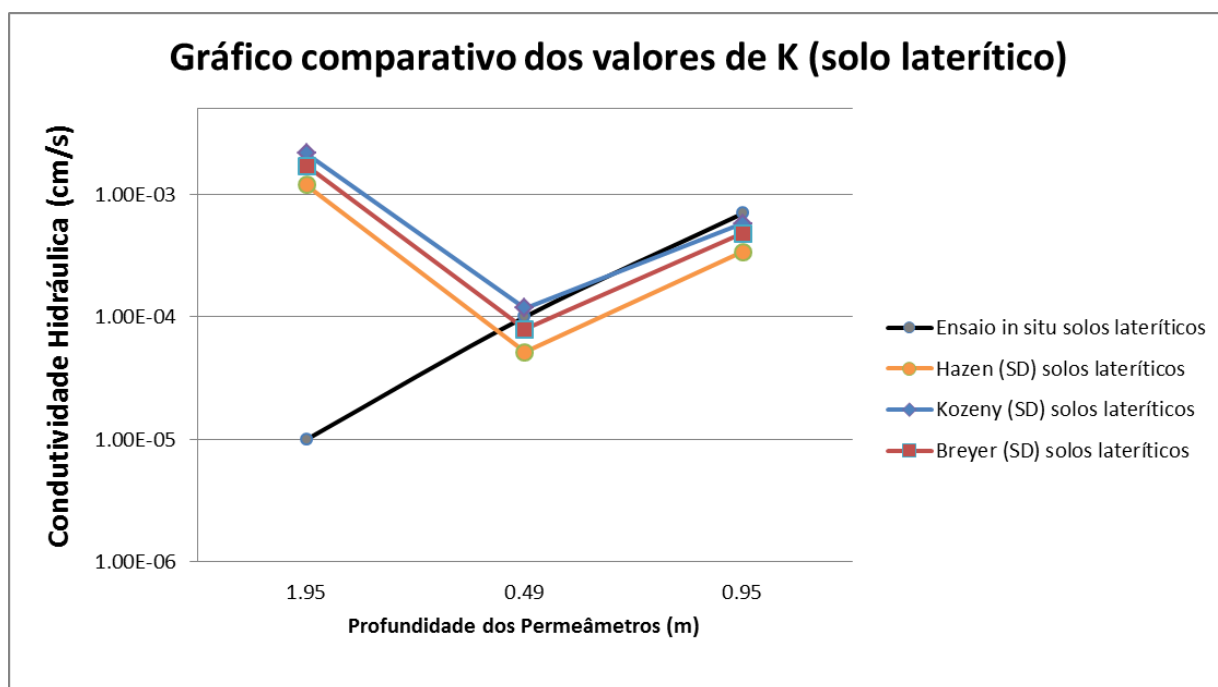


Figura 36: Gráfico comparativo dos valores de condutividade hidráulica obtidos pelos ensaios de campo e pelos métodos de laboratório empíricos, através das fórmulas de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer, para o colúvio.

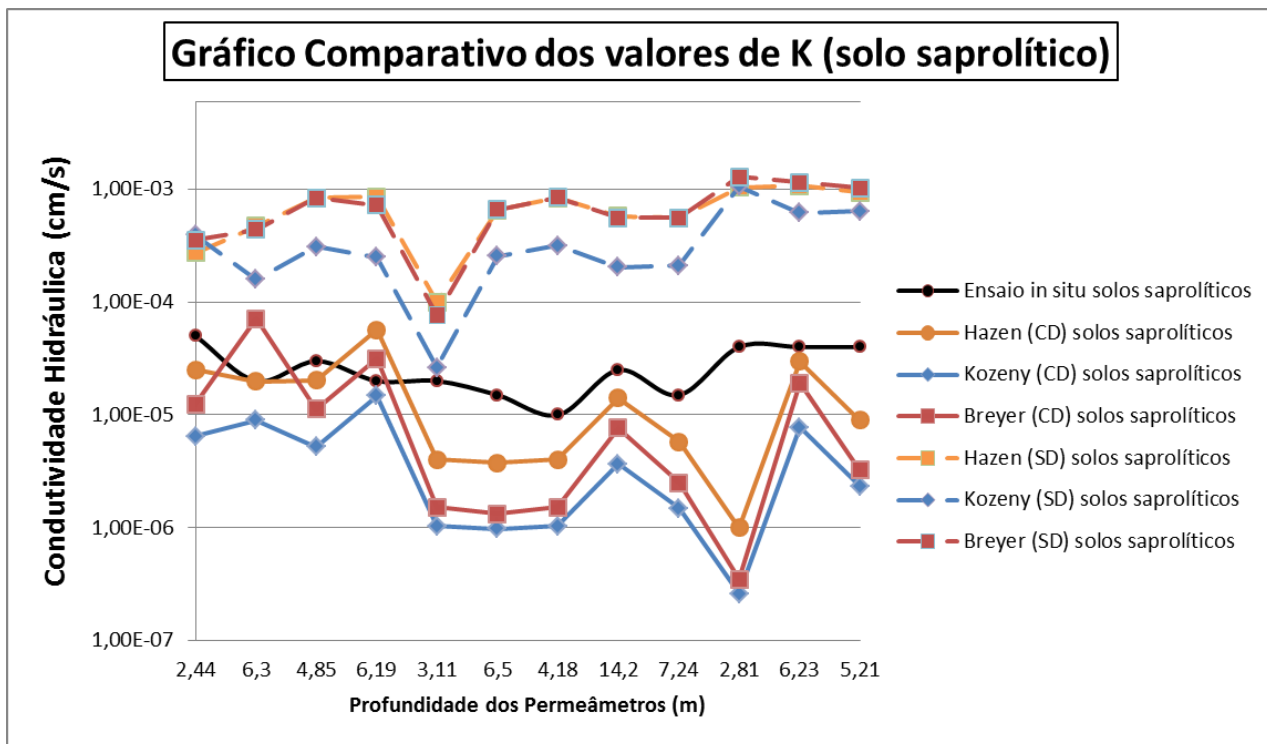


Figura 37: Gráfico comparativo dos valores de condutividade hidráulica obtidos pelos ensaios de campo e pelos métodos de laboratório empíricos, através das fórmulas de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer, para o solo saprolítico.

Sabendo-se que as equações empíricas apresentam limitações de uso, com relação à determinadas características dos solos que são analisados, considerou-se que os valores de condutividade hidráulica obtidos através dos ensaios *in situ* são os mais confiáveis e mais representativos do solo da encosta.

As equações de Hazen, em geral, são mais indicadas para sedimentos com diâmetro efetivo de grão entre 0,1 e 3 mm e coeficiente de uniformidade (U) menor que 5 (ODONG, 2007; CARRIER, 2003). Já Kozeny-Carman é uma equação não indicada para diâmetros efetivos acima de 3 mm ou para solos muito argilosos (CARRIER, 2003). A equação de Breyer, por sua vez, se aplica melhor a sedimentos mais heterogêneos, e com má seleção dos grãos; U variando entre 1 e 20, e diâmetro efetivo de grão entre 0,06 e 0,6 mm (ODONG, 2007), o que, a princípio, se encaixa melhor nos solos que estão sendo estudados, principalmente os mais rasos, que são mais heterogêneos, com U bastante variável, apresentando tamanho efetivo de grão geralmente bem pequeno.

Entretanto, embora haja uma variação grande entre as premissas de cada método empírico utilizado no que diz respeito às características das amostras analisadas, foi possível fazer uma previsão bem razoável da condutividade hidráulica através das fórmulas. Os valores, em geral, como se pode ver nos gráficos, aproximaram-se satisfatoriamente dos valores de permeabilidade obtidos através dos ensaios de campo.

Os cálculos de permeabilidade foram realizados com os dados de diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade (U) retirados das curvas granulométricas, que foram obtidas em laboratório, tanto pela metodologia com defloculante, quanto sem defloculante. Sabe-se que esses dados podem variar significativamente de acordo com o método, e uma variação maior ou menor, depende das características da

amostra. Em geral, no colúvio, essa variação é bem maior como foi visto anteriormente, já que as partículas se encontram bem floculadas *in situ*.

Nas Figuras 36 e 37 percebe-se que, para os solos saprolíticos, o uso dos dados da granulometria com defloculante é mais eficaz para a previsão da condutividade hidráulica através dos métodos empíricos. Quando são usados os valores da granulometria sem defloculante para esses solos, geralmente os valores de condutividade hidráulica são superestimados. É possível notar também, que nas amostras do solo saprolítico, por serem mais arenosas e bem selecionadas, o método de Hazen apresentou os resultados que mais se aproximaram dos obtidos nos ensaios de campo. Depois dele, o método de Breyer também produziu resultados muito satisfatórios para a previsão da condutividade hidráulica, sendo o método de Kozeny-Carman, o que teve os resultados mais distantes dos ensaios de campo nesse caso, subestimando em até uma ordem de grandeza a permeabilidade.

Já nos solos lateríticos, devido ao alto conteúdo de argila e silte, só foi possível calcular a condutividade hidráulica através do uso da granulometria sem defloculante. A granulometria com defloculante não foi capaz de calcular a permeabilidade, pois com o conteúdo elevado de silte e argila das amostras, o diâmetro efetivo de grão se torna muito pequeno e não detectável através das curvas, que apresentam uma cauda bastante alongada (Ver Anexo A).

Por haver poucos permeâmetros nessa camada de solo, a curva dos ensaios *in situ* não ficou muito estável, porém os dados são confiáveis, já que os ensaios de campo foram repetidos muitas vezes nessas camadas. Em dois permeâmetros analisados, os valores das fórmulas aproximaram-se muito do valor obtido no ensaio de campo. Apenas no permeâmetro de 1,95 m de profundidade, pertencente à 3ª posição de sondagem (Vide tabela 2), a variação foi grande entre os métodos. Nesse tipo de solo, o método de Kozeny-Carman se mostrou o mais eficaz na previsão da condutividade hidráulica, seguido de Breyer e, por último, o de Hazen.

Portanto, nos solos lateríticos, somente foi possível calcular a condutividade hidráulica empírica utilizando-se dos dados da granulometria sem defloculante, que, pelas análises, se mostrou bastante adequada para as amostras.

#### **4.3.2 Comparação entre os ensaios de granulometria com e sem defloculante**

Como já foi dito previamente, os ensaios de caracterização granulométrica foram realizados com e sem o uso do defloculante para todas as amostras, com o objetivo de fazer uma comparação entre os resultados. Ao final dos ensaios, com todas as curvas geradas, elas foram agrupadas (com e sem defloculante) de acordo com a sondagem a que pertenciam, para a análise do comportamento granulométrico vertical do solo em cada perfil. Esses gráficos encontram-se em anexo. Uma outra utilidade que as curvas tiveram foi a de fornecer os dados de diâmetro efetivo de grão e coeficiente de uniformidade para o cálculo da condutividade hidráulica empírica das amostras, através das fórmulas de Hazen, Kozeny-Carman e Breyer, além de servir de base para a geração dos gráficos de barra e para a classificação textural através do diagrama triangular. Por fim, as curvas foram plotadas, amostra por amostra, de acordo com o ensaio com defloculante e sem defloculante que foi realizado para cada uma delas. Dessa

forma, foi possível perceber a diferença que havia na curva de acordo com o método que era utilizado.

Através desses gráficos, das curvas com e sem defloculante juntas (Figura 38), foi possível notar que, primeiramente, as curvas sem defloculante apresentam-se quase sempre acima das curvas com defloculante, isto é, revelam uma granulometria mais grossa para a amostra. Esse fato pode ser explicado pois, sem o uso do defloculante, as partículas do solo se encontram mais agregadas do que quando este artifício é utilizado. No método com defloculante, a solução utilizada desmonta os agregados que possam existir entre as partículas e, além disso, a amostra é agitada no dispersor, o que também ajuda nesse processo. Obtém-se, portanto, a granulometria mais fiel das amostras, porém, algumas vezes, não é refletido o comportamento natural da amostra em campo.

A segunda observação realizada, comparando-se as curvas de uma mesma amostra pelos dois métodos, é que nos solos lateríticos, ou seja, os solos mais superficiais, a curva sem defloculante na maioria dos casos encontra-se bem acima da curva com defloculante, principalmente nas frações argila e silte. Nos solos saprolíticos, que encontram-se em profundidades maiores, essa diferença é bem menos evidente. A explicação para este fato é o processo de laterização do solo. Os solos mais superficiais, que se encontram mais tempo expostos ao intemperismo, já foram bem mais alterados e lixiviados, tendo ocorrido uma grande retirada dos elementos mais solúveis do solo (cálcio, sódio, potássio), gerando uma concentração maior dos elementos insolúveis que restaram. Entre esses elementos insolúveis que ficam, destacam-se os óxidos de ferro, alumínio e manganês, principalmente os óxidos de ferro, que acabam formando agregados no solo durante o processo de laterização. Com isso, apesar de possuir um conteúdo de argila e silte bastante elevado, o solo acaba se comportando de maneira diferente, como um solo de uma granulometria maior, como é evidenciado pelas diferenças nas curvas. Os solos saprolíticos, que por sua vez, são mais arenosos, ainda não sofreram esse processo e apresentam um comportamento mais parecido entre os dois métodos.

A figura 38 mostra a curva granulométrica com e sem defloculante das amostras de 2,00-2,45 m, do colúvio, comparada com a amostra de 8,00-8,45 m, do solo saprolítico, na sondagem SPT. Fica claro que a área que existe entre a curva com e sem defloculante é bem maior na amostra do colúvio que na amostra do solo saprolítico. No Anexo A são apresentadas as curvas com e sem defloculante de todas as amostras que foram ensaiadas, e é possível observar essa diferença para todas as amostras do colúvio.

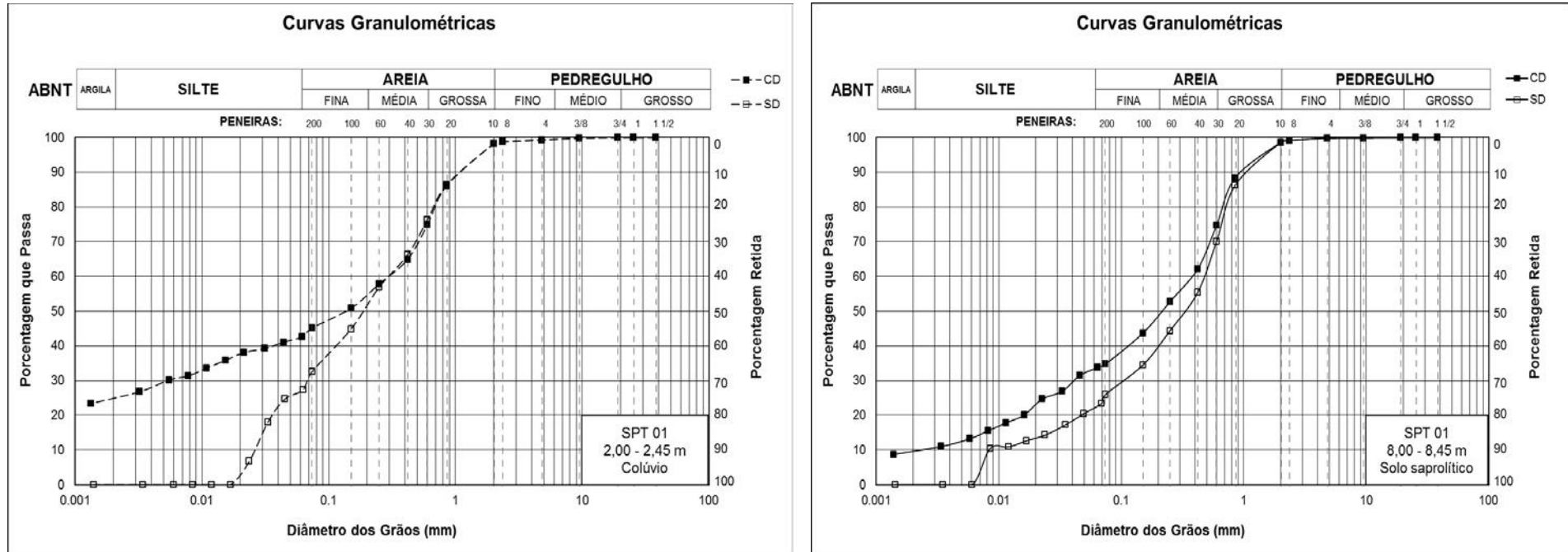


Figura 38: Curvas granulométricas com e sem defloculante das amostras 2,00-2,45m e 8,00-8,45m, pertencentes à sondagem SPT, mostrando a diferença que existe entre as curvas CD e SD do colúvio e do solo saprolítico, de acordo com o método do ensaio de caracterização que é adotado.

## 5 CONCLUSÕES

Foi possível delimitar ao menos duas camadas de solo, em subsuperfície, a partir da observação direta das amostras retiradas das sondagens e também dos ensaios de caracterização granulométrica feitos em laboratório. A primeira camada apresenta cor avermelhada e um alto teor de argila e silte, girando em torno de 50% da composição total das amostras na maioria das vezes. É uma camada não muito espessa, que aparece nos primeiros dois a três metros de profundidade no perfil da encosta. A segunda camada identificada aparece na sequência do perfil e se estende até o fim das sondagens que foram realizadas. É uma camada bem mais arenosa, de cor acinzentada, com um percentual de areia, em geral, em torno de 60 a 70% da composição total das amostras e em profundidades maiores, por volta de 6 m, tende a gradar para uma granulometria de areia mais grossa, e às vezes se torna esbranquiçada, com alto teor de argilo-minerais como a caulinita.

Foi realizada uma classificação textural das amostras que identificou uma tendência de que nos primeiros dois a três metros do perfil elas apresentassem uma textura mais argilosa, passando posteriormente, de forma gradacional, a uma textura arenosa. Dessa forma, as amostras até 2,50 m de profundidade apresentaram, em linhas gerais, texturas franco-argilosas e franco-argilo-arenosas. Na sequência, até os três metros, algumas amostras apresentaram uma gradação para uma granulometria mais arenosa, apresentando a textura franca. A partir dos três metros de profundidade, porém, as amostras apresentaram uma tendência maciça à textura franco-arenosa, comprovando a clara divisão das camadas de solo ao longo do perfil da encosta.

A partir da comparação das curvas granulométricas, que foram obtidas pelo método com e sem defloculante, para todas as amostras, notou-se que as curvas sem defloculante, em geral, sempre se mantinham abaixo das curvas com defloculante, evidenciando uma composição granulométrica mais grossa para o solo. Percebeu-se ainda que essa diferença era bem mais acentuada nas amostras mais superficiais, da camada argilosa.

Concluiu-se que isso se deve ao processo de laterização do solo, em que a intensa lixiviação é responsável pela retirada dos minerais mais solúveis, gerando uma concentração maior de elementos insolúveis como os óxidos de ferro, alumínio e manganês. A concentração desses elementos forma agregados no solo e assim, apesar de apresentar grande quantidade de argila e silte, o solo se comporta como se possuísse uma composição granulométrica mais grossa, em geral como areia fina, ou areia siltosa. Como as camadas mais superficiais encontram-se há mais tempo expostas ao intemperismo e à lixiviação, verifica-se esse processo, em estágio mais avançado, nos primeiros metros do perfil de solo. Portanto, a primeira camada do solo foi denominada de colúvio e a camada mais arenosa, que é vista mais abaixo, a partir dos três metros de profundidade, foi classificada como solo saprolítico da encosta.

Através dos ensaios de condutividade hidráulica *in situ* que foram realizados na zona não saturada, os primeiros dois a três metros do perfil, classificado como o colúvio da encosta, apresentaram uma condutividade hidráulica da ordem de grandeza de  $10^{-4}$  cm/s, com um valor médio de  $2,44 \times 10^{-4}$  cm/s, enquanto o solo saprolítico, a partir dos três metros de profundidade, apresentou um K da ordem de  $10^{-5}$  cm/s, com valor médio de  $2,72 \times 10^{-5}$  cm/s.

Com os métodos empíricos que foram utilizados, foi possível obter uma estimativa satisfatória da condutividade hidráulica do solo, comparando os resultados das fórmulas, com os ensaios de campo que foram realizados. Os cálculos foram feitos utilizando os dados de granulometria (diâmetro efetivo de grão e coeficiente de uniformidade) pelo método com e sem defloculante e os resultados apresentaram variação de acordo com o método e de acordo com a característica das amostras que foram avaliadas.

Dessa forma, verificou-se que, para as amostras mais arenosas, do solo saprolítico, o uso dos dados da granulometria com defloculante se mostrou mais adequado para a previsão da condutividade hidráulica do solo através das fórmulas. Quando a granulometria sem defloculante foi usada para esse tipo de amostra, a condutividade hidráulica em geral foi superestimada. Para o solo saprolítico, o método que se mostrou mais eficaz e apresentou resultados mais próximos dos ensaios de campo foi o de Hazen, seguido pelo de Breyer, e por último o método de Kozeny-Carman, que em geral, subestimou um pouco a permeabilidade do material.

Já no colúvio, só foi possível obter a condutividade hidráulica através das fórmulas utilizando a granulometria sem defloculante para os cálculos. Devido às amostras serem argilosas, com aproximadamente 50% de argila e silte na composição, não foi possível obter o diâmetro efetivo de grão ( $d_{10}$ ) através das curvas. No entanto, pode-se dizer que o uso da granulometria sem defloculante mostrou-se bem eficaz para a previsão da condutividade hidráulica das amostras do colúvio, pois os valores se aproximaram bastante dos ensaios de campo que foram feitos. Para essas amostras, o método de Kozeny-Carman se mostrou o mais adequado para a previsão da condutividade hidráulica, seguido por Breyer e, por último Hazen, sendo que todos apresentaram resultados bastante consistentes e próximos aos valores obtidos nos ensaios *in situ*.

Sabe-se que as equações empíricas possuem limitações de uso, com relação à determinadas características que os solos apresentam, porém os resultados, em média, estiveram próximos dos valores obtidos pelos ensaios de campo e apesar dos métodos empíricos, em algumas amostras, não serem os mais indicados para o tipo de sedimento, os resultados não variaram muito de um método para o outro e, também, não se desviaram significativamente dos resultados de campo. Portanto, através dos métodos empíricos, obteve-se uma estimativa bastante satisfatória da condutividade hidráulica média das amostras, de acordo com as heterogeneidades e as características de cada uma.

Os testes de condutividade hidráulica realizados na zona saturada foram feitos pelo método do *Slug Test*, apenas no poço MNA. No poço onde foi instalado o piezômetro (PZ-1), houve muitas interferências no teste e não foi possível obter a condutividade hidráulica. Os resultados apontaram valores de permeabilidade de 0,01861 cm/s pela equação de Hvorslev e de 0,02871 cm/s pela solução de Bouwer-Rice. Esses resultados devem ser tratados de forma relativamente cautelosa, pois como foram executados em um medidor de nível d'água, ranhurado nos 12 m de sua extensão, são valores médios que levam em conta todas as diferentes camadas existentes nesse intervalo.

Por fim, detectou-se que devido ao processo de laterização do solo, a camada mais superficial apresenta nas regiões de cota maior da encosta, uma condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-4}$  cm/s, enquanto a camada mais profunda, de solo saprolítico apresenta valores da ordem de  $10^{-5}$  cm/s. Concluiu-se que existe entre essas camadas uma descontinuidade hidráulica, que pode ter favorecido a ocorrência do deslizamento translacional raso, que deu-se exatamente nos primeiros

metros do perfil da encosta, no contato da camada do solo residual maduro (colúvio) com o solo residual jovem saprolítico, durante o episódio de chuvas verificado em 2011. Essa pode ter sido uma das causas da instabilidade do talude, mas provavelmente não foi a única durante aquele evento, pois em um episódio de tamanha magnitude, vários fatores podem agir conjuntamente provocando a instabilidade do sistema.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, Adriana Briggs de. **O emprego do permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura.** 2001. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ALBUQUERQUE, P. J. R. *et al.* Avaliação de um solo laterítico coluvionar de Campinas/SP, por diferentes procedimentos de determinação de índices físicos In: **XVIII Congresso Argentino de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, San Juan, 2006.

ARAK, Maria Sanae. **Aspectos Relativos aos Solos Porosos Colapsíveis do Distrito Federal.** 1997. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

AVELAR, A. S. *et. al.* Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In: The Second World Landslide Forum, 2011, Roma. **Anais do Second World Landslide Forum**, 2011. p.7-11.

BANCO MUNDIAL. **Avaliação de Perdas e Danos: Inundações e Deslizamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro - Janeiro de 2011** - Relatório elaborado pelo Banco Mundial com apoio do Governo do Estado do Rio de Janeiro. Novembro de 2012.

BOUWER, Herman; RICE, R. C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 423-428, 1976.

CANEDO, P.; EHRLICH, M.; LACERDA, W. A. Chuvas na Região Serrana do Rio de Janeiro: Sugestões para Ações de Engenharia e Planejamento. Rio de Janeiro: **Programa de engenharia civil, Instituto Alberto Luis Coimbra de pós-graduação e pesquisa em engenharia–COPPE/UFRJ**, 2011.

CARMAN, Philip Crosbie. The determination of the specific surface of powders. **Journal of the Society of Chemical Industry Trans.**, Londres, v. 57, n.10, p.225, 1938. ISSN: 1097-4660.

CARMAN, Philip Crosbie. **Flow of gases through porous media.** Londres: Butterworths Scientific Publications, 1956.

CARRIER, W. David. Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. **Journal of Geotechnical e Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 11, p. 1054-1056, Nov-2003. ISSN 1090-0241

COELHO NETTO, A. L. *et al.* Technical Report on Environmental Quality of Rio de Janeiro state (1: 100,000): subsidies for the economic–ecological zoning. **Environmental Secretariat of Rio de Janeiro State Government**, 2008.

COELHO NETTO, A. L. *et. al.* January 2011: the extreme landslide disaster in Brazil. In: The Second World Landslide Forum, 2011, Roma. **Anais do Second World Landslide Forum**, 2011. p.1-6.

CPRM. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Serviço Geológico do Brasil. **Projeto Rio de Janeiro - Rio de Janeiro: geologia, geomorfologia, geoquímica, geofísica, recursos minerais, economia mineral, hidrogeologia, estudos de chuvas intensas, solos, aptidão agrícola, uso e cobertura do solo, inventário de escorregamentos, diagnóstico geoambiental**. Rio de Janeiro: CPRM: Embrapa Solos; 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093/94**: Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Megadesastre da Serra**. Disponível em: <<http://www.drm.rj.gov.br>>

DOURADO, F.; ARRAES, T. C.; SILVA, M. F. e. O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro: as causas do evento, os mecanismos dos movimentos de massa e a distribuição espacial dos investimentos de reconstrução no pós-desastre. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 35, n. 2, p. 43-54, 2012. ISSN 0101-9759

FERNANDES, N. F. *et al.* Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: Avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.2, n.1, p.51-71, 2001.

FETTER, Charles Willard. **Applied Hydrogeology**. 4ª ed. New Jersey: Pearson, 2004. 598 p.

FREEZE, R. Allan; CHERRY, John A. **Groundwater**. 1ª ed. New Jersey: Prentice Hall, 1979.

GEOHAZ CONSULTING. Surface water-groundwater interactions (Cap.7). In: **Geology and slope stability of the “Snodgrass Mountain Ski Area”, Crested Butte, Crestone, Colorado**. Crestone: 2008.

GUIDOLINI, L. *et al.* Os movimentos de massa do Megadesastre de Janeiro de 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro: uma avaliação dos condicionantes geológicos. In: IX SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 2012, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos do IX SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA**. Rio de Janeiro: UGB, 2012. Disponível em: <<http://www.sinageo.org.br/2012/trabalhos/1/1-559-662.html>>

HAZEN, Allen. Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration. In: **24th Annual Rep., Massachusetts State Board of Health**. Massachusetts: 1892. Pub. Doc. No. 34, p. 539–556.

HAZEN, Allen. Discussion of Dams on sand foundations. A. C. Koenig (ed.). **Trans. American Society of Civil Engineers**, vol. 73, p. 199–203, 1911.

HEILBRON, M. *et al.* A orogênese brasileira no segmento central da Faixa Ribeira, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 25, n. 4, p. 249-266, dez-1995. ISSN 2177-4382

HEILBRON, M. *et al.* Província Mantiqueira. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R. **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. Cap.13, p. 203-235.

HVORSLEV, M. J. **Time lag and soil permeability in ground-water observations**. Vicksburg, Mississippi: U. S. Army Water-ways Experiment Station, 1951. 50p.

IN SITU EUROPE. **Slug Test Method**. 2014. Disponível em <[http://www.in-situ-europe.com/pages/product/3part\\_well\\_slugs.asp](http://www.in-situ-europe.com/pages/product/3part_well_slugs.asp)>. Acesso em: 19.05.2014.

KOBIYAMA, M. *et al.* **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109p.

KOZENY, J. **Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden**. Viena: *Akad. Wiss*, 1927. p.136-271.

LACERDA, Willy Alvarenga. Stability of natural slopes along the tropical coast of Brazil. In: **Symposium on Recent Development in Soil and Pavement Mechanics**, 1997, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro. Almeida, M.S.S. (editor), Balkema: p.17-40.

LAMBE, Thomas William; WHITMAN, Robert Van Duyne. **Soil Mechanics**. 1ª ed. New York: John Wiley and Sons, 1969. 553p.

LEMOS, R. C. de; SANTOS, R. D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3ª Ed., Campinas-SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1996, p. 83.

LISBOA, Rafael Luis Lobato. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o Permeâmetro de Guelph e ensaios de laboratório**. 2006. 89p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Eng. Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

MAFFRA, C. Q. T; MAZOLLA, M. As Razões dos Desastres em Território Brasileiro. In: SANTOS, R. F. **Vulnerabilidade Ambiental: Desastres Naturais ou Induzidos?** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007.

MARTINS, A. M. *et al.* Hidrogeologia do Estado do Rio de Janeiro: síntese do estágio atual do conhecimento. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2006, Curitiba. **Resumos eletrônicos do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. São Paulo: ABAS, 2006. Disponível em: <http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23007>. Acesso em: 29.04.2014.

ODONG, Justine. Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. **Journal of American Science**, Michigan, v.4, n.1, p.1-6, dez-2007. ISSN 1545-1003

PINTO, Rodrigo Wágner Paixão; FREITAS, Marcelo Motta de. **Considerações a respeito do movimentos de massa ocorridos em Janeiro de 2011 na Bacia do Córrego D'Antas, Nova Friburgo-RJ**. GeoPUC–Revista do Departamento de Geografia da PUC-Rio, Rio de Janeiro, ano 5, n.9, p.79-96, jul-dez 2012. ISSN: 1983-3644

SALGUEIRO, Rodrigo Stutz. **Aplicação e avaliação de metodologias laboratoriais e empíricas para a determinação da condutividade hidráulica de sedimentos**. 2005. 80p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Curso de Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SILVA, Elaine Lima da. **Determinação da condutividade hidráulica através do Método de Hazen no Campus da UFRRJ**. 2008. 60p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Curso de Graduação em Geologia, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

SILVA, Roberta Pereira da. **Comportamento hidrológico de encosta em substrato rochoso de granito sob influência de deslizamento raso – Nova Friburgo, Rio de Janeiro**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SILVA JR., Gerson Cardoso. **Considerações geológico-geotécnicas sobre os movimentos de massa ao longo da rodovia BR-101, trecho Itaguaí e Angra dos Reis, RJ**. 1990. In: 6º Cong. Bras. Geologia de Engenharia, ABGE Vol. 1.

TEIXEIRA, R. S.; OSAWA, M.Y.; RETT, R.F. 2002. Estudo da granulometria do solo superficial de Londrina/PR, com e sem uso de defloculante. In: **III Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura – ENTECA 2002**. Maringá/PR, p.453-460.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do. **Desastres Naturais: Conhecer para Prevenir**. 1ª ed. São Paulo: Instituto Geológico, Governo do Estado de São Paulo, 2009. 197p. ISBN 978-85-87235-09-1

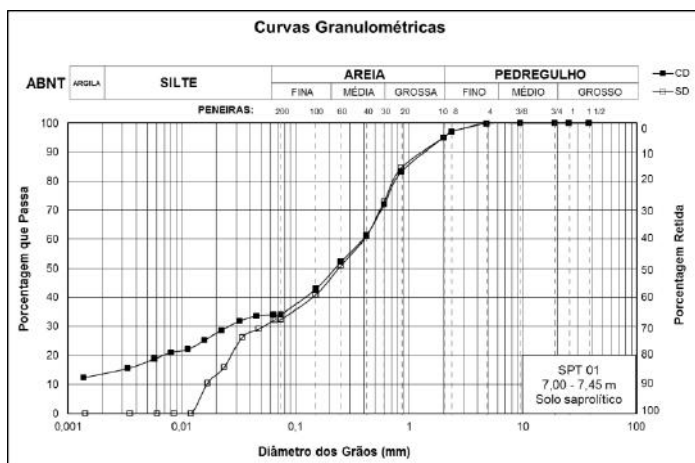
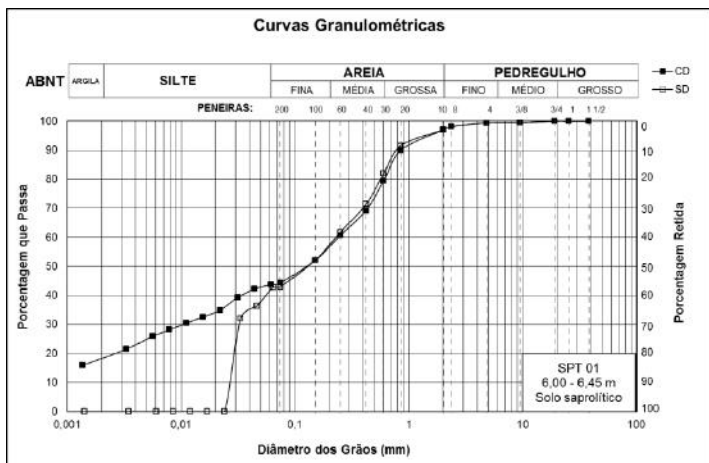
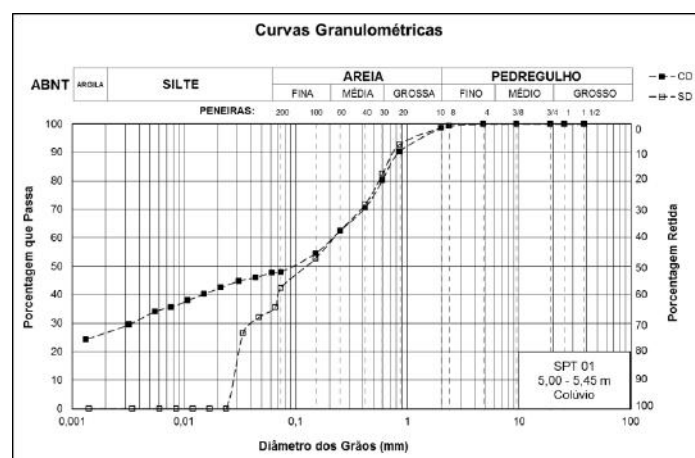
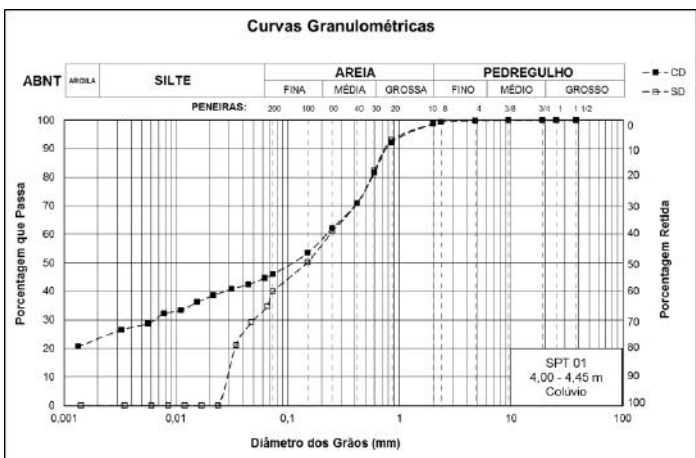
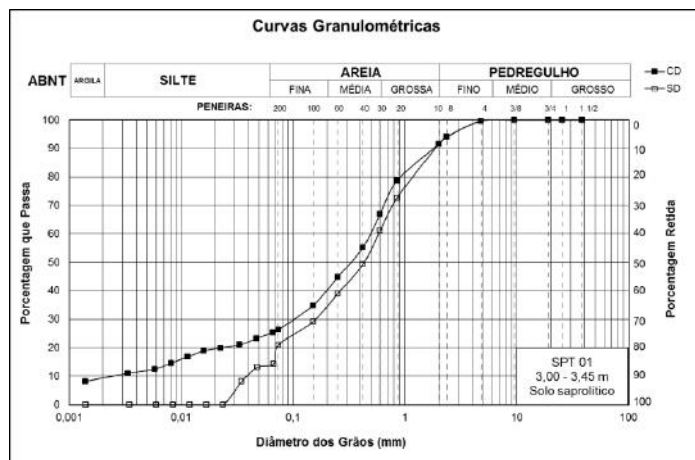
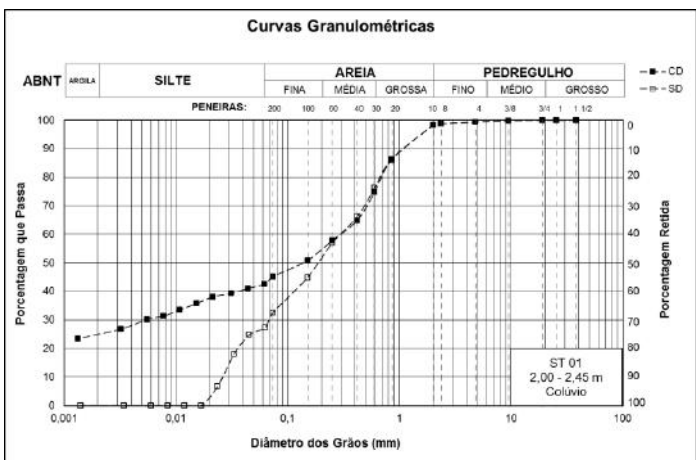
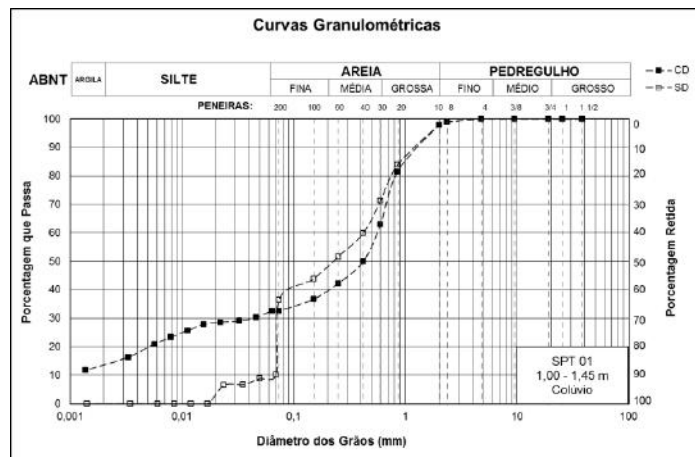
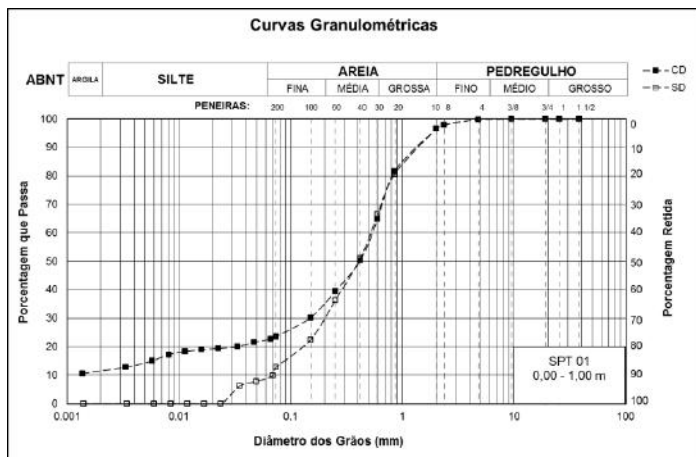
TUPINAMBÁ, M.; TEIXEIRA, W.; HEILBRON, M. Evolução Tectônica e Magmática da Faixa Ribeira entre o Neoproterozoico e o Paleozoico Inferior na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ**, Rio de Janeiro, v.35, n.2, p.140-151, 2012. ISSN 0101-9759

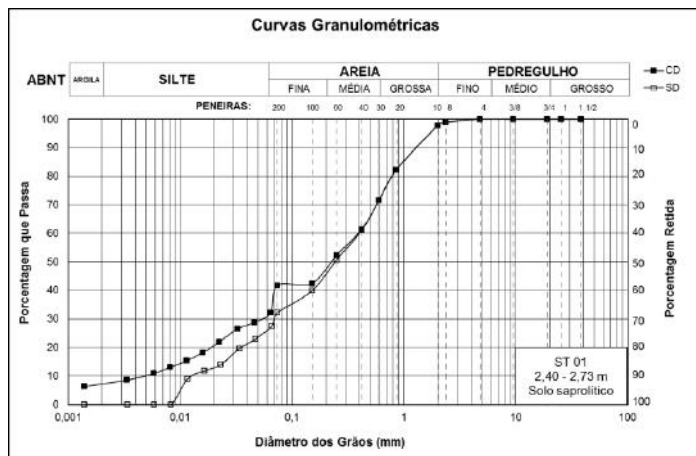
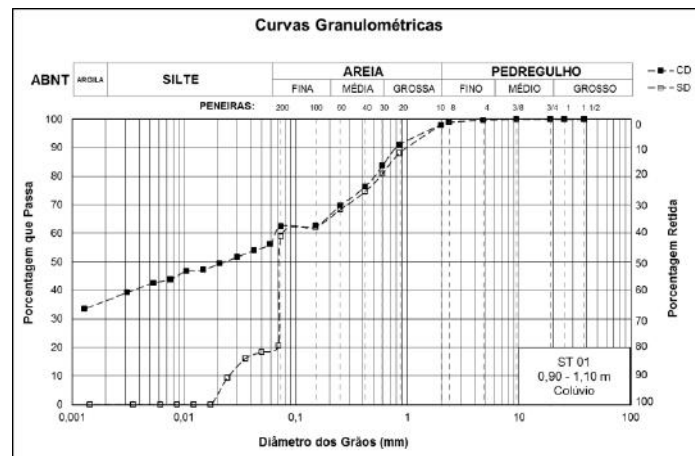
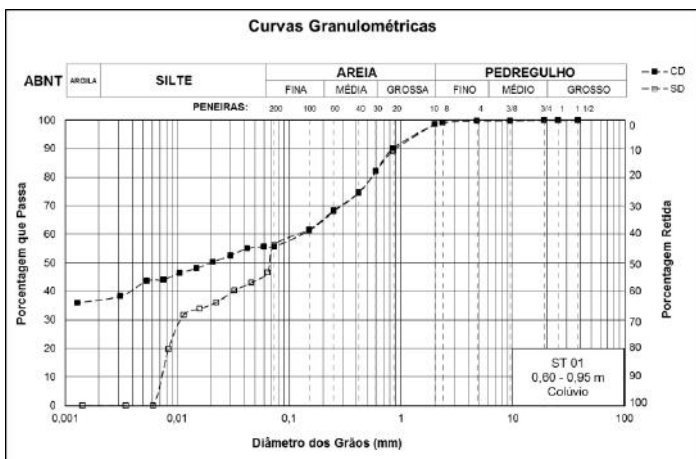
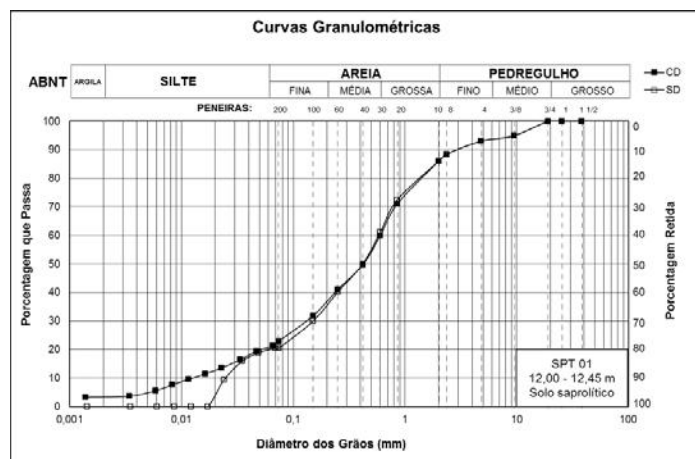
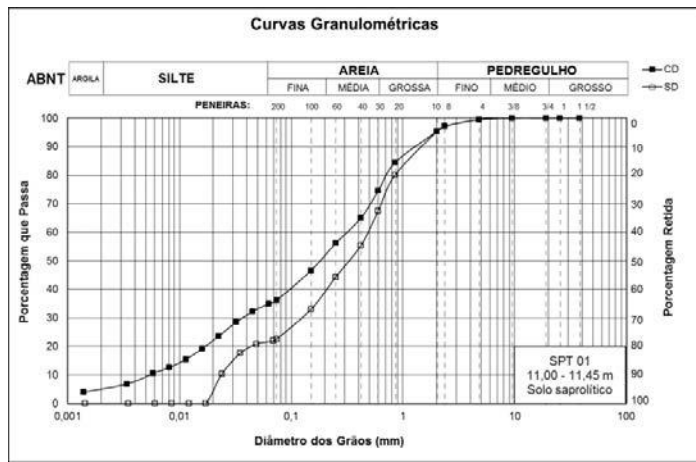
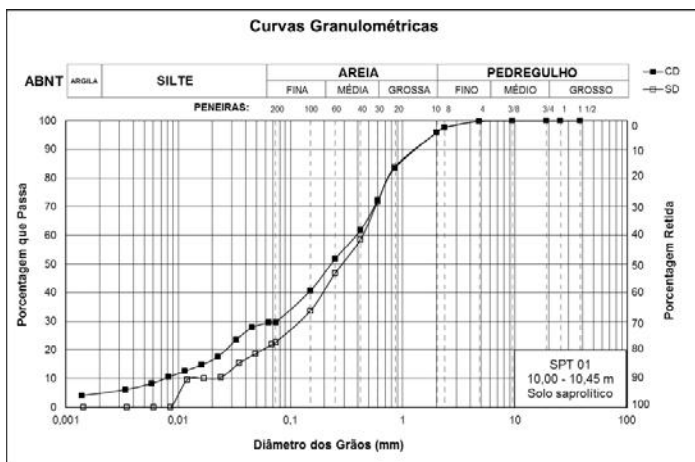
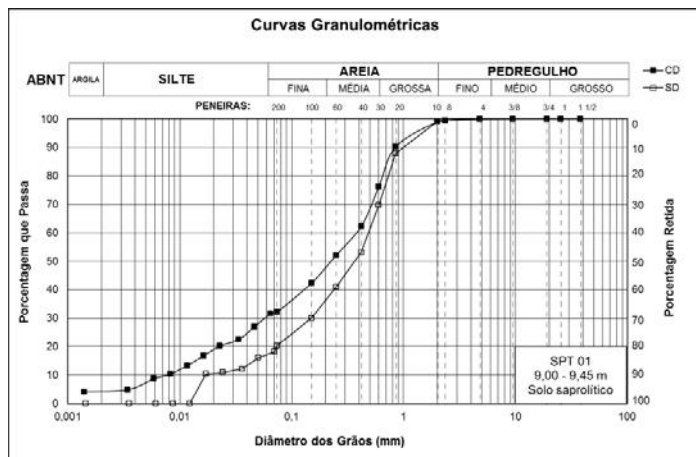
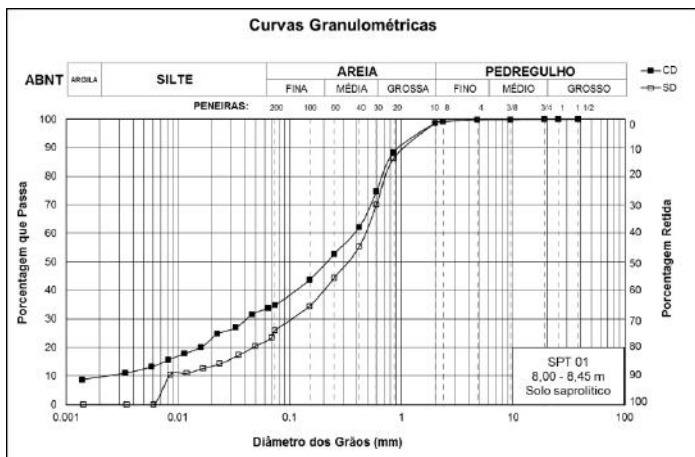
TUPINAMBÁ *et al.* Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: Estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí. **Revista Geonomos**, Belo Horizonte, v.15, n.1, 15-fev-2013. Disponível em: <<http://general.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geonomos/article/view/108/88>>

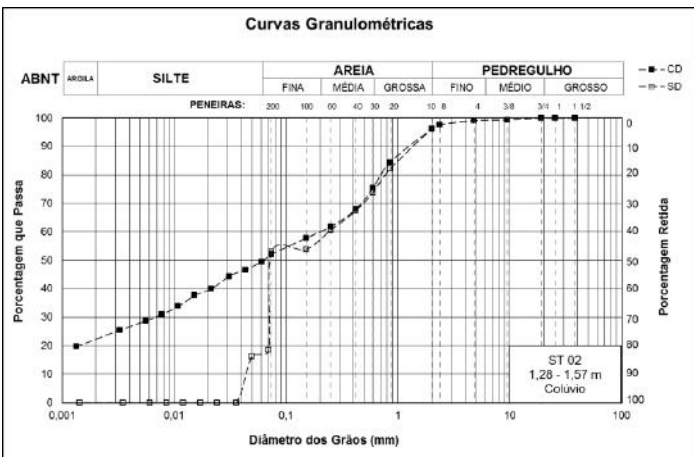
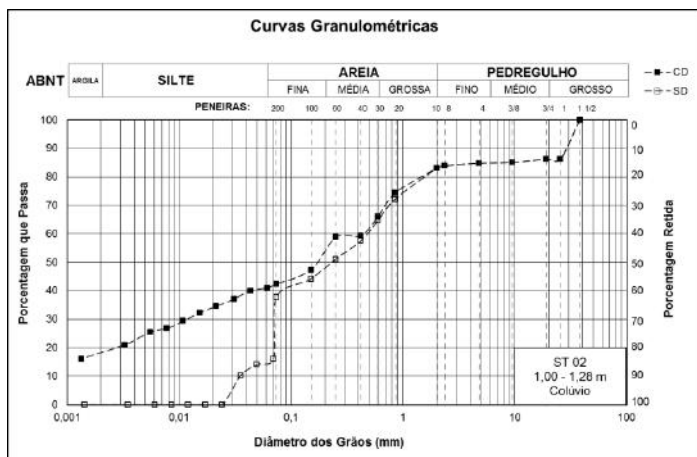
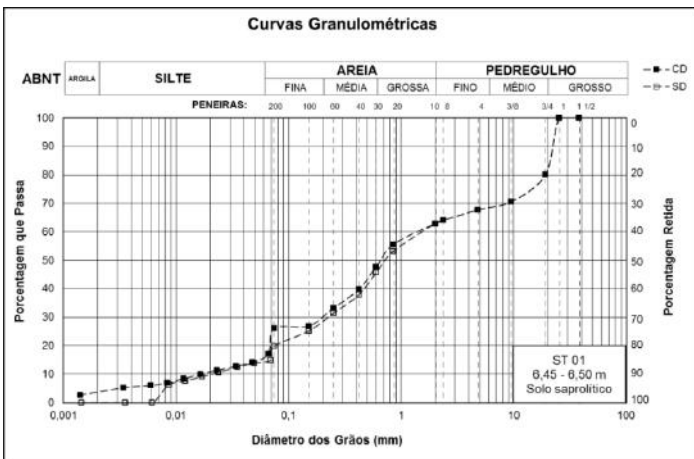
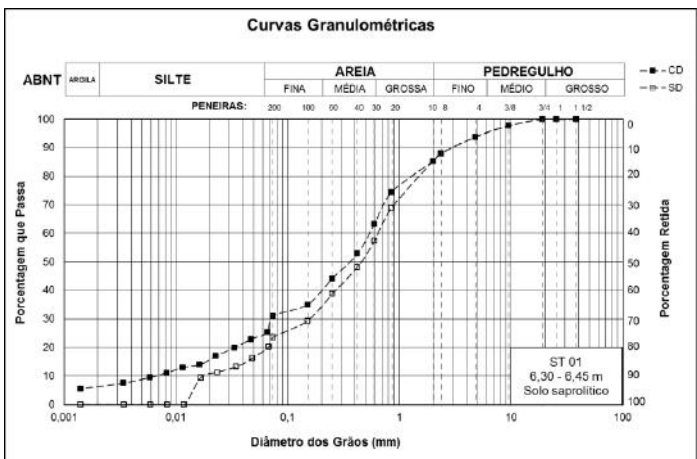
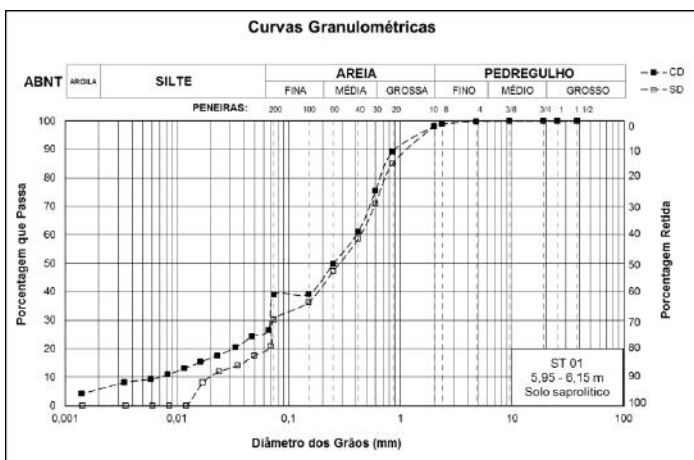
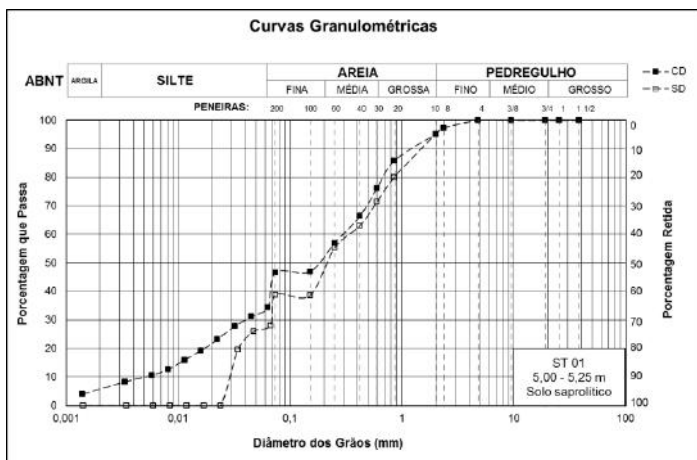
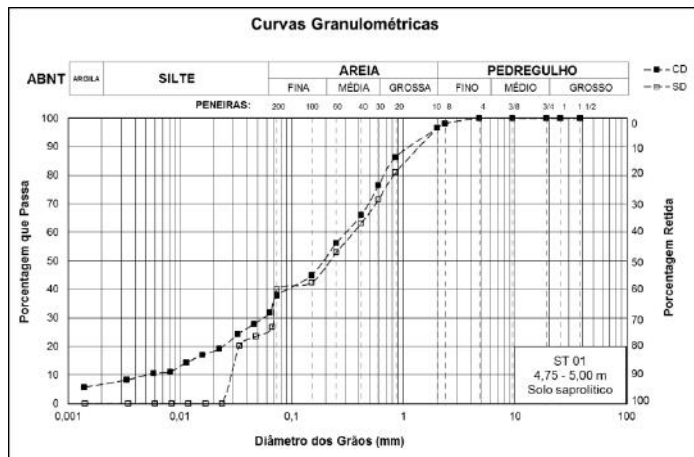
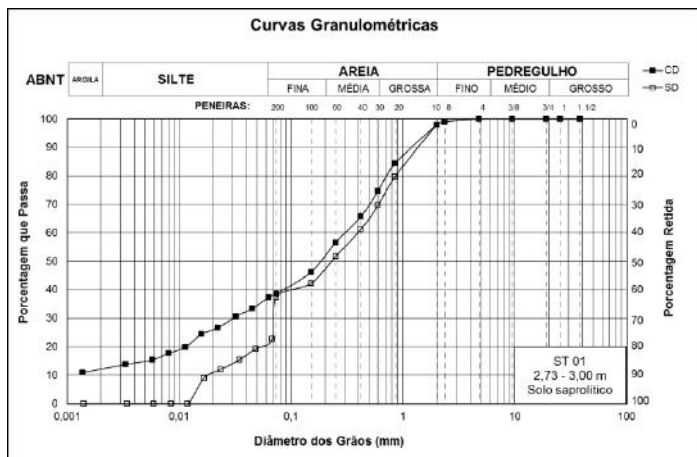
UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil Mechanics Level I: USDA Textural Soil Classification**. 1987.

**ANEXO A**

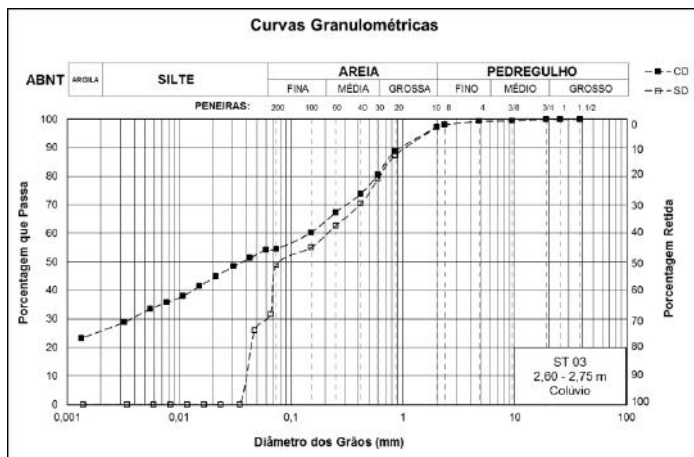
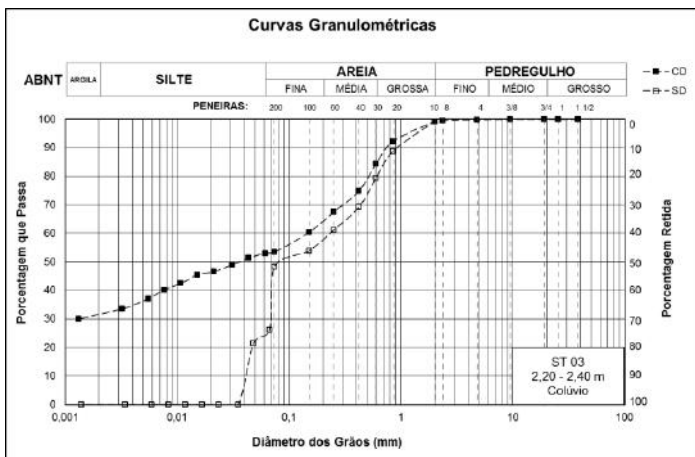
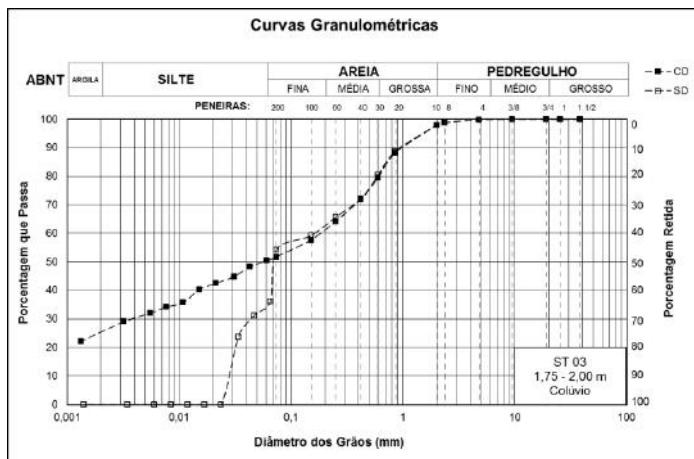
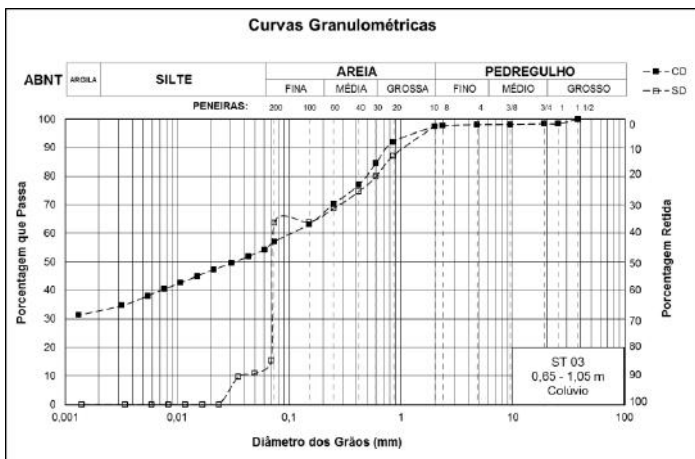
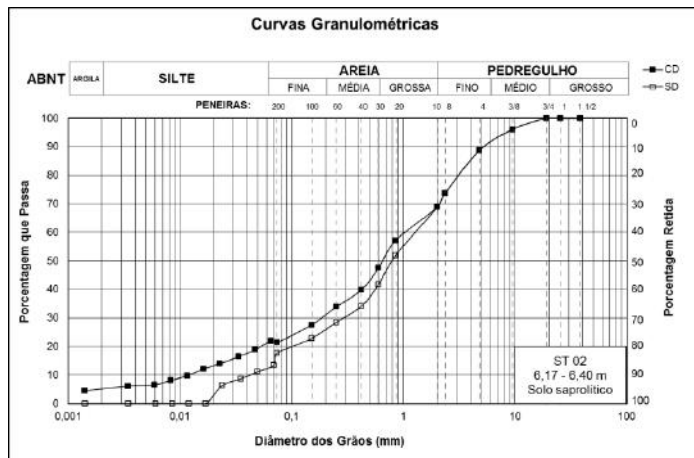
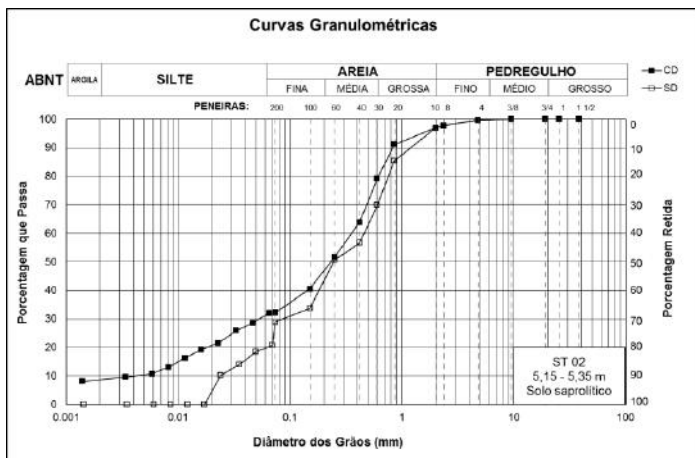
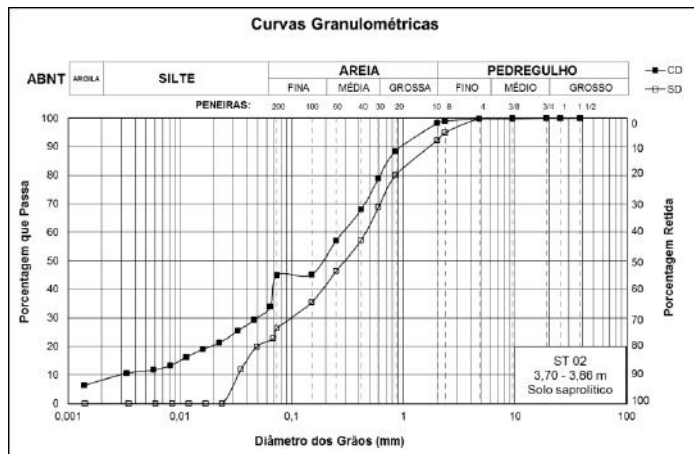
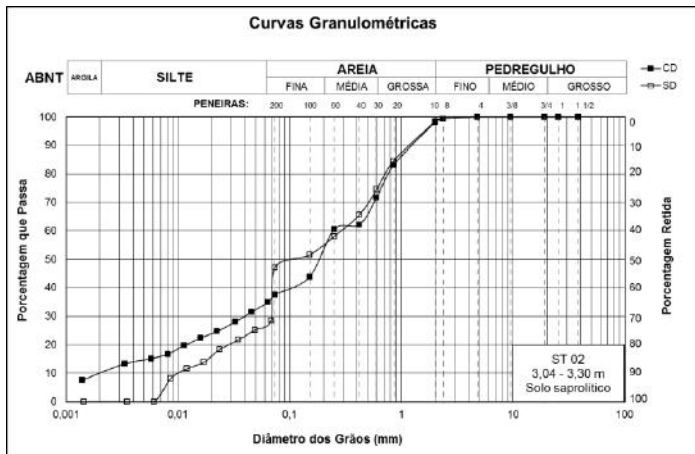
**CURVAS GRANULOMÉTRICAS**

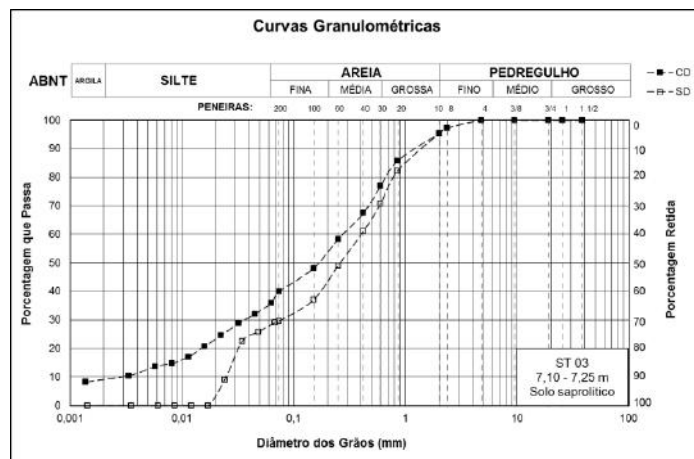
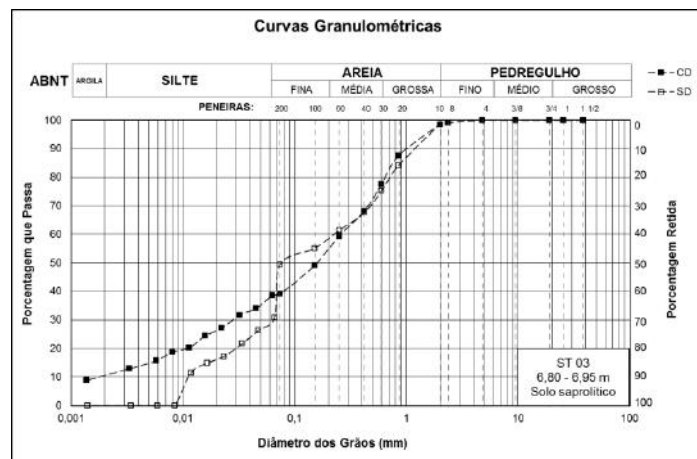
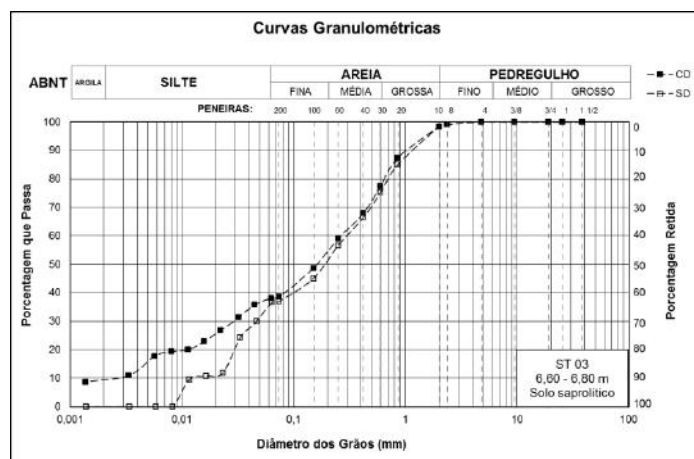
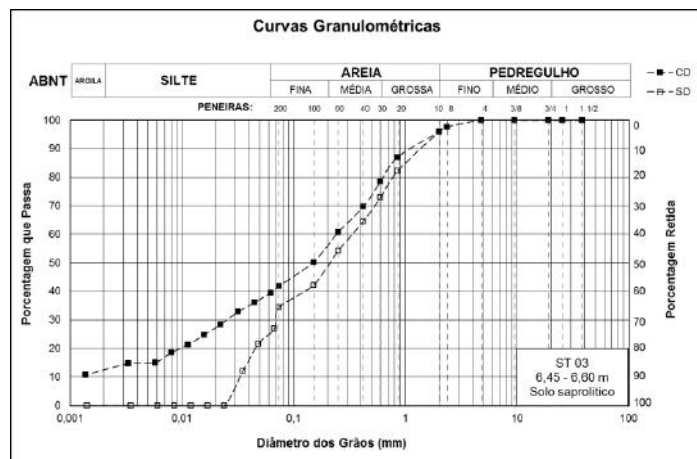
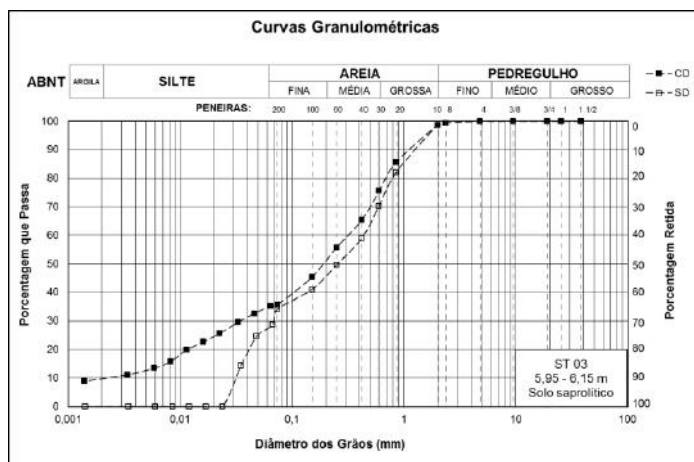
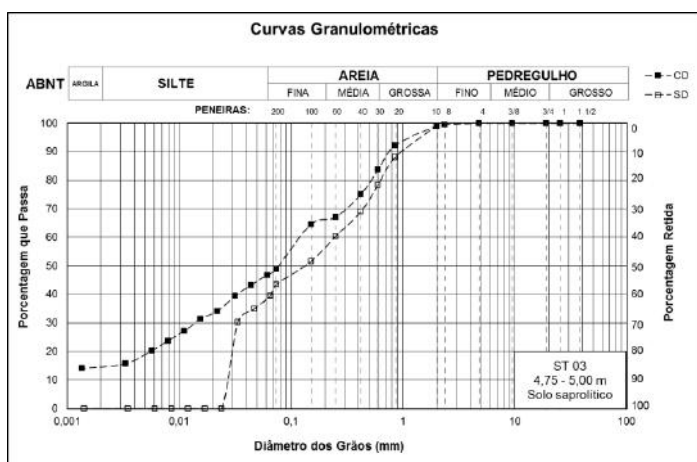
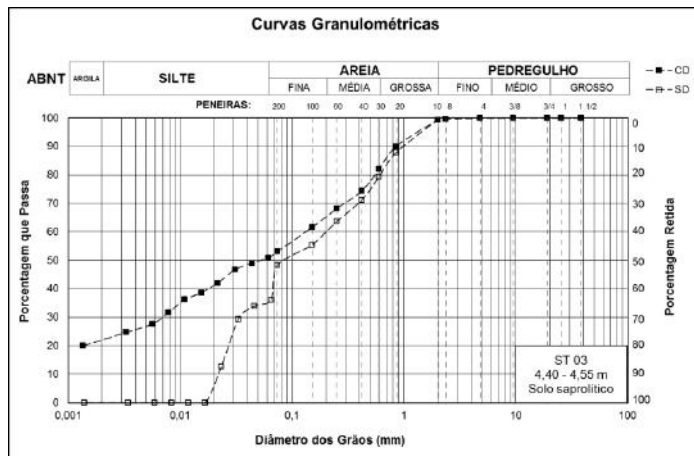
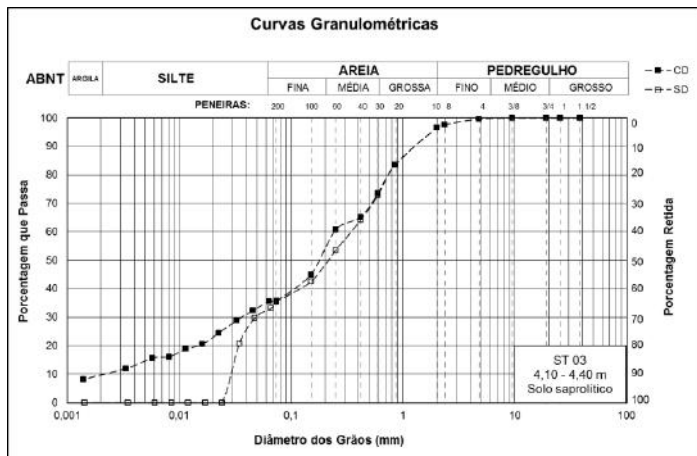


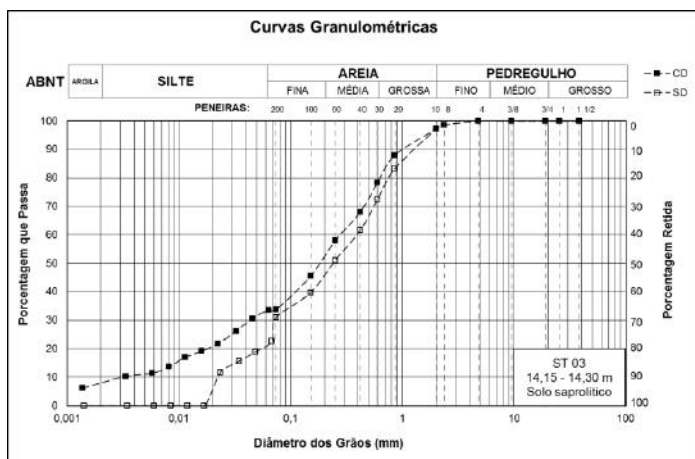
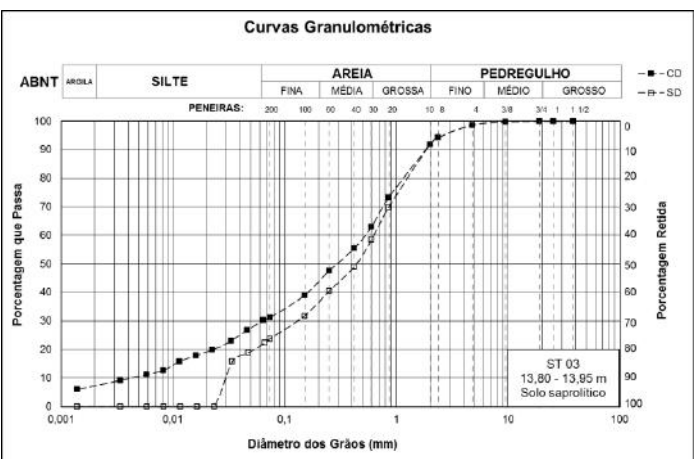
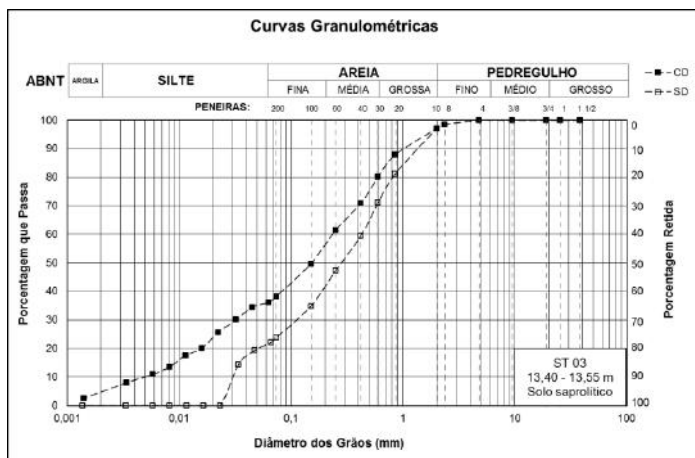
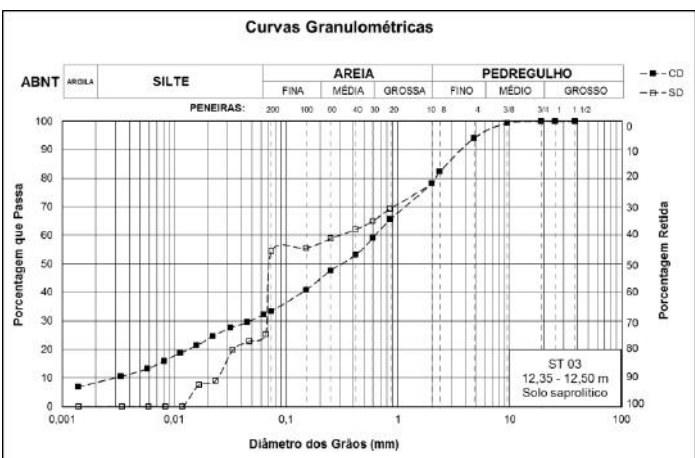
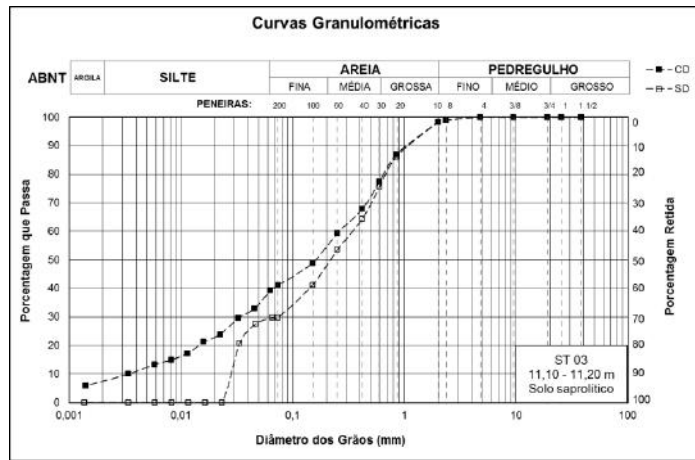
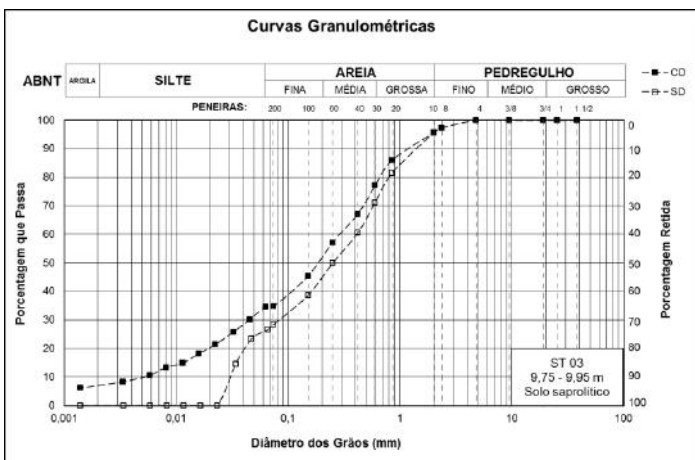
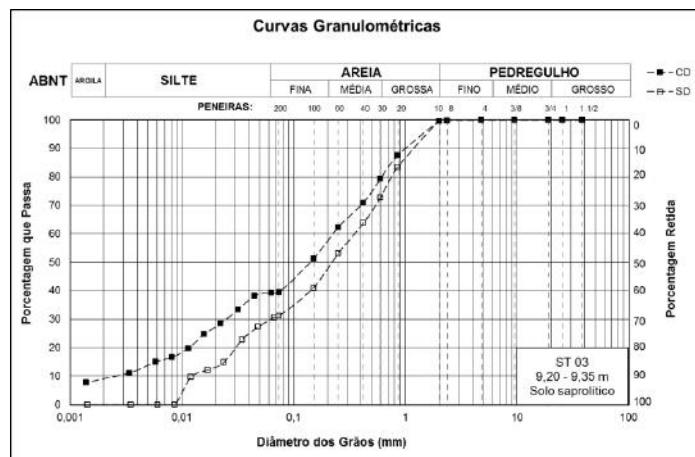
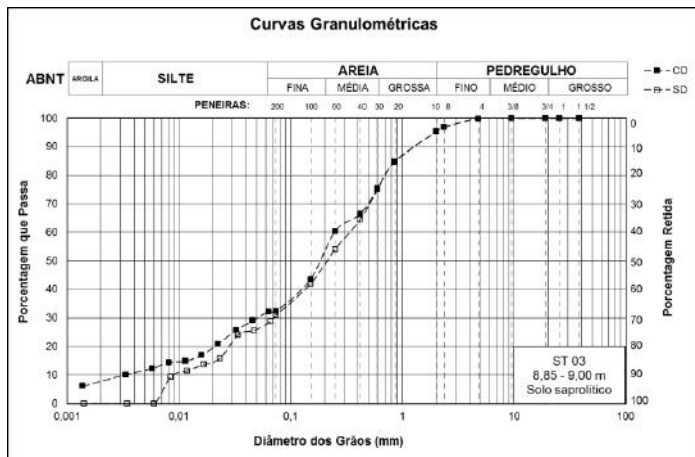


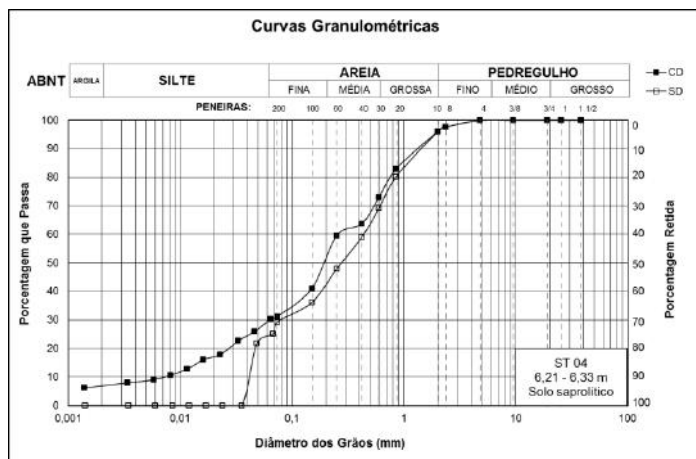
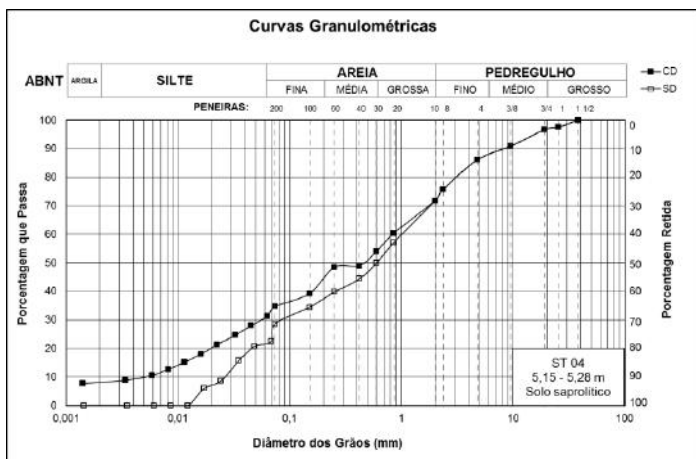
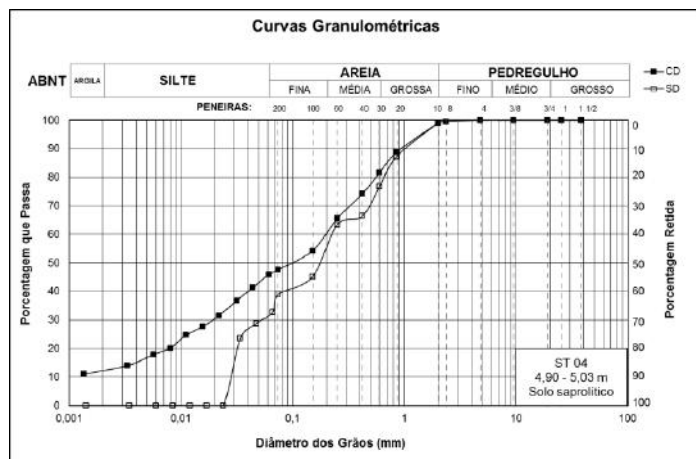
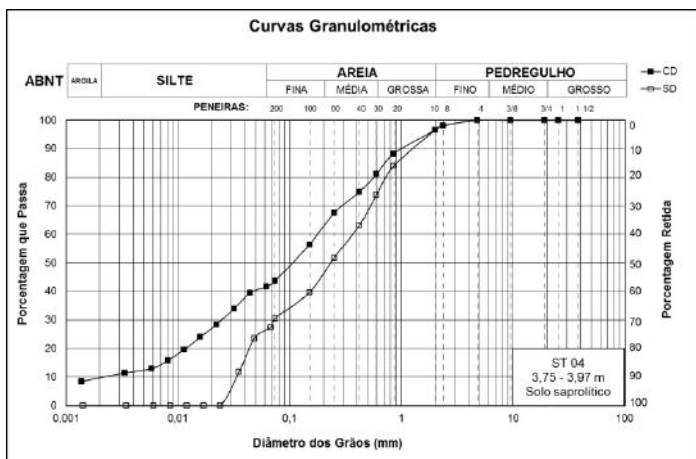
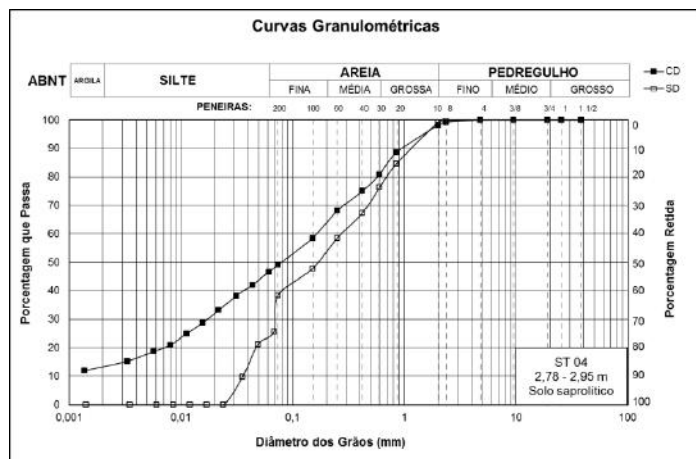
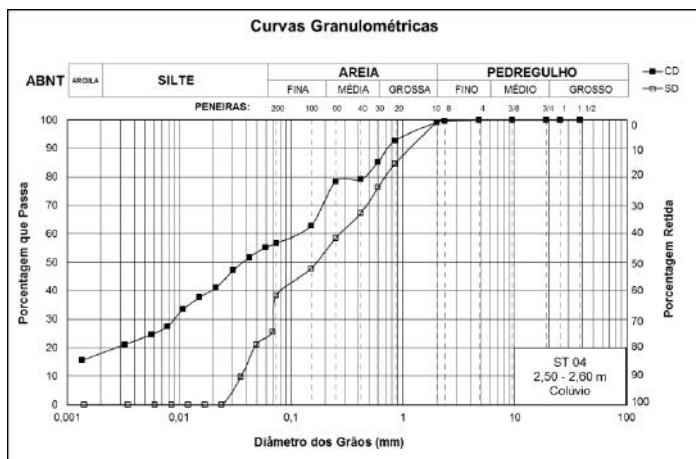
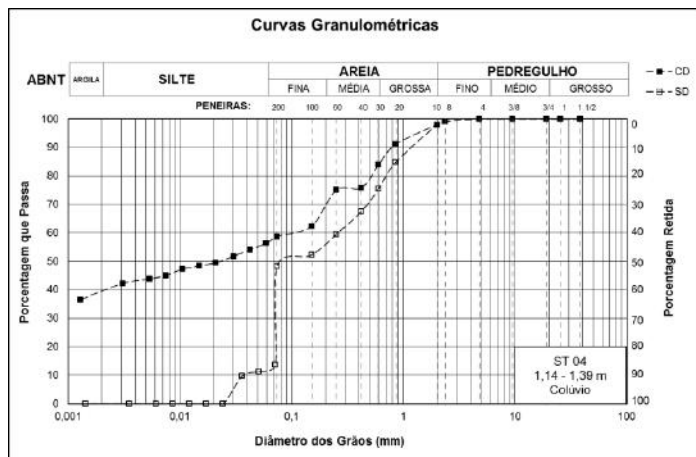
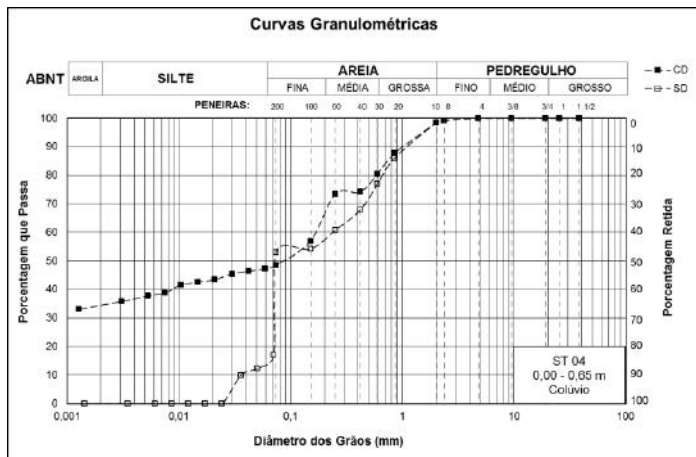




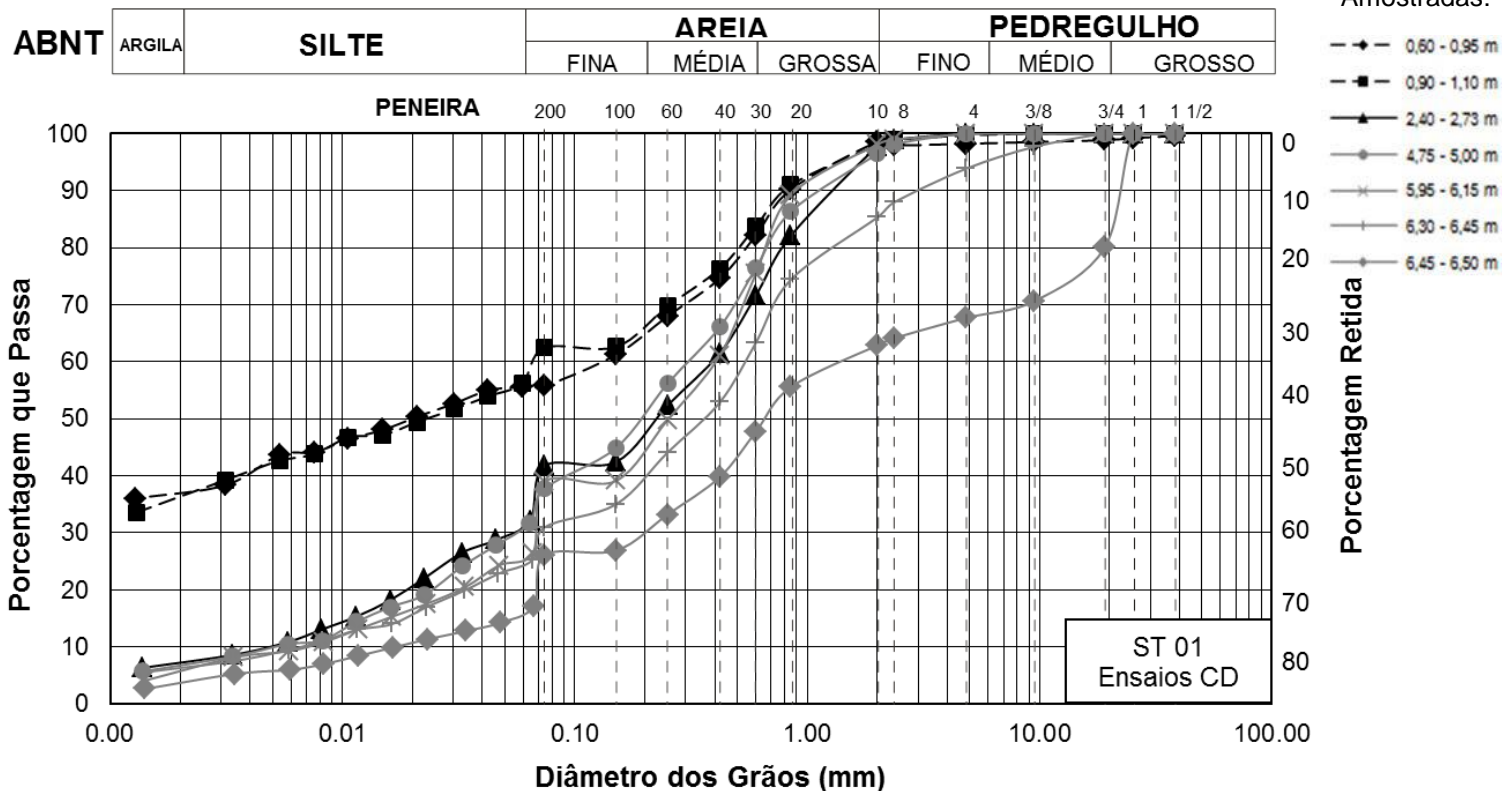




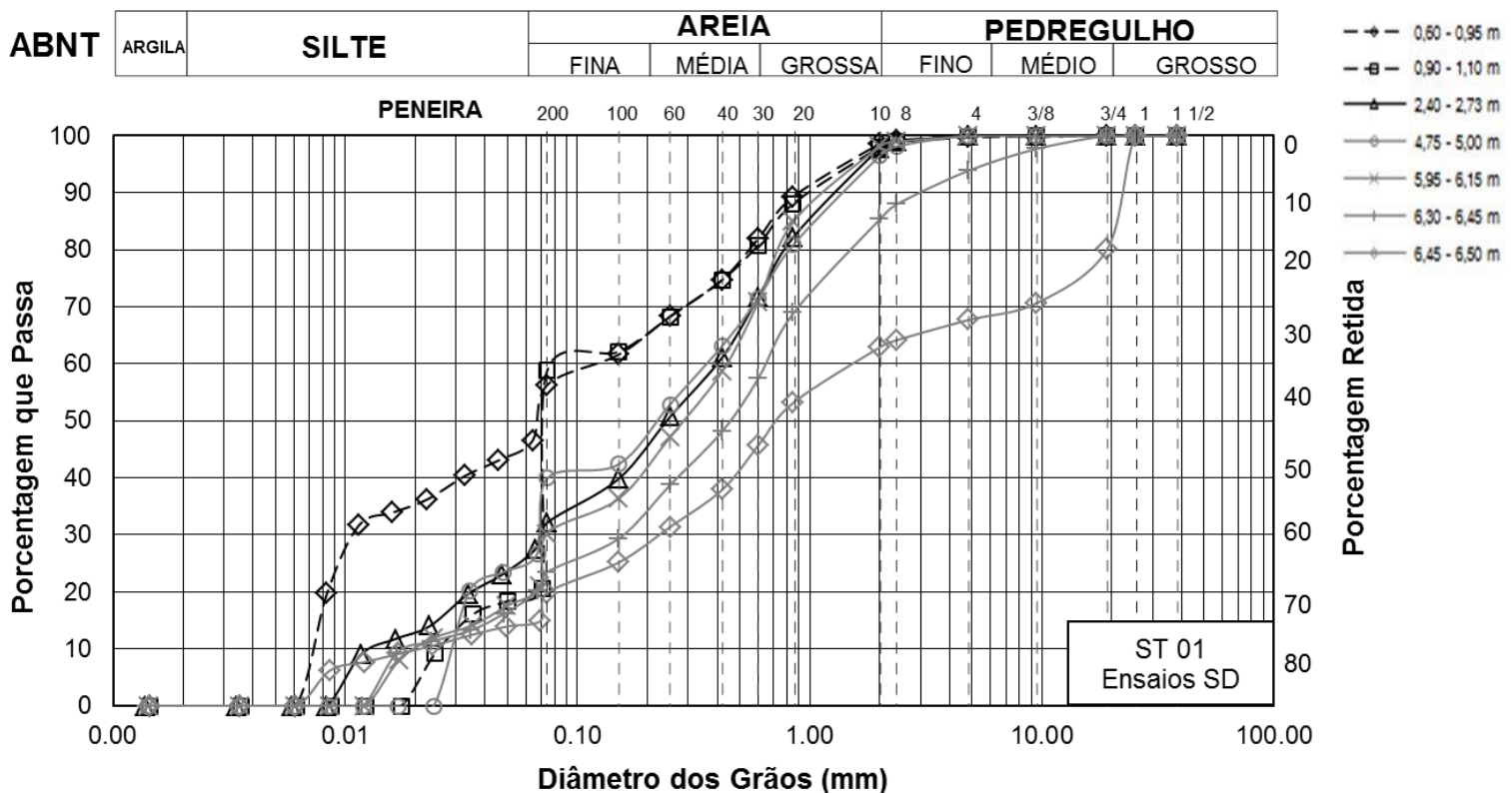




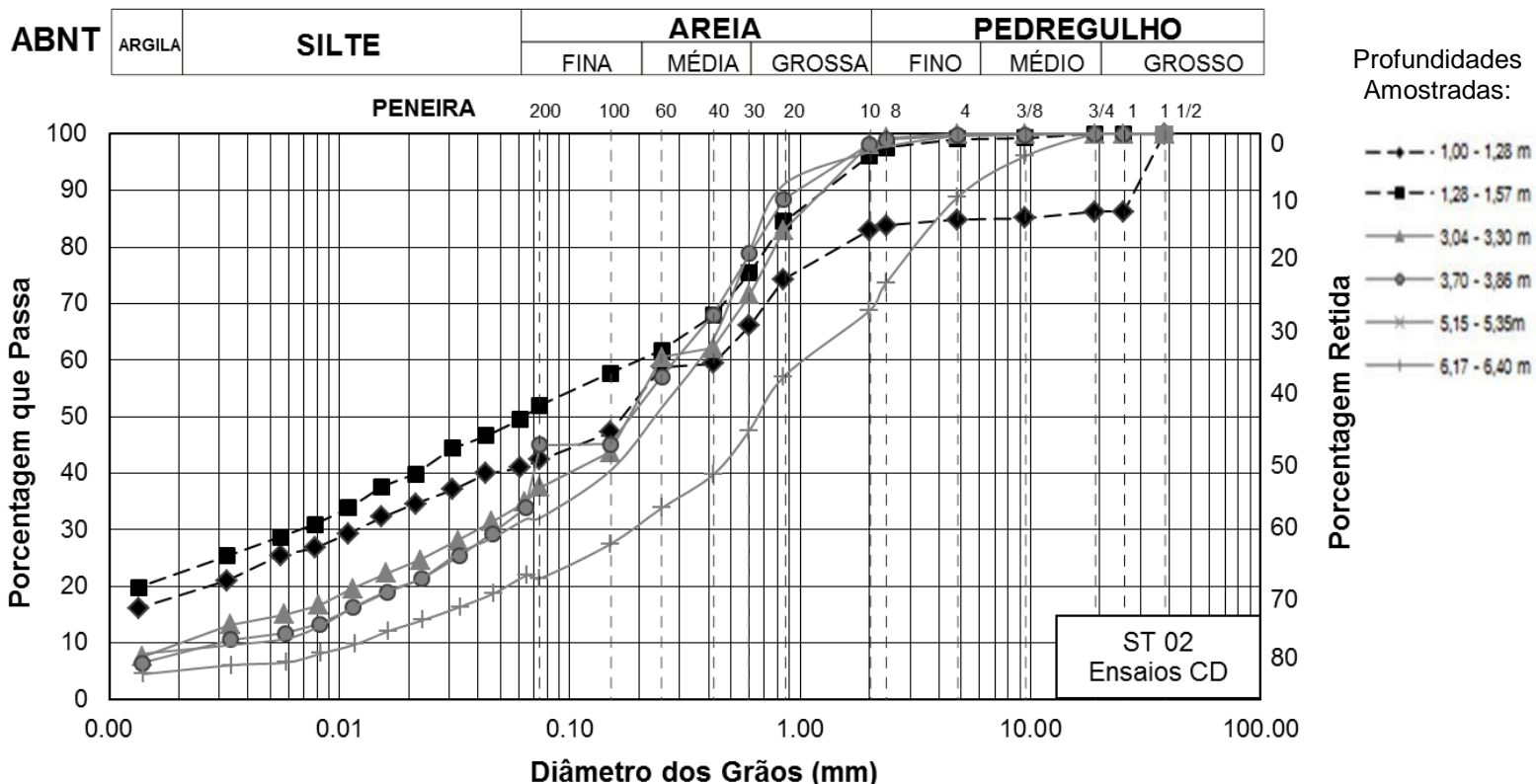
### Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos



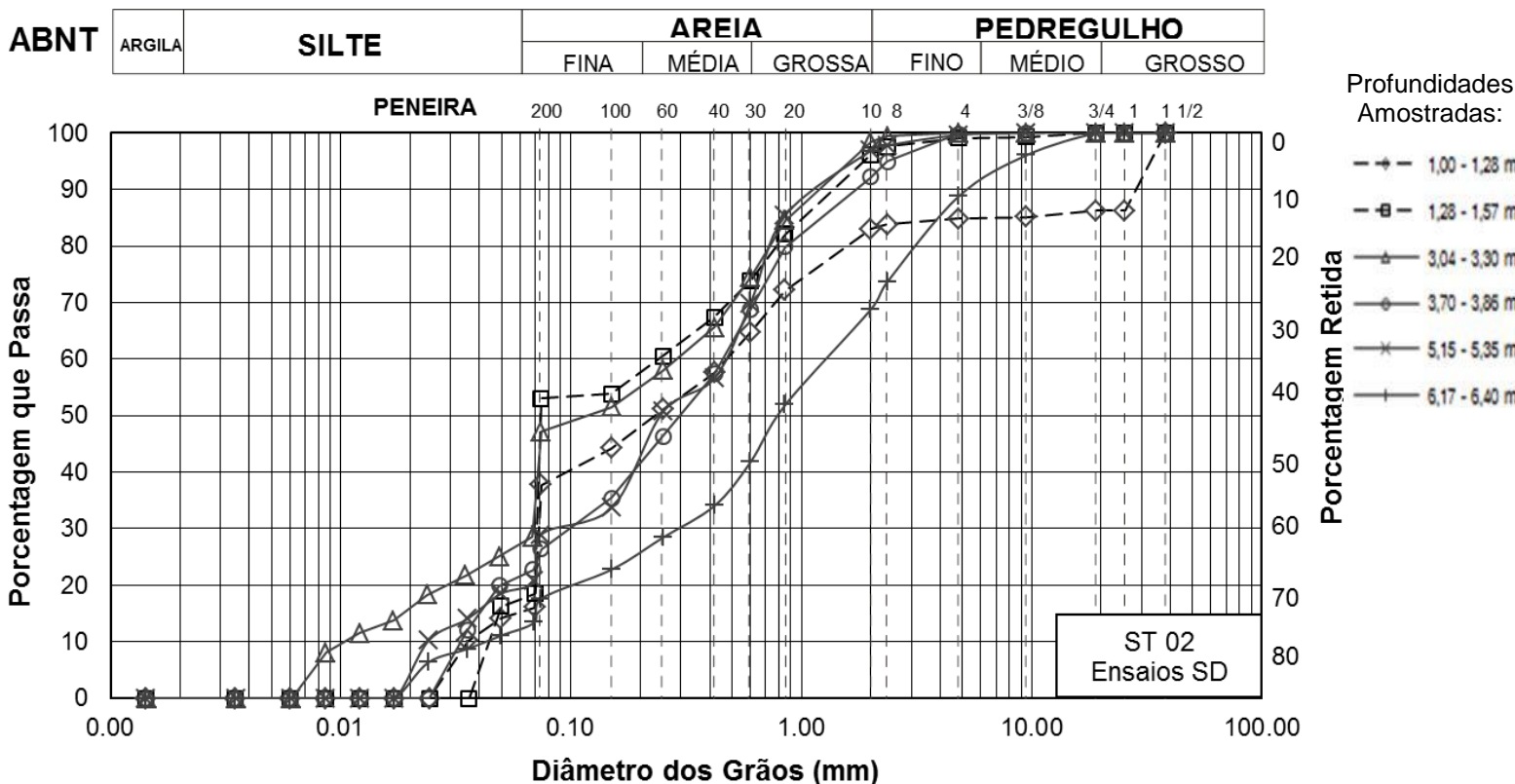
### Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos



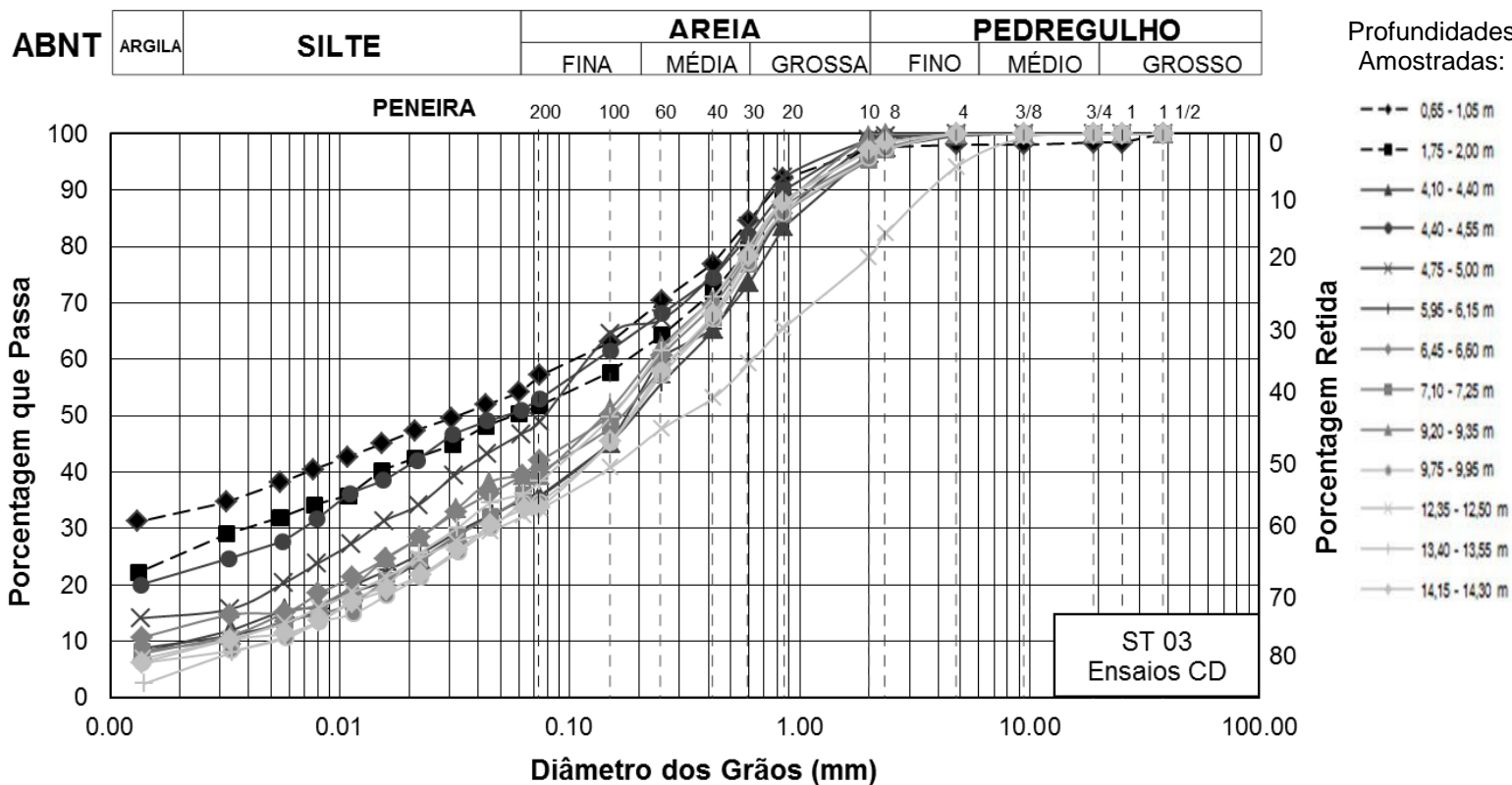
### Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos



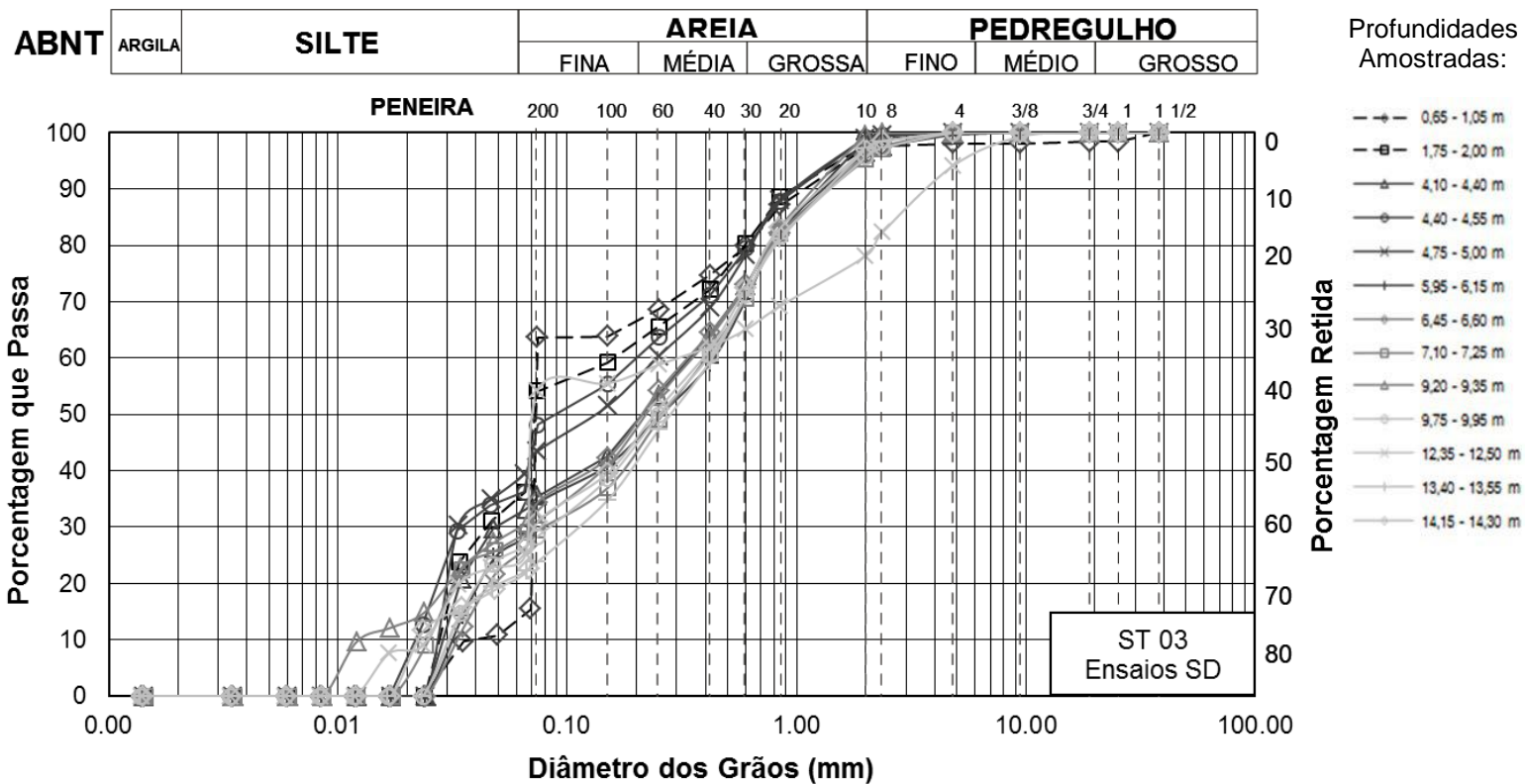
### Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos



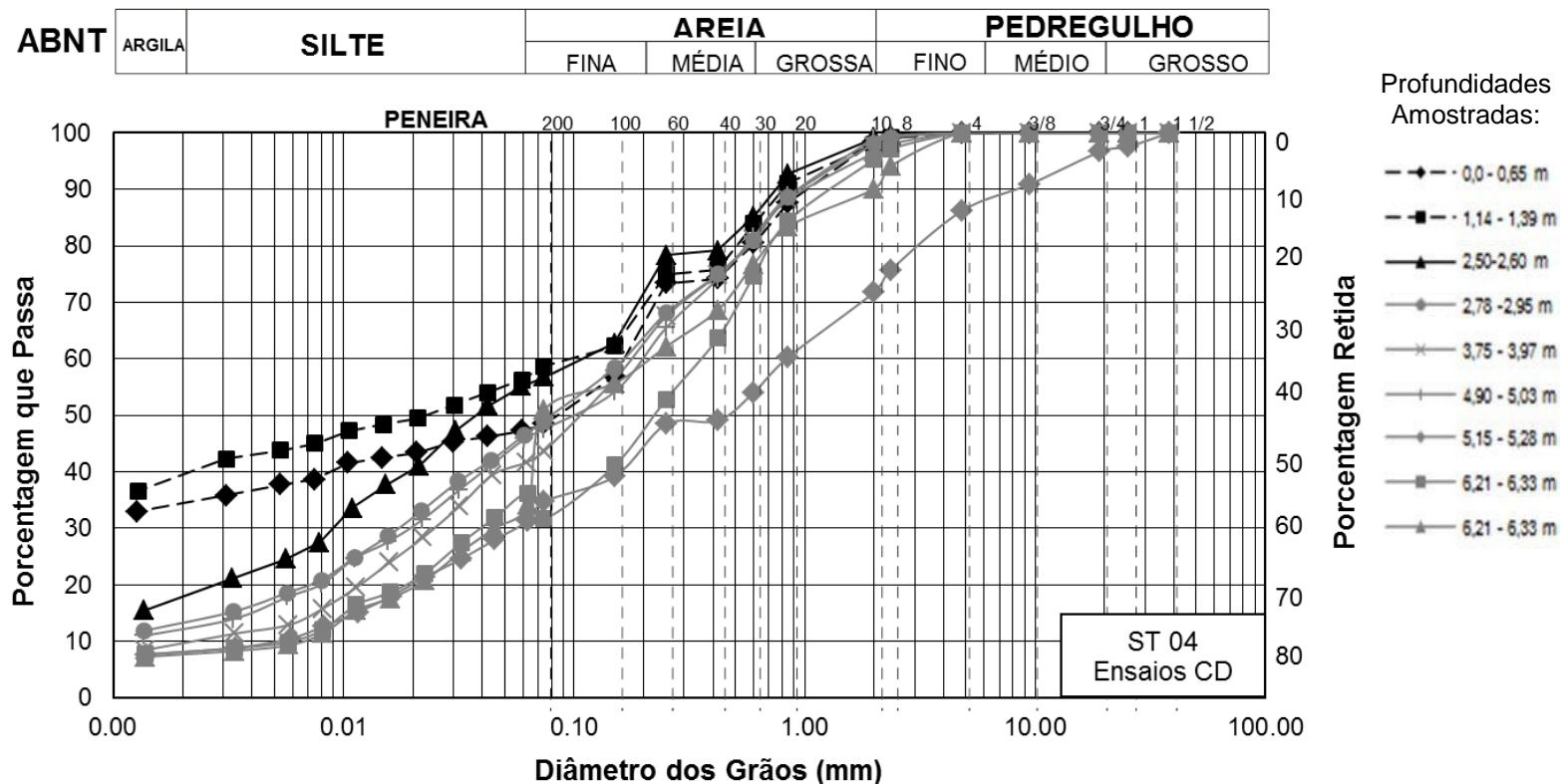
### Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos



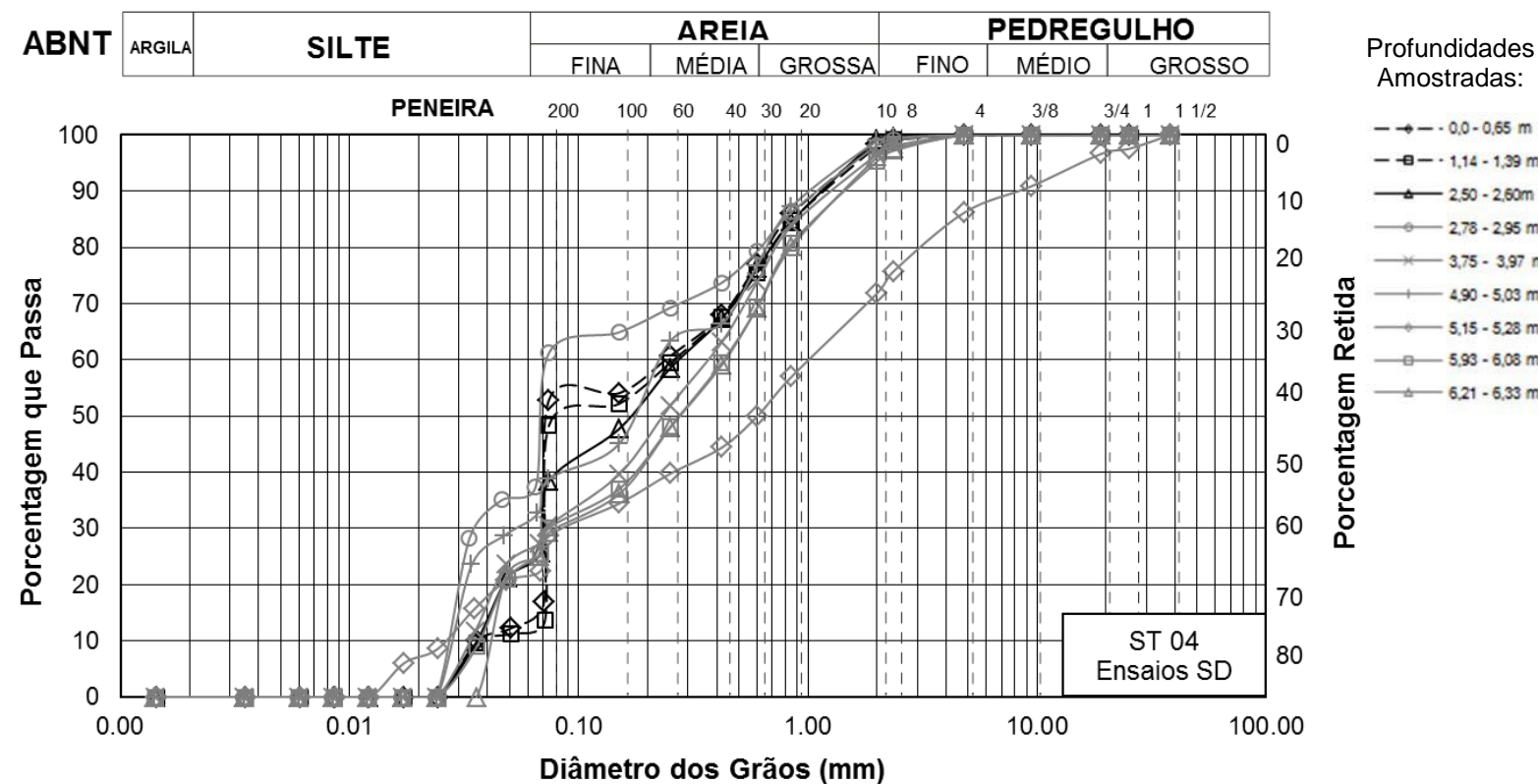
### Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos



### Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos

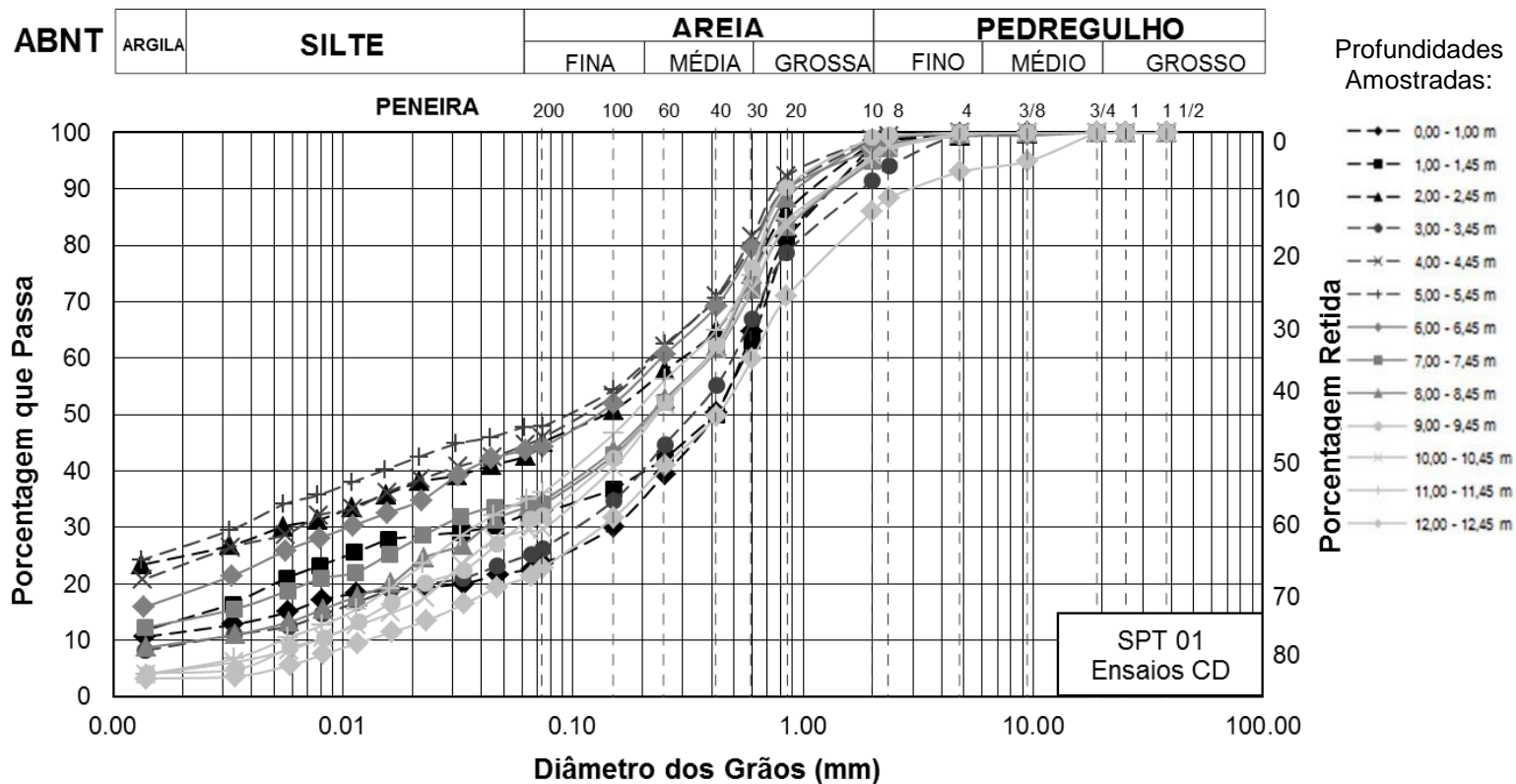


### Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos





### Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos



### Curvas Granulométricas - Ensaios Representativos

