



**COPPE/UFRJ**

**ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS EM ÁREA DE  
DESTRUIÇÃO DE MUNIÇÃO**

Alessandra Almeida Dias da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Maria Claudia Barbosa

Rio de Janeiro

Outubro/2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS EM ÁREA DE  
DESTRUIÇÃO DE MUNIÇÃO

Alessandra Almeida Dias da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Maria Claudia Barbosa, D.Sc.

---

Prof. Francisco José Casanova de Oliveira e Castro, D.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Maria Esther Soares Marques, D.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Elisabeth Ritter, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2010

Silva, Alessandra Almeida Dias da

Estudo da Contaminação por Metais Pesados em  
Área de Destruição de Munição / Alessandra Almeida  
Dias da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XV, 173 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Maria Claudia Barbosa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa  
de Engenharia Civil, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 127-130.

1. Atividades militares e contaminação. 2.  
Investigação Geoambiental 3. Contaminação por metais  
pesados. 4. Transporte de contaminantes no solo.  
Barbosa, Maria Cláudia. II. Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III.  
Titulo.

*“Comece fazendo o que é necessário  
depois o que é possível  
e de repente você estará fazendo o impossível.”  
São Francisco de Assis*

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço a Deus por me guiar até aqui.

Aos meus pais, Maria da Penha e Jorge que sempre estiveram ao meu lado me apoiando incondicionalmente com amor e carinho. Com vocês aprendi a valorizar cada momento da minha vida e sem esse apoio incessante este trabalho não seria realidade.

Ao meu filho Kauan Zion que sempre será a razão para continuar e acreditar que é possível. O seu sorriso me ilumina, nele encontro ânimo para superar as adversidades e seguir em frente. Espero que perdoe todo esse tempo que não tive para você.

Aos meus irmãos Jorge Júnior e Rodrigo pelo carinho, pelas horas de conversa e apoio nos momentos difíceis. Incentivando sempre com soluções logísticas e criativas.

A minha tia Iza pelo apoio e solidariedade.

A minha amiga (e chefe!!) Juçara pelo incentivo e credibilidade. A amizade não tem limites de espaço ou tempo. Agradeço antes de tudo a oportunidade de crescer profissionalmente e pessoalmente convivendo diariamente com você. Sua força é inabalável!

A todos os meus amigos da NORONHA ENGENHARIA e “afins” que sempre me incentivaram. Bernadete, Lorena, Brunna, Desiree, Juliana, Silvana e demais amigos não citados, mas igualmente importantes - Muito Obrigada!!

A minha orientadora Maria Claudia Barbosa, pela paciência, apoio e dedicação. Pelas discussões sempre produtivas que enriqueceram a dissertação.

A Professora Maria Esther Marques pelo apoio e atenção durante a pesquisa, e dedicação na revisão do trabalho.

Ao Professor Francisco Casanova pelos prestimosos esclarecimentos.

A Professora Elisabeth Ritter pelos anos de amizade e atenção.

Ao IME - Instituto Militar de Engenharia pela oportunidade de realizar a pesquisa em conjunto com o Departamento de Geotecnia do PEC/COPPE.

A CAPES pela realização do presente trabalho através do projeto “Sistema de Gestão Ambiental para Atividades Militares” apresentado no Edital Pró-Defesa 2008.

A todos os professores da Área de Geotecnia pelos conhecimentos transmitidos.

Aos funcionários da do Lab.Geo. pela atenção e amizade: Salviano, Eduardo, Márcia, Alice e Stella.

Aos funcionários da Secretaria Acadêmica do Programa de Engenharia Civil pela dedicação e palavras carinhosas de incentivo. Beth, Rita e Jairo muito obrigada.

Aos técnicos do Laboratório pelo apoio valoroso, paciência e amizade. Sérgio lório, Maria da Glória, Hécio, Carlinhos, Tuninho e Luizão, sem o apoio de vocês não seria possível continuar.

Aos meus queridos amigos de 2007: Rafael Cerqueira, Mário Nacinovic, Márcia Ferreira, Ellen, Lídice, Luciano, Graziella, Fábio Hirish, Maurício, Flávia Sant'Anna e toda turma. Obrigada pelos momentos e ensinamentos compartilhados, pela amizade e incentivo.

Aos colegas e parceiros na pesquisa, Tércio Brum e Kary Paiva. Agradeço as inúmeras ajudas e atenção.

A todos que por ventura não coloquei aqui, mas de alguma forma participaram dessa conquista. Muito obrigada!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS EM ÁREA DE DESTRUIÇÃO DE MUNIÇÃO

Alessandra Almeida Dias da Silva

Outubro/2010

Orientadora: Maria Claudia Barbosa

Programa: Engenharia Civil

A contaminação dos solos é um problema comum e antigo nas instalações militares. A produção, manuseio e destruição de munições e explosivos levaram à contaminação de vastas áreas com metais pesados. Estes compostos são persistentes e tóxicos e o monitoramento e remediação adequada dos locais contaminados é uma preocupação crescente. Este trabalho descreve os estudos realizados durante a Investigação Geoambiental realizada pela COPPE em parceria com o IME. O conhecimento do comportamento dos metais no solo é importante para dar subsídios ao projeto de remediação. Alguns parâmetros têm sido utilizados para direcionar estratégias de prevenção ou intervenção de áreas contaminadas. Para isso foram realizados estudos geotécnicos, geofísicos e químicos possibilitando avaliar a retenção de metais pesados no solo, a partir da quantificação dos valores do coeficiente de distribuição ( $K_d$ ) e da relação com os atributos do solo: pH, CTC, teores de argila, TMO. Os resultados dos ensaios geofísicos mostraram-se eficientes na detecção de anomalias condutivas nas áreas mais contaminadas. O comportamento e a mobilidade dos metais Cu e Pb foram priorizados. Estudos anteriores detectaram concentrações significativas desses metais na área de estudo.



Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAVY METALS CONTAMINATION IN AREA FOR  
AMMUNITION DESTRUCTION

Alessandra Almeida Dias da Silva

October/2010

Advisor: Maria Claudia Barbosa

Department: Civil Engineering

Soil contamination is a common problem in military installations. The production, handling and destruction of ammunition and explosives have led to contamination of vast areas with heavy metals. These compounds are persistent and toxic and appropriate remediation of contaminated sites is a growing concern. This work describes the studies involved in a Geoenvironmental Investigation by COPPE and IME in site contaminated by heavy metals. The knowledge of the behavior of metals in soils is important to aid the design of remediation. Some parameters have been used to establish strategies for prevention or intervention of contaminated sites. For that purpose geotechnical, geophysical and chemical studies were performed, in order to evaluate the retention of heavy metals in the soil, based on the quantification of the partition coefficient ( $K_d$ ) and on the relationship with the soil pH, CEC, clay and organic matter contents. The geophysical investigations were effective in the detection of conductivity anomalies at the most contaminated portions of the site, defining the hot spots relative to the presence of heavy metals. The behavior and mobility of Cu and Pb were prioritized. Previous studies have detected significant concentrations of these particular metals in the study area.

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>1</b>  |
| 1.1. APRESENTAÇÃO .....  | 1         |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                                    | <b>3</b>  |
| <b>2.1. CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS</b> .....                        | <b>3</b>  |
| 2.1.1. Origem e Geodisponibilidade dos metais pesados no solo .....      | 3         |
| 2.1.2. Mecanismos de Transporte e Interação .....                        | 6         |
| 2.1.2.1. Processos Físicos .....   | 7         |
| 2.1.2.2. Processos Químicos .....  | 9         |
| 2.1.3. Fatores que influenciam a mobilidade dos metais pesados .....     | 11        |
| 2.1.4. Cobre .....   | 13        |
| 2.1.5. Chumbo .....  | 14        |
| <b>2.2. ATIVIDADES MILITARES E CONTAMINAÇÃO</b> .....                    | <b>16</b> |
| 2.2.1. Atividades de Destruição de Munições e Explosivos no EB .....     | 16        |
| 2.2.1.1. Munições e Explosivos.....                                      | 16        |
| 2.2.1.2. Técnicas utilizadas na Destruição de Munições e Explosivos..... | 21        |
| 2.2.2. Atividades de Destruição de Munições e Explosivos .....           | 23        |
| 2.2.2.1. Técnicas de Destruição de Munições e Explosivos.....            | 24        |
| 2.2.2.2. O Conceito de Análise de Risco .....                            | 25        |
| 2.2.2.3. O Conceito de Ciclo de Vida das Munições.....                   | 26        |
| 2.3.1. O Processo e Fases da Investigação Geoambiental .....             | 30        |
| 2.3.2. Critérios e Valores Orientadores de Qualidade do Solo .....       | 34        |
| <b>3. MÉTODOS</b> .....  | <b>36</b> |
| 3.1. PLANO DE INVESTIGAÇÃO .....   | 36        |
| 3.2. ESTUDOS ANTERIORES .....  | 37        |
| 3.2.1. Estudos da PUC-Rio.....   | 37        |
| 3.2.2. Estudos da UFRRJ .....  | 38        |
| 3.3. CARACTERIZAÇÃO REGIONAL .....                                       | 39        |
| 3.4. SERVIÇOS DE CAMPO .....   | 39        |
| 3.4.1. Coleta de Amostras .....  | 39        |
| 3.4.2. Topografia.....   | 39        |
| 3.4.3. Sondagem à percussão.....   | 40        |
| 3.4.4. Levantamento Geofísico.....                                       | 40        |
| 3.4.4.1. Eletroresistividade .....                                       | 40        |
| 3.5.1. Caracterização Física .....                                       | 42        |
| 3.5.1.1. Adensamento .....   | 42        |
| 3.5.1.2. Permeabilidade .....  | 43        |
| 3.5.1.3. Classificação dos Solos .....                                   | 44        |
| 3.5.2. Análises Físico-químicas.....                                     | 45        |
| 3.5.2.1. Capacidade de Troca Catiônica.....                              | 45        |
| 3.5.2.2. pH, CEE e C <sub>orgânico</sub> .....                           | 46        |
| 3.5.2.3. Extração Sequencial .....                                       | 47        |
| 3.5.3. Análise Mineralógica.....   | 48        |
| 3.5.4. Ensaio de Batelada.....   | 48        |
| 3.5.4.1. Razão Solo:Solução (RSS).....                                   | 49        |
| 3.5.4.2. Determinação do Tempo de Equilíbrio.....                        | 50        |
| 3.5.4.3. Ensaio de Batelada .....  | 50        |

|             |   |            |
|-------------|---|------------|
| <b>4.</b>   | <b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>                             | <b>53</b>  |
| <b>4.2.</b> | <b>CARACTERIZAÇÃO REGIONAL .....</b>                                      | <b>55</b>  |
| 4.2.1.      | Hidrografia .....   | 55         |
| 4.2.2.      | Meteorologia .....  | 56         |
| 4.2.3.      | Vegetação.....  | 58         |
| 4.2.4.      | Solos .....   | 58         |
| 4.2.5.      | Geologia .....  | 60         |
| 4.2.6.      | Geomorfologia .....   | 63         |
| 4.4.1.      | Coleta de Amostras .....  | 67         |
| 4.4.1.1.    | 1ª Campanha de Amostragem de Solo.....                                    | 67         |
| 4.4.1.2.    | 2ª Campanha de Amostragem de Solo.....                                    | 71         |
| 4.4.2.      | Caracterização Física .....   | 72         |
| 4.4.2.1.    | Amostras da 1ª Campanha .....   | 72         |
| 4.4.2.2.    | Amostras da 2ª Campanha .....   | 73         |
| 4.4.2.3.    | Classificação do Solo .....   | 74         |
| 4.4.3.      | Análises Mineralógicas.....   | 75         |
| 4.4.4.      | Análises Físico-Químicas .....  | 77         |
| 4.4.5.      | Sondagem à Percussão .....  | 78         |
| <b>4.5.</b> | <b>IDENTIFICAÇÃO DAS ROTAS DE FLUXO SUPERFICIAL E SUBSUPERFICIAL ....</b> | <b>86</b>  |
| <b>5.</b>   | <b>ANÁLISE DA CONTAMINAÇÃO .....</b>                                      | <b>88</b>  |
| <b>5.1.</b> | <b>IDENTIFICAÇÃO DOS CONTAMINANTES EM POTENCIAL .....</b>                 | <b>88</b>  |
| <b>5.2.</b> | <b>RESULTADOS DOS ESTUDOS ANTERIORES.....</b>                             | <b>89</b>  |
| 5.2.1.1.    | Estudos da PUC-Rio .....  | 89         |
| 5.2.1.2.    | Estudos da UFRRJ.....   | 89         |
| <b>5.3.</b> | <b>RESULTADOS DO LEVANTAMENTO GEOFÍSICO .....</b>                         | <b>93</b>  |
| <b>5.4.</b> | <b>RESULTADOS DA EXTRAÇÃO SEQUENCIAL .....</b>                            | <b>104</b> |
| <b>5.5.</b> | <b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO PARCIAL .....</b>                 | <b>107</b> |
| <b>6.</b>   | <b>PARÂMETROS DE FÍSICOS .....</b>  | <b>112</b> |
| <b>6.1.</b> | <b>PERMEABILIDADE E ADENSAMENTO .....</b>                                 | <b>112</b> |
| 6.1.1.      | Resultados do Ensaio de Adensamento Edométrico .....                      | 112        |
| 6.1.2.      | Resultados do Ensaio de Permeabilidade .....                              | 113        |
| <b>6.2.</b> | <b>RESULTADOS DO ENSAIO DE BATELADA .....</b>                             | <b>114</b> |
| 6.2.1.      | Razão Solo: Solução .....   | 114        |
| 6.2.2.      | Tempo de Equilíbrio.....  | 116        |
| 6.2.3.      | Procedimento do Ensaio de Batelada .....                                  | 117        |
| <b>6.3.</b> | <b>CONCLUSÕES PARCIAIS.....</b>   | <b>122</b> |
| <b>7.</b>   | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISA FUTURA.....</b>                   | <b>123</b> |
| <b>7.1.</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>  | <b>123</b> |
| <b>7.2.</b> | <b>SUGESTÕES PARA PESQUISA .....</b>                                      | <b>125</b> |
|             | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                   | <b>127</b> |

## **LISTA DE FIGURAS**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figura 2.1: Detalhe do Cartucho: 1-Projétil, 2-Estojos, 3-Carga de Projecção, 4-Viola de Extração, 5-Cápsula de Deflagração (Fonte: BRUM, 2010).....</b>                            | <b>17</b> |
| <b>Figura 2.2: Organograma de Explosivos (Fonte: BRUM, 2010).....</b>  | <b>20</b> |
| <b>Figura 2.3: Processo de Queima à céu aberto no DCMun(Fonte: BRUM, 2010).....</b>  | <b>21</b> |
| <b>Figura 2.4: Processo de Detonação a céu aberto no DCMun (Fonte: BRUM, 2010). .....</b>  | <b>22</b> |
| <b>Figura 3.1: Geometria do arranjo do CE com avanço lateral (Fonte: SOUZA, 2006) .....</b>  | <b>42</b> |
| <b>Figura 3.2: Triângulo de classificação textural de solos (Fonte:VIEIRA, 1988).....</b>  | <b>44</b> |
| <b>Figura 4.1: Localização do DCMun (Fonte: Google Earth, 2009). .....</b>   | <b>53</b> |
| <b>Figura 4.2: Visão da área de destruição no DCMun (Fonte: Google Earth, 2009). .....</b>   | <b>54</b> |
| <b>Figura 4.3: Vista frontal da área de destruição no DCMun. ....</b>  | <b>54</b> |
| <b>Figura 4.4: Limites das sub-bacias hidrográficas do Rio Guandu (Fonte: ANA, 2006). ....</b>   | <b>55</b> |
| <b>Figura 4.5: Localização da Serra do Cambraia-zona limítrofe das sub-bacias hidrográficas (Fonte: Google Earth, 2009). .....</b>   | <b>56</b> |
| <b>Figura 4.6: Mapa de Solos do Estado do Rio de Janeiro (Fonte: CPRM,2001).....</b>   | <b>59</b> |
| <b>Figura 4.7: Mapa de domínios Geológicos (Fonte: CPRM, 2001).....</b>  | <b>62</b> |
| <b>Figura 4.8: Vista do relevo da área de destruição do DCMun (Fonte: Google Earth, 2009) .....</b>  | <b>64</b> |
| <b>Figura 4.9: Superposição ilustrativa das curvas de nível na área de (Fonte:Google Earth, 2009). .....</b>   | <b>65</b> |
| <b>Figura 4.10: Levantamento Planialtimétrico da área de destruição do DCMun com a locação dos pontos de sondagem SPT, perfis do subsolo e áreas para Levantamento Geofísico. ....</b> | <b>66</b> |
| <b>Figura 4.11: Identificação visual de tipos de solo para amostragem (em 07/10/2009). ....</b>  | <b>67</b> |
| <b>Figura 4.12: Coleta de amostra no Ponto 1 (em 07/10/2009). .....</b>  | <b>69</b> |
| <b>Figura 4.13: Vista frontal da área do Solo 2. Proximidade do ponto 4 (em 15/10/2009). ...</b>   | <b>69</b> |
| <b>Figura 4.14: Localização da coleta de amostra nos Pontos 3 e 5 (realizadas os dias 7 e 15 de 10/2009 respectivamente).....</b>  | <b>69</b> |
| <b>Figura 4.15: Limpeza e retirada do material adjacente para liberar a amostra.....</b>   | <b>70</b> |
| <b>Figura 4.16: Regularização e colocação da amostra deformada em saco fechado.....</b>  | <b>70</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figura 4.17: Regularização e colocação do cilindro com amostra indeformada em saco fechado.....</b>                                | <b>70</b> |
| <b>Figura 4.18: Coleta de amostras de Solo 2 no ponto 4 .....</b>   | <b>71</b> |
| <b>Figura 4.19: Coleta de amostras do Solo 3 no ponto 5. ....</b>   | <b>72</b> |
| <b>Figura 4.20: Difratoograma – Amostra 4 .....</b>   | <b>76</b> |
| <b>Figura 4.21: Difratoograma – Amostra 5 .....</b>   | <b>76</b> |
| <b>Figura 4.22: Execução do furo SP06-sondagem à percussão. ....</b>  | <b>79</b> |
| <b>Figura 4.23: Restos de explosivos parcialmente destruídos .....</b>  | <b>79</b> |
| <b>Figura 4.24: Munições não detonadas que permaneceram na área de destruição (Fonte: BRUM, 2010).....</b>                            | <b>80</b> |
| <b>Figura 4.25: Perfil A-A’ – sondagens SP05 – SP04A. ....</b>  | <b>83</b> |
| <b>Figura 4.26: Perfil B-B’ – sondagens SP04A – SP04. ....</b>  | <b>84</b> |
| <b>Figura 4.27: Perfil C-C’ – sondagens SP03 - SP05 – SP06.....</b>   | <b>85</b> |
| <b>Figura 4.28: Vista frontal da área de destruição após a ocorrência de fortes chuvas .....</b>                                      | <b>86</b> |
| <b>Figura 4.29: Afloramento do NA no centro da área de destruição.....</b>  | <b>87</b> |
| <b>Figura 4.30: Localização aproximada do corpo hídrico receptor (Fonte:Google Earth, 2010). ....</b>                                 | <b>87</b> |
| <b>Figura 4.31: Visão macro do curso do corpo hídrico até o Rio Ribeirão das Lages. (Fonte:Google Earth, 2010). ....</b>              | <b>88</b> |
| <b>Figura 5.1: Área de estudo com grade de amostragem de solo para análise geoestatística (Fonte: AMARAL SOBRINHO, 2008).....</b>     | <b>89</b> |
| <b>Figura 5.2: Correlação dos pontos de amostragem realizados em 2008 com a área de destruição (Fonte:Google Earth-set/2009).....</b> | <b>90</b> |
| <b>Figura 5.3: Mapa de variabilidade espacial da concentração de Chumbo na área de destruição (Fonte:AMARAL SOBRINHO, 2008).....</b>  | <b>92</b> |
| <b>Figura 5.4: Mapa de variabilidade espacial da concentração de Cobre na área de destruição (Fonte:AMARAL SOBRINHO, 2008).....</b>   | <b>92</b> |
| <b>Figura 5.5: Localizaçõa dos Caminhamentos Elétricos na área de destruição.....</b>   | <b>93</b> |
| <b>Figura 5.6: Lay-out das Seções (Caminhamentos Elétricos) da ÁREA 1.....</b>  | <b>94</b> |
| <b>Figura 5.7: Leitura na seção CE-2 da ÁREA 1, região central da área de destruição.....</b>   | <b>95</b> |
| <b>Figura 5.8: Leitura na seção CE-2 da ÁREA 1 à jusante da área de destruição.....</b>   | <b>95</b> |
| <b>Figura 5.9: Seção CE-5 da ÁREA 1.....</b>  | <b>96</b> |
| <b>Figura 5.10: Lay-out das Seções (Caminhamentos Elétricos) da ÁREA 2.....</b>   | <b>97</b> |
| <b>Figura 5.11: Leitura na seção CE-1 da ÁREA 2.....</b>  | <b>98</b> |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.12: Leitura na seção CE-1 da ÁREA 2.....                          | 98  |
| Figura 5.13: Lay-out das Seções (Caminhamentos Elétricos) da ÁREA 3.....   | 99  |
| Figura 5.14: Leitura na seção CE-1 da ÁREA 3.....                          | 100 |
| Figura 5.15: Leitura na seção CE-2 da ÁREA 3.....                          | 100 |
| Figura 5.16: Curvas de isorresistividade da Área 1.....                    | 101 |
| Figura 5.17: Curvas de isorresistividade da Área 2.....                    | 102 |
| Figura 5.18: Curvas de isorresistividade da Área 3.....                    | 103 |
| Figura 5.19: Extração Sequencial do Solo 1 (AM01) para Cu / Pb .....       | 105 |
| Figura 5.20: Extração Sequencial do Solo 3 (AM03/05) para Cu / Pb .....    | 105 |
| Figura 5.21: Extração Sequencial do Solo 2 (AM04-A/B) para Cu / Pb.....    | 106 |
| Figura 5.22: Extração Sequencial do Solo 2 (AM0A-C/D) para Cu / Pb .....   | 106 |
| Figura 5.23: Extração Sequencial do Solo 2 (AM04E) para Cu / Pb .....      | 106 |
| Figura 5.24: Perfil geotécnico agrupado a seção geofísica Área 1-CE2 ..... | 111 |
| Figura 6.1: Ponto discrepante – AM04 / Cu .....                            | 119 |
| Figura 6.2: Isotermas – Chumbo.....  | 120 |
| Figura 6.3: Isotermas – Cobre.....   | 121 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 4.1: Resumo dos resultados da determinação da Umidade e Gs.....             | 72 |
| Tabela 4.2: Resumo dos resultados das Análises Granulométricas.....                | 73 |
| Tabela 4.3: Resumo dos resultados da determinação da Umidade Higroscópica e Gs.... | 73 |
| Tabela 4.4: Resumo dos resultados das Análises Granulométricas.....                | 73 |
| Tabela 4.5: Limites de Atterberg.....  | 73 |
| Tabela 4.6: Classificação Textural do solo.....                                    | 74 |
| Tabela 4.7: Classificação do solo.....   | 74 |
| Tabela 4.8: Resultados das Análises Físico-Químicas .....                          | 77 |
| Tabela 4.9: Identificação do solo numerado no perfil da SP-04A .....               | 81 |
| Tabela 4.10: Identificação do solo numerado no perfil da SP-03.....                | 81 |
| Tabela 4.11: Identificação do solo numerado no perfil da SP-05.....                | 81 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 4.12: Identificação do solo numerado no perfil da SP-04.....   | 81  |
| Tabela 4.13: Identificação do solo numerado no perfil da SP-06.....   | 82  |
| Tabela 5.1: Valores Orientadores para solo (mgkg <sup>-1</sup> ).....   | 91  |
| Tabela 5.2: Resumo das análises dos metais Chumbo e Cobre no solo.....  | 91  |
| Tabela 5.3: Total das frações obtidas na Extração Seqüencial.....   | 104 |
| Tabela 5.4: Percentual das frações da Extração Seqüencial para Cu e Pb.....                                     | 105 |
| Tabela 6.1: Índices físicos – condições iniciais dos corpos de prova.....                                       | 112 |
| Tabela 6.2: Parâmetros de compressibilidade –Solo 2.....  | 113 |
| Tabela 6.3: Parâmetros de compressibilidade –Solo 3.....  | 113 |
| Tabela 6.4: Coeficientes de permeabilidade.....   | 114 |
| Tabela 6.5: Resumo dos resultados de RSS para solução de 85ppm de Pb.....                                       | 114 |
| Tabela 6.6: Resumo dos resultados de RSS para solução de 291ppm de Pb.....                                      | 115 |
| Tabela 6.7: RSS adotadas para Pb.....   | 115 |
| Tabela 6.8: Resumo dos resultados de RSS para solução de 975 ppm de Cu.....                                     | 116 |
| Tabela 6.9: RSS adotadas para Cu.....   | 116 |
| Tabela 6.10: Resumo dos resultados da determinação do Tempo de equilíbrio - Pb.....                             | 116 |
| Tabela 6.11: Resumo dos resultados da determinação do Tempo de equilíbrio - Cu.....                             | 117 |
| Tabela 6.12: Resumo dos parâmetros obtidos nos modelos linearizados das Isotermas de Freundlich e Langmuir..... | 118 |
| Tabela 6.13: Parâmetros obtidos nos modelos linearizados para AM04 – Cu, considerando ponto discrepante.....    | 118 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 2.1: Composição da munição de armamento leve (Fonte: BRUM, 2009). .....  | 17 |
| Quadro 2.2: Composição da munição de armamento pesado (Fonte: BRUM, 2010).....  | 18 |
| Quadro 2.3: Relação de alguns contaminantes provenientes da detonação de munições e explosivos (Fonte: BRUM, 2010)..... | 22 |
| Quadro 2.4: Resumo da análise de risco para QA / DA (Fonte: DUIJM, 2001).....   | 25 |
| Quadro 2.5: Resumo dos processos analisados no Ciclo de Vida da granada (Fonte: ALVERBROA et al.,2009). .....           | 28 |
| Quadro 2.6: Lista de valores orientadores para solos e para águas subterrâneas (Fonte: CONAMA, 2009). .....             | 35 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Quadro 3.1: Atividades realizadas no Plano de Investigação e Monitoramento da Área de Desmilitarização do DCMun, RJ. ....</b> | <b>37</b> |
| <b>Quadro 4.1: Classificação vigente dos solos (Fonte: EMBRAPA, 1999).....</b>   | <b>58</b> |
| <b>Quadro 4.2: Correlação dos pontos de coleta com os tipos de solo identificados.....</b>                                       | <b>68</b> |
| <b>Quadro 4.3: Identificação das amostras da 1ª Campanha de Coleta.....</b>  | <b>68</b> |
| <b>Quadro 4.4: Identificação das amostras da 2ª Campanha de Coleta.....</b>  | <b>71</b> |

## LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $\mu\text{m}$         | – micro metro $1 \times 10^{-6}$ m   |
| ABNT                  | – Associação Brasileira de Normas Técnicas   |
| ACI                   | – Área Contaminada sob Intervenção   |
| AI                    | – Área Contaminada sob Investigação  |
| AMR                   | – Área em Processo de Monitoramento para Reabilitação                                    |
| ANA                   | – Agência Nacional de Águas  |
| AS                    | – Área Suspeita de Contaminação  |
| As                    | - arsênio  |
| As                    | – atividade da argilas, índices de Skempton  |
| $a_v$                 | – coeficiente de compressibilidade   |
| Cd                    | – cádmio   |
| CE                    | - caminhamento elétrico  |
| CEE                   | – condutividade elétrica específica  |
| CETESB                | - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental no Estado de São Paulo                  |
| Co                    | – cobalto  |
| CONAMA                | – Conselho Nacional de Meio Ambiente   |
| $C_{\text{orgânico}}$ | – carbono orgânico   |
| CPRM                  | – Serviço Geológico do Brasil - razão social: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais |
| Cr                    | - cromo  |
| CTC                   | – capacidade de troca catiônica  |
| Cu                    | - cobre  |
| DA                    | – detonação aberta   |
| DCMun                 | – Depósito Central de Munição  |
| DF                    | – detonação fechada  |
| DNER                  | – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem   |
| $e_0$                 | – índice de vazios inicial   |
| EB                    | – Exército Brasileiro  |
| $e_m$                 | – índice de vazios médio   |
| EMBRAPA               | – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias  |
| Fe                    | - ferro  |
| $G_s$                 | – densidade real dos grãos   |
| HCl                   | – ácido clorídrico   |
| Hg                    | - mercúrio   |
| ICP-AES               | – espectrofotometria de emissão com fonte de plasma indutivo                             |
| ICP-MS                | – espectrofotometria de massa com fonte de plasma indutivo                               |
| IF                    | – incineração com forno estático rotativo  |



IFM – incineração com forno móvel  
I<sub>p</sub> – índice de plasticidade  
KCl – cloreto de potássio  
K<sub>d</sub> – coeficiente de distribuição  
K<sub>f</sub> – função de distribuição  
LIGHT – Companhia de Energia Elétrica do Rio de Janeiro  
LQA – limite de quantificação da amostra  
LQP – limite de quantificação praticável  
mesh – número de malhas por polegada  
Mg - magnésio  
Mn – manganês  
m<sub>v</sub> – coeficiente de decréscimo de volume  
Pb - chumbo  
PGAEB - Política de Gestão Ambiental do Exército Brasileiro  
PUC-RIO – Universidade Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
QA – queima aberta  
S<sub>0</sub> – saturação inicial  
SEV – sondagem elétrica vertical  
SGA – Sistema de Gestão Ambiental  
SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos  
UFF – Universidade Federal Fluminense  
UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
USEPA - United States Environmental Protection Agency  
VI – Valor de Investigação  
VR - valores de referência  
VRQ – Valores Orientadores de Referência de Qualidade  
w<sub>0</sub> – umidade inicial  
w<sub>L</sub> – limite de liquidez  
w<sub>P</sub> – limite de plasticidade  
Zn – zinco  
Δe– decréscimo de índice de vazios  
ΔV - diferença de potencial

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. APRESENTAÇÃO**

Este estudo faz parte do projeto de pesquisa “Sistema de Gestão Ambiental para Atividades Militares” (2009-2012) financiado pela Capes sob liderança do IME - Instituto Militar de Engenharia, em parceria com a COPPE-UFRJ, Programa de Engenharia Civil.

Várias atividades dão suporte logístico aos exercícios e operações realizadas pelo Exército Brasileiro para simulação de situações de combate. Estas atividades incluem manutenção dos veículos empregados e dos paióis onde as armas e munições são guardadas, aulas de tiro, detonação de munição com "prazo de validade vencido", acampamentos e deslocamento de tropas para fins diversos entre outras. Compete também ao exército a atividade de destruição das armas apreendidas e recolhidas à Instituição pelos Órgãos de Justiça, para que lhes seja dado o destino previsto na legislação específica (art. 25 da Lei nº 10.826). Os produtos controlados apreendidos devem ser encaminhados aos depósitos e paióis das Unidades do Exército. A destinação final do material apreendido, após o esgotamento de todos os recursos cabíveis, é a destruição. Ainda hoje, adota-se a destruição diretamente no solo, de acordo com os manuais técnicos T9 e 105 do Exército Brasileiro (BRUM, 2010).

Ainda não existe no Brasil um programa de remediação de áreas de uso militar e nenhuma atividade militar possui licenciamento ambiental. No entanto, conforme descrito em BRUM (2010), este quadro vem sendo alterado nos últimos anos, e em 2001 foi publicada pelo Comandante do Exército a portaria n. 570, que define a Política de Gestão Ambiental do Exército Brasileiro – PGAEB. Nos países mais desenvolvidos a pressão da sociedade sobre as Forças Armadas motivou trabalhos de investigação e remediação de sítios impactados por atividades militares a mais tempo, mas de modo geral este assunto só começou ser tratado a partir do final dos anos 90. Trata-se portanto, de um tema bastante novo mesmo em âmbito internacional.

O projeto IME-COPPE tem como objetivo final desenvolvimento de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) para o Exército Brasileiro (EB), calcado na norma ISO 14001. Para alcançar este propósito, o projeto prevê diferentes atividades, entre as quais identificar os impactos ambientais negativos e parâmetros indicadores para as diversas atividades militares, e desenvolver metodologias para investigação e remediação de sítios impactados por estas atividades. Estas metodologias devem

levar em conta as características específicas de cada atividade, e irão gerar posteriormente procedimentos e normas operacionais no EB a serem aplicadas em todo território nacional.

Por solicitação do próprio EB, o estudo foi iniciado com a questão dos impactos associados à atividade de destruição de munição e explosivos inservíveis, tomando por base área no Estado do Rio de Janeiro em operação desde a década de 60. Em 2003 esta área se tornou objeto de uma ação do Ministério Público Federal no RJ, que cobrou estudos de avaliação dos impactos ambientais para a comunidade vizinha. A presente pesquisa está relacionada aos estudos realizados na área em questão no período 2009/2010.

## **1.2. OBJETIVOS**

A pesquisa teve como objetivo geral reunir as informações disponíveis na literatura técnica e dados levantados pela investigação de uma área de destruição de munição em particular, para caracterizar o impacto da atividade sobre o ambiente, do ponto de vista da contaminação por espécies químicas. Pretende-se, com esse estudo, permitir a modelagem posterior do problema a qual irá subsidiar a proposição de mudanças das normas de operação e de medidas de controle e remediação no local estudado e em áreas semelhantes.

Como objetivos específicos a pesquisa visou:

- Caracterizar a atividade de destruição de munição como fonte de contaminação;
- Caracterizar a área de estudo sob os aspectos físicos (relevo, hidrografia), geológico-geotécnico (estratigrafia), e hidrogeológico;
- Testar a geofísica por eletrorresistividade como técnica de investigação neste tipo de problema;
- Identificar as rotas de transporte da contaminação na área de estudo;
- Determinar em laboratórios os parâmetros mais relevantes para os principais estratos de solo identificados, com ênfase nos metais Pb e Cu.

## **1.3. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS**

Uma breve revisão é apresentada no Capítulo 2 como um referencial teórico visando dar suporte ao entendimento do estudo realizado. Os processos de interação entre o solo e o contaminante de interesse e a contaminação por metais pesados foram descritos sucintamente. A caracterização e as atividades relativas à destruição

de munições e explosivos militares realizadas na unidade militar foram apresentadas. A relação entre as atividades militares e a contaminação no Brasil e no contexto mundial também foram discutidas. Foram mencionadas as atividades geralmente envolvidas em uma Investigação Ambiental.

O Capítulo 3 refere-se aos métodos utilizados no Plano de Investigação, na Caracterização Regional, nos Estudos Anteriores e nos Serviços de Campo.

Nos Capítulos 4 e 5 são apresentados os resultados obtidos na Caracterização da Área e na Análise da Contaminação.

O Capítulo 6 discorre sobre os parâmetros de transporte do Pb e do Cu. São apresentados os resultados dos ensaios de batelada. No fim do capítulo é apresentada uma discussão sobre os resultados obtidos e conclusões parciais.

No Capítulo 7 são apresentadas as Conclusões Finais e Sugestões para pesquisa.

No final da dissertação são listadas as Referências Bibliográficas e os Anexos com dados adicionais dos ensaios, gráficos e boletins.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS**

#### **2.1.1. Origem e Geodisponibilidade dos metais pesados no solo**

Os contaminantes inorgânicos mais tóxicos que ocorrem em solos estão sob a designação de "metais pesados". Este termo é utilizado para identificar conjunto de elementos químicos pertencentes aos grupos de transição da tabela periódica, cujas formas iônicas possuem densidade atômica elevada (maior que  $6,0 \text{ g cm}^{-3}$ ) ou massa atômica maior que 20. Além dos metais faz parte desse conjunto o grupo dos semi-metais e não-metais (MATOS et al., 1996 apud ALMEIDA, 2009).

Alguns elementos deste grupo, os chamados micronutrientes, são requeridos pela maioria dos organismos vivos em pequenas concentrações podendo causar toxicidade quando em excesso como o Cu, Mn, Fe e Zn. Os elementos que não apresentam funções biogeoquímicas essenciais são chamados de "elementos não-essenciais" ou "elementos tóxicos". Tais elementos causam toxicidade em concentrações que excedem a tolerância dos organismos, mas não causam deficiência em baixas concentrações, como os micronutrientes (NASCENTES, 2003

apud ALMEIDA, 2009). São considerados os mais perigosos para a saúde humana e para o meio ambiente os metais As, Cd, Cu, Hg, Pb e Zn.

O teor natural desses elementos no solo varia com o tempo de ocorrência dos processos de formação do solo (pedogênese e intemperismo) e a composição química do material de origem. É importante avaliar os teores disponíveis ou solúveis destes elementos uma vez que eles estarão relacionados com a mobilidade e com a absorção dos mesmos pelas plantas.

A distribuição de metais como Mn, Zn, Cu, Co, Cr, Pb e Cd ao longo de perfis de solo e na camada superficial demonstram que os processos de formação de solos trazem como consequência a separação desses elementos entre vários componentes, o que causa diferença no padrão de distribuição (CAMARGO et al., 2001 apud ALMEIDA, 2009).

Quanto à origem, os metais presentes no solo podem ser classificados como litogênicos e antropogênicos. São consideradas fontes antropogênicas as atividades militares, indústrias químicas e metalúrgicas, mineração, pesticidas agrícolas e esgotos domésticos.

São considerados litogênicos quando advêm de fontes naturais como depósitos minerais. Como parte dos ciclos biogeoquímicos naturais, a fração litogênica destes elementos é liberada das rochas por processos de intemperismo e são ciclados, através dos vários compartimentos, por processos bióticos e abióticos, até que encontram seu destino final nos oceanos ou nos sedimentos (ZHANG et al., 2002 apud ALMEIDA, 2009).

A ocorrência natural de metais pesados em solos depende, principalmente, dos processos de formação, do material de origem sobre o qual o solo se formou e da composição e proporção dos componentes de sua fase sólida. A relação do solo com o material de origem é bastante evidenciada quando o primeiro é formado "in situ" sobre a rocha, tornando-se menos expressiva nos solos originados sobre materiais previamente intemperizados. Solos com origem em rochas básicas, naturalmente mais ricas em metais, apresentam maiores teores de metais quando comparados com aqueles formados sobre granitos, gnaisses, arenitos e siltitos (VALADARES, 1975; ROVERS et al., 1983; TILLER, 1989; OLIVEIRA, 1996 apud FADIGAS et al., 2002).

O Fe e o Mn normalmente aparecem em maior quantidade nos solos. Suas concentrações quase sempre são muitas vezes maiores que a dos demais elementos, especialmente as do Fe. De acordo com MELFI et al. (1979) apud FADIGAS et al., 2002 solos com horizontes relativamente pobres em Fe (teor de  $Fe^2O_3 < 50 \text{ g.kg}^{-1}$ )

ocupam 36,2% do território brasileiro; aqueles com teores de Fe variando entre 50 e 250 g.kg<sup>-1</sup> representam 58,8% da superfície, enquanto os mais ferríferos (com mais de 250 g.kg<sup>-1</sup> de Fe<sup>2</sup>O<sub>3</sub>), apenas 5%.

Os valores médios de concentração de metais no âmbito mundial são bastante heterogêneos. Essas variações decorrem principalmente da diversidade de solos e dos diferentes métodos de extração e análise utilizados. No Brasil alguns levantamentos de teores foram realizados, entretanto os valores de referência no solo para uma possível avaliação de contaminação ainda não foram definidos. O conhecimento das concentrações naturais poderá servir de suporte para definição de padrões de referência.

Na avaliação da extensão da poluição de uma área, é comum comparar os teores totais de metais pesados encontrados no solo da área supostamente poluída com aqueles defrontados em condições naturais (não poluídos) ou com valores de referência (padrões). Para as substâncias inorgânicas de interesse ambiental (metais pesados) que ocorrem naturalmente no solo, os valores de referência de qualidade podem ser estabelecidos em função das suas concentrações naturais, levando-se em consideração a variação das propriedades do solo. Os níveis de metais em solos têm sido referidos por alguns autores como os teores relativos às linhas de base geoquímicas dos elementos (SALMINEN e TARVAINEN, 1997 apud ALMEIDA, 2009).

FADIGAS et al., 2006 relacionam diferentes metodologias utilizadas para se estabelecer os valores de referência (VR) de metais pesados em solos. As mais comuns são: (i) o uso de valores considerados normais citados na literatura; (ii) o estabelecimento de faixas de referência obtidas a partir de amostras controle, tomadas em áreas sem atividade antrópica, o mais longe possível de fontes de poluição (CASARINI, 2000; CROCK et al., 1992 apud FADIGAS et al., 2006) e (iii) separação entre valores normais e anômalos, obtidos de uma coleção de dados que inclui solos contaminados e não contaminados (TOBIAS et al., 1997a; WANG, 1994 FADIGAS et al., 2006).

O estabelecimento de faixas de concentração de referência e de limites máximos considerados normais no solo tem sido feito por meio de diferentes procedimentos de estatísticos (FADIGAS et al., 2002). Técnicas da estatística multivariada como análise de agrupamento e análise discriminante foram utilizadas em estudos geoquímicos (MOURA, 1985; OLIVEIRA et al., 1998 apud FADIGAS et al., 2002) e de inter-relações entre atributos do solo e produtividade de cultivos, as quais

apresentam potencial para uso no estabelecimento e proposição de valores de referência de metais em solos.

Alguns atributos do solo se destacam pela relação com o conteúdo de metais pesados. Diversos autores encontraram correlações positivas entre o teor de argila e ferro e os teores totais de metais (PÉREZ et al., 1997; ROVERS et al., 1983; SANTOS FILHO & ROCHA, 1982; SOUZA et al., 1996; VALADARES & CATANI, 1975; VALADARES, 1975; apud FADIGAS et al., 2002).

Também pode haver associação entre metais pesados e a fração silte, visto que nesta fração do solo podem ser encontradas partículas finas (argila) e óxidos, devido à ineficiência no processo de dispersão dos solos durante a análise granulométrica (KLAMT & VAN REEUWIJK, 2000; LIMA, 1984 apud FADIGAS et al., 2002); por outro lado, nem sempre se obteve correlação significativa com a matéria orgânica e o pH do solo (FURLANI et al., 1977; LAVADO et al., 1998; QIAN et al., 1996 apud FADIGAS et al., 2002).

### **2.1.2. Mecanismos de Transporte e Interação**

A contaminação do solo é a principal causa da deterioração das águas subterrâneas. Os processos de contaminação no solo geralmente ocorrem lentamente e podem ter efeitos sérios e possivelmente irreversíveis. Neste estudo o contaminante é proveniente da destruição de munições e explosivos; as partículas oriundas das explosões se depositam no solo. Os metais também se originam da degradação de munições e explosivos não destruídos que permanecem enterrados na área de destruição.

O transporte de poluentes em solos pode ser definido como sendo o movimento de determinado composto em meio a uma ou mais camadas de solo em ambiente saturado ou não. A migração de contaminantes em meios porosos é governada por diversos processos. Os processos físicos envolvem os fenômenos da advecção e dispersão hidrodinâmica, enquanto os processos químicos englobam as diversas reações químicas que podem ocorrer entre a solução contaminada e o solo.

GUEDES, 2009 cita que para melhor entendimento da dinâmica dos metais pesados no solo advindos de várias formas e de várias direções, é de fundamental importância o conhecimento das formas geoquímicas e da reatividade dos constituintes do solo.

A compreensão dos mecanismos de transporte dos metais no solo associada a programas de monitoramento de campo permitem avaliação da migração dos compostos no solo e águas subterrâneas.

Vários fatores influenciam o transporte, quanto ao solo destacam-se o teor e tipo de matéria orgânica, análise granulométrica, análise mineralógica e teor de finos, distribuição de vazios e capacidade de troca catiônica. A movimentação dos contaminantes no solo divide-se em processos Físico e Bio Físico-químicos.

Processos Físicos:

Advecção, Dispersão Hidrodinâmica (Dispersão Mecânica e Difusão Molecular);

Processos Bio Físico-Químicos:

Retardamento ou Aceleração: Adsorção/Dessorção; Precipitação/Dissolução; Troca Iônica, Oxido-Redução; Co-Solvência; Complexação; Ionização; Sorção Biológica e Filtração.

Degradação ou Decaimento: Óxido-Redução; Hidrólise; Metabolização e Volatilização.

Será apresentado um resumo dos mecanismos mais relevantes nesse estudo.

### 2.1.2.1. Processos Físicos

#### Advecção

Advecção é o processo pelo qual o soluto é carregado pela água em movimento. No transporte advectivo de solutos que não interagem com o meio poroso, a frente de contaminação é abrupta e move-se a uma velocidade igual à velocidade linear média ( $v$ ) do fluido percolante, geralmente a água, sem que seu pico de concentração seja alterado.

Supondo a lei de Darcy a velocidade de percolação do fluido é definida como sendo a velocidade de Darcy dividida pela porosidade efetiva do meio conforme a Equação 2.1.

Equação 2.1

$$v = \frac{k \times i}{n}$$

Onde:

$k$ =coeficiente de permeabilidade do solo na direção do fluxo;



n=porosidade efetiva do meio;

i=gradiente hidráulico.

A advecção pode ser considerada como um transporte químico causado por um gradiente hidráulico: a água flui através dos vazios do solo devido à ação deste gradiente, carregando consigo íons/moléculas em solução. (MITCHELL, 1991 apud MENDONÇA, 2000).

## Dispersão ou Dispersão Hidrodinâmica

A dispersão hidrodinâmica possui duas componentes: a dispersão mecânica e a difusão molecular. Assim, a variável que descreve a dispersão hidrodinâmica (D) pode ser definida como a soma de duas parcelas, que representam a dispersão mecânica ( $\alpha v$ ) e a difusão molecular ( $D^*$ ), conforme a Equação 2.2 (FREEZE e CHERRY, 1979):

Equação 2.2

$$D = \alpha * v + D^*$$

Onde:

D=coeficiente de dispersão hidrodinâmica;

$\alpha$ =coeficiente de mistura mecânica ou dispersividade;

v =velocidade de percolação do fluido;

$D^*$ =coeficiente de difusão molecular do soluto no meio.

O parâmetro  $\alpha$  é uma propriedade característica do meio poroso, enquanto  $D^*$  é propriedade da substância e do meio.

### *Dispersão Mecânica*

Este fenômeno causa um espalhamento do contaminante devido às variações de velocidade do fluido dentro do meio poroso. Numa escala microscópica a dispersão mecânica resulta de três mecanismos básicos. O primeiro ocorre em canais individuais devido à rugosidade da superfície dos poros. As moléculas que estão mais próximas dos grãos têm maior atrito, portanto, movem-se mais lentamente. O segundo processo depende do tamanho dos poros na trajetória. Com a diferença na área superficial de contato entre o fluido e a superfície rugosa, a velocidade será maior ou menor. O terceiro processo está relacionado com a tortuosidade, ou comprimento da trajetória de fluxo (DEMUELENAERE, 2004).

## *Difusão molecular*

A difusão molecular é o processo no qual os constituintes iônicos e moleculares se movem sob a influência da energia cinética na direção do gradiente de concentração. Uma vez estabelecido o gradiente, as moléculas e íons tendem a se deslocar das regiões de maior concentração para as de menor, visando o equilíbrio. O transporte difusivo ocorre mesmo na ausência de fluxo hidráulico. (FREEZE e CHERRY, 1979).

### 2.1.2.2. Processos Químicos

Segundo BOSCOV, 1997 as reações químicas e bioquímicas que podem alterar a concentração de contaminantes podem ser agrupadas em seis categorias: reações de adsorção-dessorção, reações ácido-base, reações de dissolução-precipitação, reações de oxi-redução, pareamento de íons ou complexação e síntese microbiana. As reações químicas mais relevantes nos problemas geotécnicos são as de adsorção e dessorção de íons e moléculas na superfície das partículas de solo. Uma breve descrição de Dissolução / Precipitação também foi inserida no capítulo.

### Adsorção / Dessorção

A adsorção é o processo segundo o qual o soluto adere às superfícies dos sólidos, devido às forças de atração aí existentes. Estas forças são decorrentes de cargas desequilibradas nas superfícies, resultantes de imperfeições ou substituições iônicas na estrutura cristalina dos minerais (substituição isomórfica) ou de quebra de ligações nas estruturas moleculares, especialmente nas extremidades (FREEZE e CHERRY, 1979).

É o mecanismo de retenção mais importante para moléculas polares e íons. A adsorção por troca iônica é mais lenta que a adsorção molecular. De maneira geral, a primeira camada da substância é adsorvida por troca iônica e as demais são atraídas por forças de Van der Waals (YONG et al., 1992 apud ALMEIDA, 2009).

A adsorção é o principal mecanismo de retenção de metais em solução, enquanto que é apenas um dos mecanismos de retenção de substâncias orgânicas (LaGREGA et al., 1994 apud ALMEIDA, 2009).

Este processo pode ser reversível, implicando na dessorção de cátions e ânions em função de mudanças de pH, entre outros fatores. Este processo de liberação de substâncias previamente adsorvidas ocorre quando a concentração afluyente de uma determinada substância diminui, ou quando ocorre o chamado

"deslocamento cromatográfico", provocado pela competição com outra substância mais fortemente adsorvida.

Se as reações forem totalmente reversíveis, toda evidência de contaminação será eventualmente removida do sistema quando ocorrer à completa dessorção (GARCÍA- SANCHEZ et al., 1999 apud DEMUELENAERE, 2004).

Para FREEZE e CHERRY, 1979 os contaminantes não podem ser permanentemente isolados na subsuperfície por mais que o retardamento seja forte. No entanto em situações que são transferidos para a fase sólida do material poroso por adsorção ou precipitação, podem ser considerados fixos para a escala de tempo de interesse.

A isoterma é a representação gráfica que relaciona a concentração de espécies adsorvidas nos sólidos e a concentração na solução. A maneira mais comum de quantificar geoquimicamente esse processo é dada pelo coeficiente de distribuição  $K_d$  ou pela função de distribuição  $K_f$ . Este coeficiente também atua como um indicador da mobilidade de um contaminante num fluxo subsuperficial. O coeficiente de distribuição,  $K_d$ , é um dos parâmetros mais importantes usados para estimar a migração de contaminantes presentes em soluções aquosas em contato com sólidos (USEPA, 1999).

## Precipitação / Dissolução

Estas reações controlam os níveis e limites da quantidade total de poluentes na solução, quando esta percola através do solo. Os níveis de poluentes são governados pela solubilidade da fase sólida, sendo estas reações importantes na migração de metais, que são influenciadas pelo pH do sistema (CHRISTENSEN et al., 2001 apud ALMEIDA, 2009).

Assim, a precipitação consiste no desprendimento de substâncias inicialmente em solução, que ocorre quando a sua concentração na solução excede o seu grau de solubilidade e o excesso sai da solução. A precipitação é o processo inverso da dissolução. É um processo reversível, ou seja, se a concentração chegar a valores menores que o grau de solubilidade, pode ocorrer dissolução da substância precipitada. Este processo é fortemente afetado pela temperatura e pH.

Pode ocorrer dissolução na água do produto livre ou de formas sólidas de substâncias, por exemplo, através de lixiviação. Os produtos são mais comumente cátions ou ânions inorgânicos ou moléculas orgânicas polares ou apolares. Uma vez que há aumento da concentração soluto, o seu transporte é facilitado.

### 2.1.3. Fatores que influenciam a mobilidade dos metais pesados

O transporte de contaminantes no solo pode ser influenciado por alterações em três variáveis: o solo, o contaminante e o meio ambiente. Alterações em uma dessas variáveis ocasionam modificações nas outras.

Segundo GUEDES , 2009 a mobilidade dos metais é variável em função da sua natureza e forma química e também das propriedades químicas, físicas, mineralógicas e biológicas do solo. Os cátions divalentes, tais como  $Zn^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $Pb^{+2}$  e  $Cd^{+2}$  são altamente hidratáveis. Em solos ácidos e bem drenados, a mobilidade relativa desses elementos pode variar. De modo geral, cádmio, zinco, manganês e níquel, por exemplo, apresentam-se mais móveis que chumbo, cobre e cromo.

A adsorção depende diretamente do grau de cristalinidade e da morfologia da superfície do adsorvente varia de solo para solo em função de diversos atributos como pH, CTC, matéria orgânica, argila e conteúdos de óxidos amorfos de ferro e manganês (McBRIDE, 1989 apud GUEDES, 2009). É comum encontrarmos resultados divergentes quanto aos atributos do solo que melhor se correlacionam com a adsorção.

Os minerais encontrados nos solos são os mesmos da rocha de origem, além de outros que se formam na decomposição. Podem ser agrupados, quanto à composição química, em: silicatos (feldspato, mica, quartzo, serpentina, clorita, talco); óxidos (hematita, magnetita, limonita); carbonatos (calcita, dolomita); sulfatos (gesso, anidrita).

O quartzo é o mais importante dos minerais do grupo silicatos. Composto por sílica cristalina pura ( $SiO_2$ ), seus cristais são em forma de um prisma hexagonal, com pirâmides hexagonais nas bases.

As argilas apresentam uma complexa constituição química, distinguindo-se três grupos principais: caulinitas, montmorilonitas e ilitas. As caulinitas ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  ou  $H_4Al_2Si_2O_9$ ) são formadas por unidades de silício e alumínio que se unem formando uma estrutura rígida, sendo relativamente estáveis em presença de água.

As montmorilonitas  $[(OH)_4Si_8 \cdot A_4 \cdot O_{20} \cdot nH_2O]$  são formadas por uma unidade de alumínio entre duas de silício. A ligação entre estas unidades não é suficiente para impedir a passagem de água, tornando-se as argilas muito expansivas.

As ilitas  $[(OH)_4 \cdot K_y (Si_{8-y} \cdot Al_y) (Al_4Fe_4Mg_4Mg_6)O_{20}]$  possuem estruturas semelhantes às montmorilonitas, porem são menos expansivas.

Os óxidos hidratados de Fe e Al são minerais dominantes na constituição do colóide inorgânico de muitos solos de áreas intertropicais. A este grupo pertencem minerais como a goetita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e a gibbsita ( $\text{AlO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ).

Os teores de gibbsita estão relacionando com o grau de intemperização dos solos, quanto maiores os teores maior o grau de intemperização.

A CTC é um parâmetro importante na retenção dos poluentes orgânicos e outros íons menos móveis, indicando a capacidade de retenção do solo. Refere-se à maior ou menor capacidade que o solo possui em trocar cátions para neutralizar as cargas negativas, sendo função da textura, mineralogia e pH do solo. Ela pode ser alterada se houver variação do pH.

Em contato com a água as partículas sólidas atraem seus íons positivos  $\text{H}^+$ , formando uma película de água adsorvida, denominada camada adsorvida. A troca de base é o que se refere à faculdade das partículas coloidais permutarem os cátions adsorvidos em sua superfície. No solo, nem todos os cátions adsorvidos são permutáveis (CAPUTO, 1988 apud ALMEIDA, 2009).

Os minerais de argila e os óxidos de ferro e alumínio são uns dos principais elementos no solo responsáveis pela troca de íons. Assim, os minerais de argila que têm importante carga permutante são: illita, montmorilonita e vermiculita (CTC igual a 40, 120 e 150 meq/100 g respectivamente). Esta alta capacidade de troca deve-se, em parte, à propriedade de expansão que apresentam, o que permite a participação de superfícies internas nos processos de troca iônica.

A caulinita tem capacidade de troca catiônica relativamente baixa (menor que 10 meq/100 g de material), o que não contribuiria muito para uma possível retenção de contaminantes.

MATTIAZZO & GLORIA, 1995 apud ALMEIDA, 2009 concluíram ainda que a quantidade máxima permissível de metais a ser adicionada em solos de clima tropical e de clima temperado pode ser limitada pelo valor CTC e pH do solo, no momento da adição. No entanto, segundo estes mesmos autores, os parâmetros mais indicados para definir a quantidade máxima de metais a ser aplicada em um solo, estejam eles presentes num resíduo orgânico ou inorgânico são o conteúdo de argila e de óxidos de ferro e alumínio.

A textura do solo define a capacidade do substrato de se deixar atravessar pelos efluentes e exerce influência sobre a capacidade de carga do solo. Ela interfere de maneira direta no comportamento dos contaminantes no solo, determinando a capacidade do solo em retê-los.

#### 2.1.4. Cobre

O Cu é classificado como micronutriente, pois atende aos critérios de essencialidade para as plantas. Porém quando presente em altas concentrações no solo pode apresentar caráter tóxico. De acordo com a literatura, a concentração média do elemento no solo está em torno de 20  $\mu\text{g g}^{-1}$  variando na faixa de 6 a 80  $\mu\text{g g}^{-1}$  (TAVARES & CARVALHO, 1992 apud CHAVES et al, 2009).

A deficiência ou exposição a altas doses de cobre podem acarretar efeitos adversos à saúde. No homem a deficiência de cobre pode causar anemia, neutropenia e anormalidades ósseas e o excesso de ingestão pode causar diarreia, dor de cabeça, taquicardia e dificuldade respiratória (WHO op. cit., 199B apud FORTUNATO, 2009).

Os minerais primários ocorrem em ambientes mais profundos da crosta terrestre e possuem elevados teores de cobre como a calcopirita ( $\text{Cu FeS}_2$ ), a calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), a bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), a covellita ( $\text{CuS}$ ) e a enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) enquanto os secundários ou oxidados estão presentes em zonas mais superficiais e possuem menores de cobre como cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) e a tenorita ( $\text{CuO}$ ); os carbonatados malaquita ( $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ), e a azurita ( $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ) e os silicatados crisocola ( $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (RIBEIRO, op. cit, 2001 apud FORTUNATO, 2009).

Nos solos ocorre sob a forma de sais, enquanto em solução apresenta-se como cátion bivalente. Condições fortemente redutoras permitem sua redução para as formas cobre (I) e cobre metálico especialmente na presença de íons sulfitos ( $\text{SO}_2^{-3}$ ) (McBRIDE, 1994 apud FORTUNATO, 2009).

A dinâmica do cobre no solo é bastante complexa e altamente afetada por inúmeros fatores do meio, principalmente a composição química, física e mineralógica do solo, a quantidade de matéria orgânica e o pH (McBRIDE et al., 1997 CHAVES et al., 2009). Conhecer o comportamento desse elemento nos solos, da mesma forma que o seu comportamento adsorvivo pelos solos, torna-se fundamental para prever os impactos ambientais causados pelos mesmos, uma vez que os efeitos desfavoráveis de altas concentrações no meio ambiente estão relacionados com a capacidade dos solos em adsorver tais substâncias (JORDÃO et al., 2000 apud CHAVES et al. 2009).

O Cu pode ser adsorvido por atração eletrostática na dupla camada difusa (adsorção não específica) ou pela complexação de superfície (adsorção específica), processo no qual o elemento se liga à matriz do solo por ligações covalentes, reduzindo sua mobilidade (SELIM, 1992 apud CHAVES et al. 2009); no primeiro caso, a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo é fator decisivo, visto que representa a quantidade de sítios de troca nas interfaces coloidais do sistema, em que o Cu pode

ser adsorvido; esta quantidade de sítios, por sua vez, é função da natureza dos colóides (minerais e orgânicos) presentes nos solos e do seu pH. Ambientes ácidos determinam maior mobilidade do Cu enquanto condições de pH acima de seis favorecem sua retenção (HOOG et al., 1993 apud CHAVES et al. 2009).

De acordo com ARAÚJO & AMARAL SOBRINHO (2000), as variáveis que mais contribuíram na adsorção do Cu nos solos estudados por eles, foram o carbono orgânico, a CTC efetiva, o pH, teor de argila e presença de óxido de alumínio.

SILVEIRA & ALLEONI (2003) E NASCIMENTO & FONTES (2004) apud CHAVES et al, 2009 também observaram que os teores de argila e de matéria orgânica foram as características mais bem relacionadas com a capacidade de adsorção do Cu por Latossolos. Em relação à adsorção específica, da qual resulta a formação de moléculas estáveis com alta energia de ligação a matéria orgânica parece ser o fator mais importante, pois é ela que complexa todo o Cu da solução do solo.

### **2.1.5. Chumbo**

O Pb não possui função fisiológica no organismo e sua contaminação afeta o sistema hematopoiético (inibindo a síntese de hemoglobina), os rins, o sistema nervoso e periférico (MANAHAN, 1994; VAZ & LIMA, 2003 apud FORTUNATO, 2009). Juntamente com mercúrio e o cádmio, o chumbo apresenta os maiores riscos ambientais em virtude de seu uso intenso, toxicidade e ampla distribuição (BAIRD, 2002 apud FORTUNATO, 2009).

É um elemento abundante na crosta terrestre raramente encontrado no seu estado natural. Está presente em grande variedade de minérios, sendo a galena (PbS), anglesita (PbSO<sub>4</sub>) e a cerussita (PbCO<sub>3</sub>) os mais importantes contendo respectivamente 86%, 68% e 77% desse metal. A prata, zinco, cobre, níquel, ouro, etc. são exemplos de elementos que, geralmente, encontram-se associados aos minérios de chumbo (SILVA, 2001 apud FORTUNATO, 2009).

Embora alguns processos naturais, como emissões vulcânicas e intemperismo químico, liberem chumbo no ambiente, a ação antropogênica é a maior responsável pela sua liberação, sendo as mais comuns, as atividades de mineração, indústrias metalúrgicas, adubos na agricultura e queima de combustíveis fósseis (PAOLIELLO, & CHASIN, 2001 apud FORTUNATO, 2009).

Na atmosfera, o chumbo é encontrado sob a forma de particulado podendo ser transferido para a superfície através da deposição seca ou úmida (precipitação úmida)

e pode ser transportado a longas distâncias. O chumbo ao ser depositado na água, sofre influência do pH, sais dissolvidos e agentes complexantes orgânicos, que definem sua permanência na fase aquosa ou como precipitado.

O metal geralmente ocorre como íon  $Pb^{2+}$  (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001), formando complexos estáveis com ligantes inorgânicos ( $Cl^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ) e orgânicos (ácidos húmicos e fúlvicos) presentes em solos e sistemas aquáticos podendo também reagir com carbonatos, sulfetos e fosfatos formando compostos de baixa solubilidade. O chumbo também se encontra associado a minerais de argila, óxidos de Mn, hidróxidos de Fe e Al, ou concentrado em carbonatos de Ca.

As características geoquímicas de Pb, em alguns casos, assemelham-se ao grupo dos metais alcalinos terrosos, o que determina a habilidade do Pb em deslocar K, Ba, Sr, e Ca em minerais e sítios de sorção (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001).

A presença de chumbo no solo varia de acordo com a fonte de emissão, por exemplo, atividades metalúrgicas que o liberam de minérios ( $PbS$ ,  $PbO$ ,  $PbSO_4$  e  $PbO \cdot PbSO_4$ ); já a queima de combustíveis o emitem nas formas  $PbBr$ ,  $PbBrCl$ ,  $Pb(OH)Br$  e  $(PbO)_2PbBr_2$  (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001).

Vários fatores como pH, composição mineralógica, matéria orgânica, substâncias coloidais, oxi-hidróxidos e concentração do elemento influenciam seu transporte e disponibilidade (PAOLIELLO, & CHASIN, 2001 apud FORTUNATO, 2009).

Por ser fortemente adsorvido à matéria orgânica, o chumbo é encontrado nas partes mais superficiais do solo, por ser convertido em sulfato, forma mais insolúvel quando comparada ao carbonato ou fosfato (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001).

O metal pode ser imobilizado pela complexação com ácidos húmicos ou fúlvicos dos solo ou pela troca iônica com óxidos hidratados ou argila.

A liberação do chumbo de complexos orgânicos para formas solúveis está intimamente relacionada com o pH. Solos com  $pH \geq 5$  e pelo menos 5% de matéria orgânica retêm o chumbo atmosférico na camada superior (entre 2 e 5 cm); em solos com pH entre 6 e 8 e alto teor de matéria orgânica, o chumbo pode formar compostos insolúveis, no entanto, para os mesmo valores de pH, mas menor teor de matéria orgânica pode haver formação de óxidos - hidróxidos de chumbo hidratados e precipitação na forma de carbonatos ou fosfatos; nos solos com pH entre 4 e 6 os complexos orgânicos do chumbo tornam-se solúveis e sofrem lixiviação ou são absorvidos pelas plantas (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001).



## **2.2. ATIVIDADES MILITARES E CONTAMINAÇÃO**

### **2.2.1. Atividades de Destruição de Munições e Explosivos no EB**

Para o entendimento do cenário ambiental faz-se necessário o levantamento das atividades relativas à disposição de explosivos e munições na área de destruição. Os procedimentos adotados, e o tipo e composição básica das munições e explosivos descartados no DCMun foram apresentados por BRUM, 2010.

#### **2.2.1.1. Munições e Explosivos**

##### **Munição**

Define-se munição como um artefato completo, pronto para carregamento e disparo de uma arma. São corpos carregados com explosivos ou agentes químicos destinados a produzir danos. Também são consideradas munições os tiros de exercício que não possuem carga de explosão, apenas de lançamento, tiros de salva, utilizados em cerimônias militares e a munição de festim utilizada nos treinamentos da tropa.

As munições podem ser classificadas em função da medida do diâmetro interno da arma, ou seja, de seu calibre como munição de armamento leve ou pesado, conforme apresentado no Quadro 2.1 e no Quadro 2.2 respectivamente. Na Figura 2.1 é possível identificar a composição de um cartucho (denominação de armamento leve) cujas partes são descritas no Quadro 2.1.

| MUNIÇÕES DE ARMAMENTO LEVE  |   |
|---|---|
| Possuem calibre < 1,52 cm (0,60 pol.) Também denominadas <i>Cartucho</i> . Composição: projétil, estojo, cápsula de deflagração e carga de projeção |   |
| Projétil  | Tem por finalidade causar danos, são construídos por um núcleo recoberto por uma capa externa chamada camisa ou jaqueta, normalmente fabricada com ligas metálicas de: cobre e níquel; cobre; níquel e zinco; cobre e zinco; cobre; zinco e estanho ou aço. O núcleo é constituído geralmente de chumbo praticamente puro. Projéteis sólidos - capa externa aberta na base e fechada na ponta. Projéteis expansivos - capa externa fechada na base e aberta na ponta. |
| Estojo  | Possibilita que todos os componentes necessários ao disparo fiquem unidos em uma peça, facilitando o manejo da arma e acelera o intervalo em cada disparo. Normalmente fabricados em metais não-ferrosos, principalmente o latão 70/30 (liga de cobre e zinco).   |
| Cápsula de Deflagração ou Espoleta  | Inicia a queima da carga de projeção. O explosivo utilizado é o estifinato de chumbo ( $C_6H_3O_9N_3Pb$ ) ou azida de chumbo ( $Pb(N_3)_2$ ) ou fulminato de mercúrio ( $Hg(ONC)_2$ ).  |
| Carga de Projeção   | Também chamada de propelente é a fonte de energia química capaz de arremessar o projétil à frente. A energia produzida pelos gases resultantes da queima do propelente gera grande pressão no interior do estojo, impulsionando o projétil com grande velocidade. Atualmente, o propelente usado nos cartuchos de armas de defesa é a pólvora química ou pólvora sem fumaça.  |

Quadro 2.1: Composição da munição de armamento leve (Fonte: BRUM, 2009).

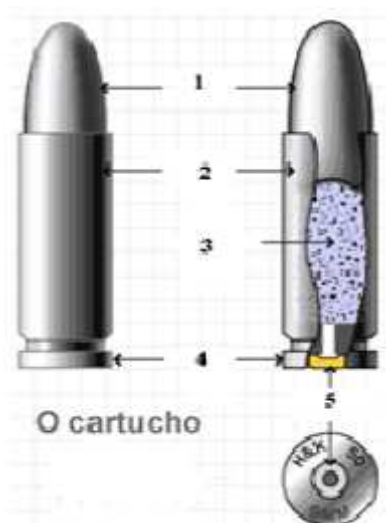


Figura 2.1: Detalhe do Cartucho: 1-Projétil, 2-Estojo, 3-Carga de Projeção, 4-Virola de Extração, 5-Cápsula de Deflagração (Fonte: BRUM, 2010).

As munições podem se distinguir pela finalidade e composição em diferentes tipos: Comum, Traçante, Perfurante, Incendiária, Perfurante-incendiária (AP-CH) e Perfurante-Incendiária-Traçante (ETPT "Match").

| MUNIÇÕES DE ARMAMENTO PESADO  |  |
|---|--|
| Possuem calibre $\geq 1,52$ cm (0,60 pol.) Também denominadas de <i>Tiro</i> . Composição: estojo, estopilha, carga de projeção, granada, espoleta, detonador |  |
| Estojo  | Aloja a carga de projeção. O tiro que não utiliza estojo é denominado "munição desencartuchada". São fabricados de aço, latão, alumínio ou de material combustível. Evita acúmulo de estojos pois queima junto com o propelente.   |
| Estopilha   | Artefato pirotécnico que produz inflamação da carga de projeção dos projéteis. Quando excitada, produz a chama que inicia a carga de projeção.<br>Pode ser de latão, aço ou alumínio.  |
| Carga de Projeção   | Sua deflagração gera gases cuja energia promove o lançamento do projétil. Utiliza-se como carga as pólvoras de base simples (BS), base dupla (BD) ou de base tripla (BT). Possuem geometria do grão e o seu tamanho variados e que influenciam a queima do propelente, podendo ser cilíndrico, tubular, tubular cortado, laminar, heptaperfurado.  |
| Projétil ou Granada   | Projetados para causar dano, impacto, penetração ou perfuração, conduzir carga química ou explosiva apresenta as seguintes formas geométricas: cilindro-ogival, biogival, ogiva alongada, culote tronco-cônico, buscando sempre uma boa aerodinâmica devido à resistência do ar.   |
| Espoleta  | Inicia a carga explosiva ou química do projétil no momento e nas condições desejadas, pode se situar na ogiva ou no culote da granada.   |
| Detonador   | A espoleta contém um detonador (alto explosivo) e escorvas que são misturas físicas de substâncias químicas muito sensíveis (estifinato de chumbo, Azida de Chumbo ou Mercúrio) ao impacto, cuja combustão gera gases quentes e partículas sólidas incandescentes; são utilizadas para a iniciação de ignitores de propelentes e detonadores com a finalidade de iniciar a carga explosiva do projétil, após ter sido iniciada pelo detonador. |

Quadro 2.2: Composição da munição de armamento pesado (Fonte: BRUM, 2010).

Os projéteis ou granadas pode ser classificados dependendo da finalidade em: alto explosivo, explosivo perfurante, carga oca, anti-tanque, de alta energia cinética, químicos, assistidos por foguete, guiados entre outros.

## Explosivos

Os explosivos são substâncias ou um conjunto de substâncias que sofrem reações químicas produzindo grande quantidade de calor e gases (produtos). Esta reação denomina-se explosão e caracteriza-se por ocorrer num espaço de tempo muito pequeno. O volume dos produtos é maior que os reagentes.

Os explosivos são substâncias instáveis, logo quando manuseados e armazenados de maneira incorreta, podem provocar a sua decomposição em produtos mais estáveis com a liberação de grande quantidade de energia. São materiais que, sob a influência de um choque térmico ou mecânico, se decompõem rápida e espontaneamente gerando uma grande quantidade de calor e gases. Quando

confinados em um espaço, como é o caso dos estojos e granadas, estes gases quentes provocam uma pressão elevada produzindo a ruptura desses invólucros.

Existem três tipos fundamentais de explosivos: mecânicos, atômicos e químicos. Serão apresentadas as características principais dos explosivos químicos, os demais tipos não têm aplicação militar. Os explosivos químicos são classificados em duas categorias de acordo com os respectivos comportamentos em: detonantes ou auto-explosivos, explosivos-deflagrantes ou baixo-explosivos. Um organograma com os principais explosivos pode ser visto na Figura 2.2.

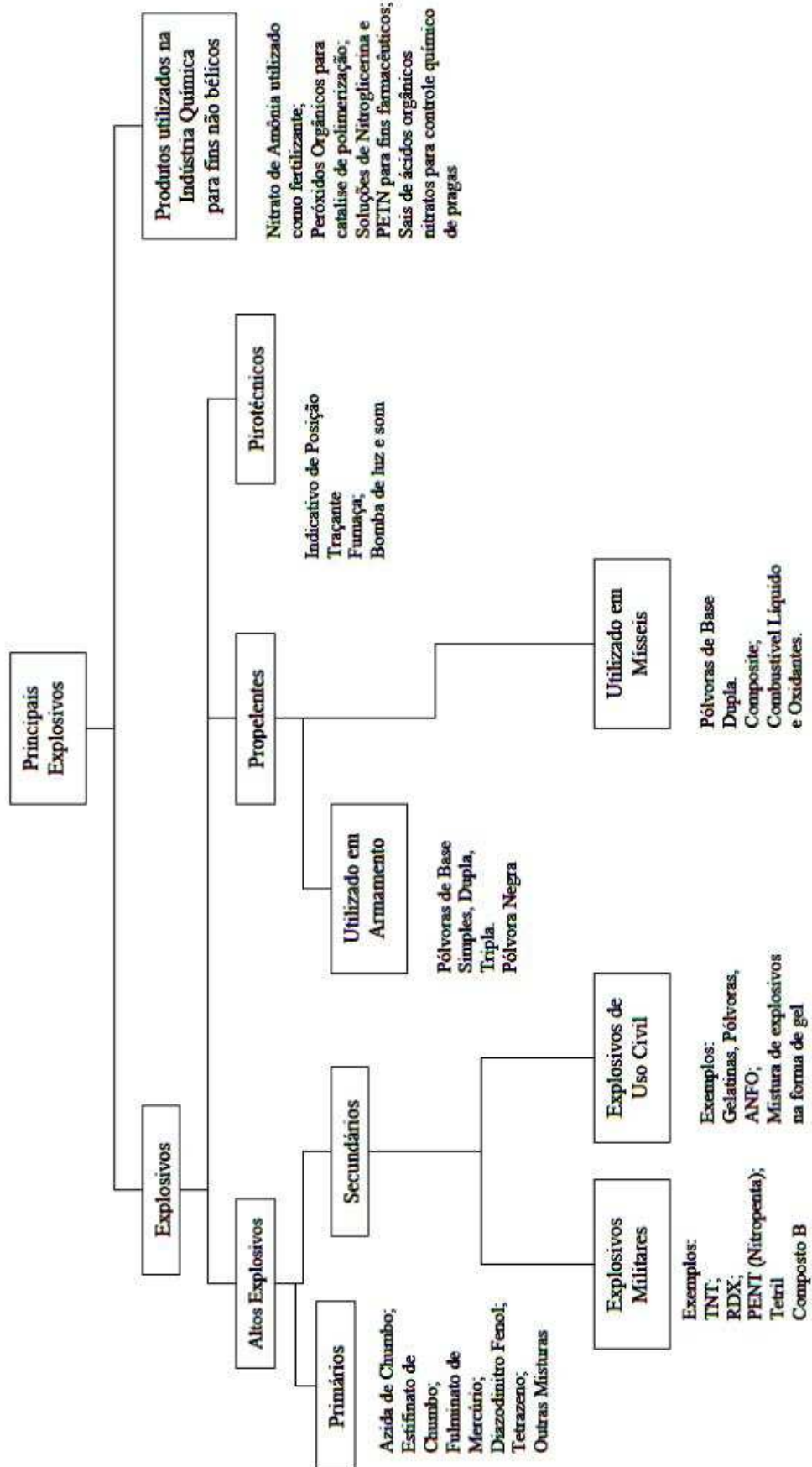


Figura 2.2: Organograma de Explosivos (Fonte: BRUM, 2010)

### 2.2.1.2. Técnicas utilizadas na Destruição de Munições e Explosivos

Adota-se no Exército Brasileiro a destruição de munições e explosivos considerados inservíveis diretamente no solo, conforme os manuais técnicos T9 e 105, ambos do EB (BRUM,2010). As principais técnicas utilizadas são a queima e a detonação a céu aberto.

#### Queima Aberta (QA)

Consiste basicamente na combustão do material sem controle dos gases e resíduos gerados e sem assegurar que a queima foi completa. As munições são colocadas no chão e o fogo é aceso por uso de combustível líquido ou outros meios inflamáveis. Normalmente queimam pequenas quantidades em baixa temperatura, não excedendo 500°C. Quase sempre os produtos não são totalmente queimados. A queima de quantidades maiores de munições produz temperaturas mais elevadas, e a combustão poderá resultar em detonação em função da massa crítica de explosivos, temperatura e pressão. É um dos métodos mais difundidos e em princípio pode ser aplicado a todas as munições. Munições de pequeno calibre podem ser queimadas inteiras. A Figura 2.3 mostra o processo QA realizado no DCMun.



Figura 2.3: Processo de Queima à céu aberto no DCMun(Fonte: BRUM, 2010).

#### Detonação Aberta (DA)

Nesta alternativa as munições e os explosivos são empilhados em uma área de detonação, que é iniciada por uma carga explosiva menor (conforme mostrado na

Figura 2.4), no caso dinamites, que devem ser cuidadosamente dispostas: a detonação deve começar da parte externa da pilha para o interior a fim de destruir toda a munição e evitar o arremesso de materiais não destruídos. Essa prática cria uma grande depressão, o diâmetro e profundidade alcançados são proporcionais a energia de explosão projetada. Essa técnica degrada mais fisicamente e quimicamente os resíduos que a QA (queima aberta), entretanto resulta na dispersão das partículas de metais pesados sobre uma grande área, poluindo o ar e o solo.



Figura 2.4: Processo de Detonação a céu aberto no DCMun (Fonte: BRUM, 2010).

Os danos ambientais gerados na utilização das técnicas QA / DA são inquestionáveis. No Quadro 2.3 são listados os potenciais contaminantes provenientes da destruição das munições e explosivos citados na área de destruição da unidade militar DCMun.

| MUNIÇÕES   | EXPLOSIVOS   |
|--|--|
| Liga de cobre e níquel;<br>Cobre; Níquel e zinco;<br>Cobre e zinco;<br>Zinco;<br>Estanho;<br>Chumbo;<br>Antimônio;<br>Aço endurecido com liga de cromo e tungstênio (Cr-W);<br>Liga de magnésio e molibdênio;<br>Tombac;<br>Óxido de ferro | Estifinato de chumbo (Trinitroressorcinato de Chumbo (C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> O <sub>9</sub> N <sub>3</sub> Pb));<br>Azida de chumbo (Pb(N <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> );<br>Azida de mercúrio;<br>Fulminato de mercúrio (Hg(ONC <sub>2</sub> ));<br>74% de salitre, 15% de carvão e 10,4% de enxofre (Pólvora Negra);<br>Resinato de cálcio; Peróxido de bário;<br>Oxalato ou nitrato de estrôncio;<br>Tetracloreto de carbono, cloreto de polivinila, vermelho de taluidina;<br>Estearato de zinco e magnésio em pó. |

Quadro 2.3: Relação de alguns contaminantes provenientes da detonação de munições e explosivos (Fonte: BRUM, 2010).

## **2.2.2. Atividades de Destruição de Munições e Explosivos**

Há uma crescente preocupação com as práticas de disposição de resíduos associados à produção de armas militares considerando os riscos associados ao meio ambiente.

A disposição de explosivos e munições é um grande problema em muitos países, especialmente em países devastados pela guerra, como Afeganistão, Iraque, Sudão e Líbano (LAURITZEN et al., 2006).

LAURITZEN et al., 2006 apresentam alternativas sustentáveis para descarte de munições e explosivos, tanto ambientalmente quanto economicamente, com base na experiência adquirida no desenvolvimento de programas de investigação do Grupo de Armamento da Europa Ocidental da Cooperação Européia para Defesa em Longo Prazo e da União Européia (UE LIFE), juntamente com um estudo realizado para a OTAN – Organização do Tratado do Atlântico Norte, seguido por estudos de campo sobre a destruição de munições em programas de desativação de minas.

Como resultado do fim das crises e conflitos em todo o mundo, enormes quantidades de munições já foram destruídas e uma grande quantidade ainda será. A quantidade de munição em paíóis abandonados no Iraque e no Afeganistão é composta por centenas de toneladas de vários tipos de munições, vindas de fontes como (LAURITZEN et al.,2006):

- o excesso de estoques de munições militares decorrentes do término de crises ou conflitos;
- munições não deflagradas em treinamento militar;
- minas remanescentes de alguns conflitos militares e civis.

Explosivos restantes de guerra são normalmente destruídos por detonação ou queima aberta (DA / QA), gerando muitos passivos como grandes quantidades de metal fragmentos e contaminantes orgânicos.

O Kuwait solicitou compensação do governo iraquiano para danos graves causados pela poluição química da areia e do solo, no deserto Kuwaitiano, geradas pela DA / QA das munições abandonadas pelo exército Iraquiano após a Primeira Guerra do Golfo em 1991. Motivada por esse incidente, a USEPA realizou no período de Junho a Agosto de 1993, Seminários sobre Tecnologias para Remediação de Sites Contaminados por Explosivos e Resíduos Radioativos. (EPA/625/K-93/001).



Nesse mesmo período também iniciaram os estudos referentes à destruição, manuseio e estocagem de munição e os impactos gerados por essas atividades na Comunidade Européia.

Em Agosto de 2010 a NAMSA – Agência de Logística da OTAN apresentou uma extensa agenda lançando um catálogo com uma variedade de projetos ambientais relacionados direta ou indiretamente com a disposição de resíduos militares, produto de anos de pesquisas e da implantação de importantes projetos.

Alguns desses projetos já foram concluídos, existem projetos em andamento e outros ainda serão iniciados. O catálogo compreende o período de 2001, quando iniciou o primeiro projeto, até o término previsto para 2013. Ainda não foram concluídos projetos com objetos de estudo similares a investigação geoambiental que está sendo realizada no DCMun. Além da caracterização do solo, água e ar, os projetos em andamento diferem da pesquisa em andamento no que se refere a análise de toxicidade e biodisponibilidade em plantas e animais.

#### 2.2.2.1. Técnicas de Destruição de Munições e Explosivos

Existem diferentes técnicas e métodos para a destruição de munições e explosivos. O processo mais adequado será ditado por uma série de fatores, tais como a tecnologia disponível, a legislação ambiental, condições contratuais, questões comerciais e os regulamentos de segurança (LAURITZEN et al.,2006) . Sucintamente podemos citar:

Queima a céu aberto (QA) e Detonação a céu aberto (DA): descritas no tópico anterior;

**Detonação fechada (DF):** consiste em detonar a munição em uma câmara fechada, esta tecnologia permite o controle de emissões de gases e partículas. A dimensão da câmara vai estabelecer os tipos de munições adequadas à sua capacidade.

**Incineração com forno estático rotativo (IF):** os resíduos são dispostos em um forno estático com várias câmaras de bloqueio. É constituído de tambor cilíndrico e refratários levemente inclinados, de 3° a 5° com a horizontal. Assim com uma velocidade de 2 a 5 rpm, lentamente faz com que os sólidos cheguem ao final do tubo queimados e os resíduos caem na extremidade inferior do forno. Em geral é equipado com bocais para o controle e limpeza dos gases. Geralmente requerem algum tipo de pré-tratamento nas munições.

**Incineração com forno móvel (IFM):** se diferem da IF por que são desenvolvidos para incinerar as munições no local. Pode ser necessária a redução de munições de grande porte.

## 2.2.2.2. O Conceito de Análise de Risco

DUIJM, 2001 avaliou e identificou riscos nas técnicas de disposição: Queima a céu aberto (QA), Detonação a céu aberto (DA), Detonação fechada (DF), Incineração com forno rotativo (IF) e Incineração com forno móvel (IFM). Na avaliação, o transporte foi considerado para ações realizadas nas proximidades das instalações de armazenamento. O Arsenal de Munições Dinamarquês foi a organização militar que subsidiou os dados para o estudo

Para a análise de risco foram utilizadas as taxas de acidentes de trabalho da indústria Dinamarquesa. Isso se justifica pelo fato das técnicas serem dominadas pela confidencialidade humana. DUIJM, 2001 relatou não existir no EIDAS - banco de dados científicos da Europa, uma lista específica para acidentes ocorridos em atividades relacionadas à destruição de munições e explosivos militares.

O Quadro 2.4 apresenta um resumo dos riscos avaliados por DUIJM, 2001 para as técnicas DA / QA, utilizadas para eliminação de munições e explosivos na unidade militar analisada.

| QUEIMA ABERTA (QA)  | DETONAÇÃO ABERTA (DA)   |
|---|---|
| Perigos que potencialmente podem resultar em mortes   | Perigos que potencialmente podem resultar em mortes   |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ignição prematura das munições;</li> <li>2. Ignição com uma ou mais pessoas próximas;</li> <li>3. Fogo sair do controle e alcançar vegetação (fogo selvagem);</li> <li>4. Destruição incompleta de materiais explosivos.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ignição prematura da munição durante a preparação para a detonação, especialmente devido ao uso de detonadores sensíveis que podem ser desencadeadas por agentes externos;</li> <li>2. Ignição prematura com munições já colocadas no local;</li> <li>3. Manuseio inadequado de munições negligenciando a sensibilidade mecânica;</li> <li>4. Destruição incompleta de materiais explosivos.</li> </ol> |
| Perigos que potencialmente podem resultar em contaminação   | Perigos que potencialmente podem resultar em contaminação   |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Contaminação do solo durante a colocação das munições;</li> <li>2. Contaminação por particulados e fumaça durante a queima;</li> <li>3. Contaminação de solo pela sucata que é deixada no local.</li> </ol>                         | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Contaminação do solo durante a colocação das munições (escavações);</li> <li>2. Contaminação por particulados e fumaça durante a queima;</li> <li>3. Contaminação de solo pela sucata que é deixada no local.</li> </ol>  |

Quadro 2.4: Resumo da análise de risco para QA / DA (Fonte: DUIJM, 2001).

### 2.2.2.3. O Conceito de Ciclo de Vida das Munições

Cada método de destruição de resíduos explosivos ou munições resulta em impactos ambientais imediatos, a curto prazo e a longo prazo.

ALVERBROA et al.,2009 compararam os impactos ambientais em uma perspectiva de ciclo de vida, gerados a partir de três diferentes métodos de destruição e identificaram as vantagens e desvantagens de cada um desses métodos:(i) a detonação aberta com e sem recuperação e reciclagem de metais; (ii) incineração com forno estático e controle de poluição do ar combinado com reciclagem de metais, e (iii) uma combinação de incineração com controle de poluição do ar, queima a céu aberto, a recuperação de algum material explosivo e reciclagem de metais.

A organização militar que deu subsídios ao estudo foram as Forças Armadas Suecas, o material escolhido para a análise foi a granada, modelo bastante típico (40mm), tipo Perfurante-Incendiária-Traçante (ETPT “Match”) produzida na Alemanha.

Os resultados foram comparados, a fim de responder às seguintes questões específicas: (i) Quais são as vantagens ambientais e desvantagens de cada um desses métodos de destruição? e (ii) Qual é a parte do processo de destruição mais contribui para o potencial impacto ambiental?

A produção da granada não foi incluída no sistema, pois o objetivo do estudo era comparar diferentes processos de destruição. O parâmetro transporte também foi omitido. A descrição dos processos está no Quadro 2.5.

A unidade funcional foi definida como 100 granadas, ou seja, este foi o fluxo de referência utilizado para todos os cálculos. As granadas foram destruídas na Suécia em 2008. Os cálculos do ciclo de Vida foram feitos com software SimaPro 7. Mais detalhes sobre a metodologia adotada nos cálculos podem ser vistos na referência ALVERBROA et al.,2009.

Os resultados apontaram a detonação aberta sem reciclagem de metais a pior alternativa para a destruição de munições para quase todas as categorias de avaliação do impacto ambiental. A adição de reciclagem de metais para a opção de detonação aberta melhora o seu desempenho ambiental significativamente nas categorias de maior impacto, ficando nivelada com as outras opções de destruição.

A alternativa do forno estático teve o melhor desempenho ambiental para diversas categorias de impacto, incluindo o aquecimento global e a toxicidade humana. Por outro lado, o tratamento da combinação provou ser a melhor alternativa no que diz respeito à acidificação e eutrofização do meio.

As alternativas que incluem a reciclagem de metal estão na mesma magnitude, exceto a alternativa detonação aberto. Esta é sempre pior que as alternativas que incluem a reciclagem de metais. A explosão em si representa a principal contribuição do potencial impacto da alternativa de detonação aberta. O estudo também mostra a importância da combinação de alternativas. A reciclagem dos metais é menos impactante que a produção de metais virgens, pois esta utiliza uma grande quantidade de combustíveis fósseis, que também tem um impacto muito grande. No entanto, a energia utilizada para a queima dos metais antes do processo de reciclagem faz uma contribuição significativa para o aquecimento global.

No tratamento combinado, a energia usada para queimar os metais a fim de eliminar todos os explosivos remanescentes antes de ser transportado para uma usina de reciclagem de metal pareceu ser a etapa que mais contribuiu para os impactos negativos no processo, que na alternativa que apresentou os melhores resultados.

|   |
|---|
| <b>1. DETONAÇÃO ABERTA</b>  |
| <p>Na DA a destruição deve ser realizada em área remota por razões de segurança. As munições são empilhadas na área de detonação com no máximo cerca de 20 toneladas de substância explosiva, ou seja, excluindo as embalagens. Isto significa que há limitação no tamanho dos objetos. Um helicóptero inspeciona a área antes da detonação para se certificar de que ninguém não autorizado está presente e depois verifica se há incêndios. As condições meteorológicas são examinadas e é exigida a presença de profissionais de enfermagem. A detonação é iniciada por várias explosões com cargas menores cuidadosamente dispostas, deve começar da parte externa da pilha para o interior a fim de destruir toda a munição e evitar o arremesso de materiais não destruídos. Para essa energia líquida, a detonação cria um buraco no chão cerca de 20m de diâmetro e 5m de profundidade que tem de ser preenchido com um escavador.</p>  |
| <b>2. DETONAÇÃO ABERTA COM RECICLAGEM DE METAIS</b>   |
| <p>É semelhante a DA, porém os metais são reciclados. Idealmente, a granada pode ser desmontada e mais de metais podem ser recuperados e reciclados antes da detonação. Para isso a granada tem que apresentar condições de estabilidade adequadas e acesso a infraestrutura para reciclagem de metais. As partes metálicas são queimadas com controle de poluição do ar para que todo o material energético remanescente seja removido antes de ser enviado para uma usina de reciclagem de metais. Neste estudo, os metais reciclados são assumidos para substituir matérias-primas virgens. A taxa de reciclagem assumida foi de 90% de acordo com dados existentes. Os metais restantes foram considerados como aterro, mas as emissões não foram incluídas. Na apresentação dos resultados, esta alternativa é chamado de "detonação aberta com reciclagem de metais".</p>   |
| <b>3. INCINERAÇÃO EM FORNO ESTÁTICO COM CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR COMBINADO COM RECICLAGEM DE METAIS</b>   |
| <p>As granadas são colocadas em um forno estático por uma esteira e várias câmaras de bloqueio. A câmara de detonação é aquecida a 450-550°C. Essa faixa de temperatura assegura que todo material energético é queimado ou detonado e os metais são recolhidos depois. Todo o processo é monitorado por um sistema de controle. Os gases produzidos são tratados em várias etapas antes de ser liberado. Os metais são reciclados em uma usina de metais e neste caso, destinados a substituir matérias-primas virgens. A taxa de reciclagem do metal foi assumida como 100%. A detonação ou queima de materiais energéticos dentro do forno produz calor suficiente para manter o processo de destruição e nenhuma energia adicional é necessária uma vez que o processo já foi iniciado. A capacidade do forno utilizado é aproximadamente 10 kg apenas, a quantidade máxima de material energético é bastante reduzida. Objetos maiores precisam ser desmontados para que possam ser tratadas no forno.</p> |
| <b>4. INCINERAÇÃO EM FORNO ESTÁTICO COM CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR COMBINADO COM A RECICLAGEM DE METAIS, O MÁXIMO PERMITIDO DE EMISSÕES</b>   |
| <p>Opção semelhante à anterior, porém as emissões foram estabelecidas para o nível máximo admissível de acordo com a Diretiva Européia 2000/76/CE, o limite médio diário. Este é um cenário de pior caso da incineração e significa que o nível de poluição do ar é 2-10 vezes maior do que as emissões forno estático.</p>   |
| <b>5. UMA COMBINAÇÃO DE INCINERAÇÃO COM O CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR, QUEIMA A CÉU ABERTO, RECUPERAÇÃO E RECICLAGEM</b>   |
| <p>Considerado o principal método de destruição deste tipo de munição na Suécia na ocasião. As granadas são desmontadas e alguns materiais energéticos da carga explosiva recuperado. Na QA as partes metálicas são queimadas com controle de poluição do ar, a fim de remover todo o material energético restante antes de ser enviado para uma usina de reciclagem de metais. Caso a granada não possa ser desmontada por questões de segurança, deve ser eliminada com DA. Supondo que todas as granadas podem ser desmontadas a taxa de reciclagem do metal foi de 100% e a taxa de recuperação energética material foi de 83%.</p>   |

Quadro 2.5: Resumo dos processos analisados no Ciclo de Vida da granada (Fonte: ALVERBROA et al.,2009).

A crescente preocupação com as ameaças ecológicas decorrentes de substâncias químicas produzidas pelo homem levou a estudos toxicológicos visando a identificação dos efeitos mutagênicos associados a essas substâncias. Em muitos países a análise toxicológica faz parte da análise de risco no contexto da Investigação Ambiental.

LEWIS et al., 2004 consideram que a falta de ensaios específicos de toxicologia durante a análise de risco pode resultar em falsas conclusões, caso seja avaliada somente a remoção de compostos. Podendo inclusive interferir na escolha adequada de uma técnica de biorremediação.

O TNT tem sido historicamente o explosivo militar mais utilizado. Nos últimos 100 anos foi produzido em grande escala, conseqüentemente sua eliminação originou resíduos contendo subprodutos orgânicos no meio ambiente. Estima-se que 1,2 milhões de toneladas de solo foram contaminados com explosivos. A destruição de munições obsoletas foi realizada em grande escala durante muitos anos desde que o TNT foi inventado. Os EUA foram o maior contribuinte desse impacto pois já chegaram a produzir 65 toneladas de TNT por dia ( GILBERT, 1980 apud LEWIS et al., 2004). A preocupação com a limpeza de áreas contaminadas por atividades militares têm impulsionado o investimento em tecnologias de recuperação desses sites. Contudo o custo desses processos geralmente é alto. Nesse contexto LEWIS et al., 2004 aponta a Biorremediação como uma opção interessante para a degradação do TNT.

Já foi visto que as propriedades do solo podem influenciar a toxicidade em solos, entretanto um elevado nível de contaminação não significa necessariamente que os organismos ou ecossistemas experimentarão efeitos deletérios segundo ALEXANDER, 1995, 2000 apud BERTHELOT, Y., et al., 2008. Este conceito refere-se ao conceito de biodisponibilidade, que é agora bem estabelecido como um fator chave na ecotoxicologia. Ainda não existe um consenso sobre a definição de Biodisponibilidade. BERTHELOT, Y., et al., 2008, definiram com "a fração de uma substância que irá exercer um efeito sobre um organismo".

No Brasil ainda não há nenhuma política de avaliação, tratamento e remediação específica para áreas contaminadas por resíduos explosivos militares ou não. Contudo cabe ressaltar que no Brasil ainda não ocorreram ações diretas originadas em conflitos e crises como exemplo de outros países citados, que motivasse uma política emergencial em relação a destruição de armamentos . Porém temos que estruturar o quanto antes diretrizes que contemplem a disposição

adequada de resíduos com carga explosivas e com a mesma urgência elaborar projetos para remediar as áreas hoje contaminadas pelas detonações à céu aberto.

## **2.3. INVESTIGAÇÃO GEOAMBIENTAL**

Uma Investigação Ambiental consiste de estudos multidisciplinares envolvidos em um projeto de avaliação e remediação de áreas contaminadas por substâncias perigosas. As caracterizações geotécnica, geológica, hidrogeológica e química destes locais são estudos que fazem parte de uma das etapas do projeto conhecida como Investigação Geoambiental.

MIRANDA NETO (2002) define investigação geoambiental como a coleta sistemática de dados visando determinar o grau de contaminação de uma área e sua relação com o meio ambiente. Os dados podem ser obtidos por vários meios, tais como: pesquisa documental, entrevistas, visitas de reconhecimento, inspeções, amostragens e ensaios.

PETTS et al. (1997) apud MIRANDA NETO (2002) concebem a relação da área contaminada com o meio ambiente como uma cadeia ligando a fonte ao alvo por caminhos. Assim, definem como fonte a área identificada como potencialmente contaminada em função da natureza do contaminante presente e do mal que representa. Os caminhos são as rotas pelas quais o contaminante pode ser transferido para o alvo considerado. O alvo é o corpo receptor que pode ser danificado pela presença do contaminante em concentração suficiente para lhe causar um mal. As relações entre a fonte e o meio envolvem mecanismos como sorção, lixiviação e biodegradação. Da mesma forma, as relações entre o contaminante e o alvo envolvem fatores complexos como tempo de exposição, concentração, modo de absorção, bioacumulação e cadeia alimentar.

### **2.3.1. O Processo e Fases da Investigação Geoambiental**

Uma investigação geoambiental deve ser planejada com base em um conjunto de objetivos claros. Esse conjunto de objetivos inclui o objetivo principal e objetivos subsidiários. O objetivo principal é prover informações suficientes sobre a fonte, os caminhos e os alvos (HOBSON, 1993 apud PETTS et al., 1997 MIRANDA NETO, 2002). Segundo PETTS et al. (1997), os objetivos subsidiários são:

- determinar a natureza, a forma, a extensão e a distribuição de qualquer contaminação presente na área investigada;

- caracterizar o meio, determinando: o contexto geológico estrutural e sua composição, a estratigrafia, as características geotécnicas relevantes (mineralogia, umidade, granulometria, permeabilidade, etc.), a topografia, a propensão para inundações, as flutuações de maré, os níveis dos aquíferos, a qualidade da água, os fluxos de subsuperfície, os efeitos de extração e recarga, os caminhos físicos potenciais construídos pelo homem;

- entender a natureza dos potenciais alvos da contaminação e a relação entre a fonte e os efeitos, envolvendo: o uso atual e proposto para a área, o potencial contaminante da área, os alvos humanos potenciais nas proximidades da área, a proximidade e sensibilidade dos corpos hídricos, a proximidade e sensibilidade da flora e da fauna, a natureza das estruturas prediais, o perigo aos ecossistemas existentes na área e fora dela; e

- dar suporte às decisões gerenciais e de remediação.

A investigação geoambiental, geralmente envolve três fases, não sendo obrigatória à consecução de todas as fases, visto tratar-se de um processo interativo passível de interrupção em função da suficiência de informações e da gerência de risco. CONAMA, 2009 define essas fases como:

Investigação ou Avaliação preliminar: avaliação inicial, realizada com base nas informações históricas disponíveis e inspeção do local, com o objetivo principal de encontrar evidências, indícios ou fatos que permitam suspeitar da existência de contaminação na área;

Investigação confirmatória: etapa do processo de identificação de áreas contaminadas que tem como objetivo principal confirmar ou não a existência de substâncias de origem antrópica nas áreas suspeitas, no solo ou nas águas subterrâneas, em concentrações acima dos valores de investigação;

Investigação detalhada: etapa do processo de gerenciamento de áreas contaminadas, que consiste na aquisição e interpretação de dados em área contaminada sob investigação, a fim de entender a dinâmica da contaminação nos meios físicos afetados e a identificação dos cenários específicos de uso e ocupação do solo, dos receptores de risco existentes, dos caminhos de exposição e das vias de ingresso.

Para o gerenciamento de áreas contaminadas, o órgão ambiental competente deverá instituir procedimentos e ações de investigação e de gestão, que contemplem as seguintes etapas:



Identificação: etapa em que serão identificadas áreas suspeitas de contaminação com base em avaliação preliminar, e, para aquelas em que houver indícios de contaminação, deve ser realizada uma investigação confirmatória, as expensas do responsável, segundo as normas técnicas ou procedimentos vigentes.

Diagnóstico: etapa que inclui a investigação detalhada e avaliação de risco, as expensas do responsável, segundo as normas técnicas ou procedimentos vigentes, com objetivo de subsidiar a etapa de intervenção, após a investigação confirmatória que tenha identificado substâncias químicas em concentrações acima do valor de investigação.

Intervenção: etapa de execução de ações de controle para a eliminação do perigo ou redução, a níveis toleráveis, dos riscos identificados na etapa de diagnóstico, bem como o monitoramento da eficácia das ações executadas, considerando o uso atual e futuro da área, segundo as normas técnicas ou procedimentos vigentes.

Será considerada Área Suspeita de Contaminação – AS, pelo órgão ambiental competente, aquela em que, após a realização de uma avaliação preliminar, forem observados indícios da presença de contaminação ou identificadas condições que possam representar perigo.

Será declarada Área Contaminada sob Investigação – AI, pelo órgão ambiental competente, aquela em que comprovadamente for constatada, mediante investigação confirmatória, a contaminação com concentrações de substâncias no solo ou nas águas subterrâneas acima dos valores de investigação. Quando a concentração de uma substância for reconhecida pelo órgão ambiental competente como de ocorrência natural, a área não será considerada contaminada sob investigação, entretanto será necessária à implantação de ações específicas de proteção à saúde humana pelo poder público competente.

Será declarada Área Contaminada sob Intervenção-ACI, pelo órgão ambiental competente, aquela em que for constatada a presença de substâncias químicas em fase livre ou for comprovada, após investigação detalhada e avaliação de risco, a existência de risco à saúde humana.

Será declarada Área em Processo de Monitoramento para Reabilitação-AMR, pelo órgão ambiental competente, aquela em que o risco for considerado tolerável, após a execução de avaliação de risco.

Nas situações em que a existência de determinada AI ou ACI possa implicar em impactos significativos aos recursos ambientais, o gerenciamento do risco poderá

se basear nos resultados de uma avaliação de risco ecológico, a critério do órgão ambiental competente. Na impossibilidade de execução de uma avaliação de risco ecológico, em uma determinada área, o órgão ambiental competente deverá estabelecer valores específicos e metas para subsidiar a reabilitação da área utilizando-se de metodologia tecnicamente justificada.

Em caso de identificação de fase livre, a avaliação de risco deverá ser efetuada após a sua eliminação ou redução a níveis mínimos estabelecidos a critério do órgão ambiental competente, com base nos recursos tecnológicos disponíveis, sem prejuízo à implantação das etapas de gerenciamento das outras fontes de contaminação da área.

MONDELLI (2008) apresentou algumas diretrizes existentes nas legislações Brasileira, Canadense e Norte Americana referentes às metodologias de Investigação Geoambiental.

Os Estados Unidos (USEPA, 1996) possui um plano mais detalhado e numérico de investigação, que prevê um conhecimento das condições de contorno da contaminação e do terreno afetado. É complicada a adoção deste modelo em regiões tropicais, onde na maioria das vezes é difícil a definição de um perfil estratigráfico detalhado e principalmente, a pluma de contaminação (MONDELLI, 2008).

Além da complexidade geológica existente em regiões tropicais, existe o custo da investigação, que pode aumentar devido à grande quantidade de coleta de amostras e de análises de laboratório, que segundo a proposta da USEPA (1996), devem ser coletadas em superfície e a intervalos de até 60 cm de profundidade. Por isso, acredita-se que as legislações vigentes no Canadá, mais gerais e que utilizam maior quantidade de ensaios de campo, possam ser tomadas como referência e modelo a ser seguido por países como Brasil (MONDELLI, 2008).

Nas etapas de investigação confirmatória e de reconhecimento o Canadá propõe a utilização da geofísica de superfície. Além das amostragens de solo e água e respectivas análises de laboratório, a proposta canadense ainda inclui a opção de realização da caracterização das amostras em campo, e a realização da modelagem de fluxo e de avaliação biológica. Na investigação detalhada a legislação canadense prevê a determinação de todos os subsídios necessários para a execução do plano de remediação. Somente após as etapas de investigação é que será possível executar as medidas de remediação e/ou recuperação (MONDELLI, 2008).

O manual de avaliação da subsuperfície de áreas contaminadas do Canadá apresenta as seguintes etapas de investigação: revisão de escritório; geofísica de

superfície e intrusiva; poços de monitoramento e conhecimento hidráulico e hidrogeológico; amostragem de sólidos, líquidos e gasosos; análises químicas, biológicas, geoquímicas e geotécnicas; modelagem matemática da pluma de contaminação; e investigação para monitoramento do programa de remediação executado.

### **2.3.2. Critérios e Valores Orientadores de Qualidade do Solo**

A Resolução n.420, de 28 de dezembro de 2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

Na ocorrência comprovada de concentrações naturais de substâncias químicas que possam causar risco à saúde humana, os órgãos competentes deverão desenvolver ações específicas para a proteção da população exposta.

A avaliação da qualidade de solo, quanto à presença de substâncias químicas, deve ser efetuada com base em Valores Orientadores de Referência de Qualidade, de Prevenção e de Investigação. Os VRQs do solo para substâncias químicas naturalmente presentes serão estabelecidos pelos órgãos ambientais competentes dos Estados e do Distrito Federal. Entende como:

Valores Orientadores: são concentrações de substâncias químicas que fornecem orientação sobre a qualidade e as alterações do solo e da água subterrânea;

Valor de Referência de Qualidade-VRQ: é a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos;

Valor de Prevenção-VP: é a concentração de valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções principais.

Valor de Investigação-VI: é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado.

Serão adotados como VPs e VIs os valores apresentados no Anexo II da resolução citada, os quais foram estabelecidos com base em ensaios de fitotoxicidade ou em avaliação de risco ecológico em função de cenários de exposição padronizados

para diferentes usos e ocupação do solo. O Quadro 2.1 apresenta os valores referentes aos metais Pb e Cu.

| Substâncias | CAS n°    | Solo (mg.kg <sup>-1</sup> de peso seco) (1) |           |                |             |            | Água Subterrânea (µg.L-1) |
|-------------|-----------|---|-----------|----------------|-------------|------------|---------------------------|
|             |           | Referência de qualidade                     | Prevenção | Investigação   |             |            | Investigação              |
|             |           |   |           | Agrícola APMax | Residencial | Industrial |                           |
| Inorgânicos |           |   |           |                |             |            |                           |
| Chumbo      | 7440-43-9 | E   | 72        | 180            | 300         | 900        | 10*                       |
| Cobre       | 7440-50-8 | E   | 60        | 200            | 400         | 600        | 2700*                     |

Quadro 2.6: Lista de valores orientadores para solos e para águas subterrâneas (Fonte: CONAMA, 2009).

(1) – Para comparação com valores orientadores, utilizar as recomendações dos métodos 3050b (exceto para o elemento mercúrio) ou 3051 da USEPA–SW–846 ou outro procedimento equivalente, para digestão ácida de amostras de solos na determinação das substâncias inorgânicas por técnicas espectrométricas.

E - a ser definido pelo Estado.

\* Padrões de potabilidade de substâncias químicas que representam risco à saúde definidos na Portaria no 518/2004 do Ministério da Saúde (Tabela 3).

Segundo CONAMA são procedimentos para avaliação das concentrações de substâncias químicas e controle da qualidade do solo, dentre outros:

- I - realização de amostragens e ensaios de campo ou laboratoriais;
- II - classificação da qualidade do solo; e
- III - adoção das ações requeridas conforme estabelecido.

Para atendimento desta Resolução nas amostragens, análises e controle de qualidade para caracterização e monitoramento do solo e das águas subterrâneas deverão ser observadas, no mínimo, as seguintes diretrizes:

I - adotar procedimentos de coleta, manuseio, preservação, acondicionamento e transporte de amostras de acordo com normas nacionais e internacionais, respeitando-se os prazos de validade;

II - realizar as análises físicas, químicas, físico-químicas e biológicas, utilizando-se metodologias que atendam às especificações descritas em normas reconhecidas internacionalmente;

III - no caso do limite de quantificação da amostra – LQA (limite de quantificação da amostra) ser maior do que o LQP (limite de quantificação praticável), o LQA será aceito desde que tecnicamente justificado. Sendo LQA e LQP:

Limite de Quantificação Praticável-LQP - menor concentração de uma substância que pode ser determinada quantitativamente, com precisão e exatidão, pelo método utilizado;

Limite de Quantificação da Amostra-LQA - LQP ajustado para as características específicas da amostra analisada

### **3. MÉTODOS**

#### **3.1. PLANO DE INVESTIGAÇÃO**

Conforme citado este trabalho está inserido no projeto IME-COPPE, que tem como objetivo final o desenvolvimento de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) para o Exército Brasileiro.

Por solicitação do próprio EB, o estudo foi iniciado com a questão dos impactos associados à atividade de destruição de munição e explosivos inservíveis. A área piloto escolhida foi o DCMun.

Em 2003 esta área se tornou objeto de uma ação do Ministério Público Federal no RJ, que cobrou estudos de avaliação dos impactos ambientais para a comunidade vizinha. Devido a essa ação foram realizadas investigações preliminares em 2008 pela UFRRJ e pela PUC-Rio. Os resultados indicaram contaminação do solo por metais pesados (Pb, Cd e Cu), porém não foi detectada contaminação por compostos orgânicos aromáticos.

A partir destes resultados foi elaborado um plano de investigação, focado no tipo de contaminação observada na campanha preliminar objetivando o diagnóstico da contaminação e dos impactos resultantes, para definir a necessidade ou não de medidas de intervenção e, em caso afirmativo, dar subsídios ao projeto de remediação.

No caso em questão, pode-se considerar que a primeira etapa já foi realizada, com os estudos efetuados pela UFRRJ e pela PUC-Rio. Assim, trata-se de estabelecer um plano de investigação confirmatória. O Quadro 3.1 apresenta, em linhas gerais, as atividades do Plano de Investigação realizadas durante a elaboração deste trabalho.

| Atividade   | TIPO        | FINALIDADE  |
|---|-------------|---|
| Topografia  | CAMPO       | Base para estratigrafia, análise dos fluxos subterrâneos e de escoamento superficial, locação das investigações.  |
| Sondagens a percussão com SPT   |             | Estratigrafia geológico-geotécnica e posição do lençol d'água.  |
| Levantamento Geofísico (eletroresistividade)  |             | Medida indireta da pluma de contaminação no subsolo.  |
| Coleta de amostras de solo (deformadas e blocos)                                    |             | Caracterização física e físico-química dos estratos de solo identificados; obtenção de parâmetros para o estudo. Análise química e extração seqüencial. |
| Caracterização física, análises mineralógicas e físico-químicas de amostras de solo | LABORATÓRIO | Caracterização dos estratos e definição das propriedades relevantes para avaliar a interação com as espécies químicas.                                  |
| Análises químicas de amostras de solo   |             | Análise da contaminação.  |
| Extração seqüencial de metais em solo   |             | Análise do particionamento dos metais no solo.  |
| Ensaio de Batelada, Adensamento, Retenção de Umidade e Permeabilidade em solo       |             | Determinação dos parâmetros de transporte das espécies através do solo  |

Quadro 3.1: Atividades realizadas no Plano de Investigação e Monitoramento da Área de Desmilitarização do DCMun, RJ.

## 3.2. ESTUDOS ANTERIORES

Foram realizadas investigações preliminares em 2008, pela UFRRJ e pela PUC-Rio. Resultados indicaram contaminação por metais pesados (Pb, Cd e Cu) no solo. Neste local não foi detectada contaminação por compostos orgânicos aromáticos.

### 3.2.1. Estudos da PUC-Rio

O resultado das análises foi apresentado pela PUC-Rio no Relatório Conclusivo de Avaliação de Compostos Nitroaromáticos em Amostras de Solo nas Dependências da Área de Destruição de Munição e no Entorno do Depósito Central de Munição de Exército Brasileiro (PUC, 2008).

Foram coletadas amostras em seis pontos dentro na área de destruição e em quatro pontos no entorno, para a determinação de compostos nitroaromáticos, segundo procedimento analítico baseado no método EPA 8330 adaptado por cromatografia líquida com detector de varredura de diodo (HPLC/CAD).

### **3.2.2. Estudos da UFRRJ**

Os resultados apresentados pelo Departamento de Solos da UFRRJ no relatório “Avaliação da Contaminação por Metais Pesados de Área de Destruição de Munição e do seu Entorno no Depósito Central de Munição do Exército Brasileiro” em Junho de 2008 (AMARAL SOBRINHO, 2008) constataram que a área de destruição de munição encontrava-se com contaminação elevada de Chumbo e média de Cobre e Cádmio.

Na área de destruição com 1.343,1 m<sup>2</sup>, foi planejada uma grade regular de amostragem de solo com espaçamento de 5 x 5 metros. O desenvolvimento de estudos de variabilidade espacial por geoestatística implica na organização de um sistema de amostragem de solo em grade. Em cada nó da grade ou ponto de amostragem, determina-se uma coordenada (métrica) para que se possam efetuar os cálculos de semivariâncias em função da distância.

Coletaram amostras no local onde são realizadas as explosões e obtiveram 30 pontos amostrais nos quais foram retiradas amostras simples em cinco profundidades: 0-20cm; 20-40cm; 40-60cm; 60-80cm, e 80-100cm, totalizando 150 amostras. Também coletaram na área circunscrita à área de destruição de munição em 15 pontos localizados à montante e à jusante nas mesmas cinco profundidades, totalizando 75 amostras. Além desses pontos, foram abertas 2 trincheiras para verificar a contaminação em profundidade superior à 1,0 m, e posteriormente coletaram amostras simples até a profundidade de 1,6 m.

Os pontos foram georreferenciados através de um GPS modelo PRO XT da Trimble, utilizando-se o sistema de coordenadas UTM, fuso 23S e Datum horizontal WGS84 (DGPS – modelo Pro XT da Trimble). Para o alcance de precisão submétrica, efetuou-se a correção diferencial pós-processada das coordenadas a partir de arquivo de dados de posicionamento da estação base do Rio de Janeiro.

Os teores pseudototais foram determinados segundo o método da EPA 3051 para : Chumbo; Cobre; Cádmio; Cromo; Ferro; Manganês; Níquel e Zinco em todas as amostras coletadas. Para interpretação dos resultados, os limites críticos dos teores de metais pesados foram comparados com os valores orientadores para solo e águas subterrâneas no Estado de São Paulo, proposto pela CETESB em 2005.

A análise geoestatística da área de destruição de munição foi realizada apenas para os metais Cádmio, Chumbo e Cobre; os que apresentaram as concentrações mais elevadas. Os parâmetros obtidos possibilitaram a construção de mapas de variabilidade espacial.

Os cálculos de semivariância, validação dos modelos de semivariogramas e krigagem ordinária foram realizados através do software Geostat. A partir dos dados interpolados, utilizou-se o software Surfer 8 para a geração de mapas de isovalores de teores de: Chumbo, Cádmio e Cobre com resolução de 1 metro

### **3.3. CARACTERIZAÇÃO REGIONAL**

A determinação da natureza, da forma, da extensão e da distribuição de qualquer contaminação em uma área é fundamentada na caracterização do meio físico. Neste estudo foram pesquisados dados referentes à localização, hidrografia, meteorologia, vegetação, solos, geologia e geomorfologia da região onde está inserida a área de destruição.

Além das visitas em campo, imagens capturadas do Google Earth serviram como base para localização e interpretação de informações sobre o relevo, vegetação e hidrografia da área. Estas informações e as demais foram obtidas em pesquisas disponibilizadas em Teses, Dissertações e Relatórios Técnicos. Mapas e dados sobre a região foram obtidos em diversas fontes como ANA, EMBRAPA, CPRM e LIGHT.

### **3.4. SERVIÇOS DE CAMPO**

#### **3.4.1. Coleta de Amostras**

As amostras foram coletadas segundo a NBR 9604, 1986, atendendo os procedimentos de coleta, manuseio, preservação, acondicionamento e transporte de amostras, e prazos de validade, para a realização das análises físicas, químicas e físico-químicas, de acordo com a resolução CONAMA N° 420, 2009.

#### **3.4.2. Topografia**

O levantamento planialtimétrico do DCMun foi realizado pela 5ª Divisão de Levantamento da Diretoria de Serviço Geográfico do EB. Apresentado em coordenadas UTM, com curvas de metro em metro e disponibilizado em arquivo digital permitindo a inclusão na planta dos pontos de coleta de amostras e de ensaios complementares.

A área mínima foi limitada pelos divisores de água nas vizinhanças do local utilizado para a atividade de destruição das munições mais uma faixa de 20 metros (horizontalmente).



### **3.4.3. Sondagem à percussão**

Na área de destruição foram realizadas 5 Sondagens à percussão conforme NBR 6484, 2001 pela empresa SONDOSOLO.

O procedimento consiste em perfurações por percussão, com o auxílio de circulação de água e protegidas por um revestimento de 2"1/2 de diâmetro. Na extração das amostras foi utilizado amostrador padrão SPT de 1"3/8 (34,9mm) de diâmetro interno e 2" (50,8mm) de diâmetro externo. Foi registrado o número de golpes produzidos pela queda livre de um peso de 65 kg, a uma altura de 75 cm, para fazer penetrar 30 cm do nas camadas de solo, caracterizando o número SPT.

### **3.4.4. Levantamento Geofísico**

O Levantamento Geofísico na Área de Destruição do DCMun foi realizado pela Oficinas da Terra Cooperativa de Prestadores de Serviços Ambientais LTDA, geólogo responsável Eduardo de Oliveira Moraes.

A utilização de ensaios de geofísica de superfície visando uma melhor caracterização geoambiental do subsolo é recente no Brasil, principalmente quanto ao emprego da resistividade como propriedade geolétrica.

MONDELLI, 2008 discute e propõe a utilização de técnicas indiretas de investigação, focando a medição da resistividade elétrica por ser uma propriedade bastante dependente da litologia e da contaminação, fatores essenciais numa investigação geoambiental.

FUKUE et al., 2000 e SCREEDEEP et al., 2004 apud MONDELLI, 2008 procuraram relacionar valores de resistividade a diferentes concentrações de salutos orgânicos e inorgânicos, e graus de saturação respectivamente. Os resultados foram promissores, mostrando a grande importância da correta interpretação dos valores de resistividade na investigação de diferentes solos possivelmente contaminados.

#### **3.4.4.1. Eletroresistividade**

Dentre as principais propriedades elétricas empregadas na investigação geolétrica a resistividade elétrica representa a dificuldade encontrada pela corrente elétrica para se propagar em um meio qualquer. Sua unidade de medida é *ohm x m*. As principais técnicas operacionais de medição do parâmetro resistividade elétrica dos terrenos são a sondagem elétrica vertical (SEV) e o caminhamento elétrico (CE) (SOUZA, 2006).

Um fator que condiciona fortemente a resistividade elétrica de um meio é sua textura. Um arenito bem selecionado apresenta maior volume de espaços vazios para o armazenamento do eletrólito e, conseqüentemente, possui menor resistividade; ao contrário, menor porosidade significa maior resistividade. A resistividade é uma das propriedades que mais variam para um mesmo material, pois são vários os fatores que a influenciam como: presença de água, sais, porosidade, permeabilidade, teor de argila, temperatura (resistividade decresce com o aumento da temperatura) e a própria condutividade dos minerais.

De maneira geral, materiais de baixa porosidade como, por exemplo, folhelhos maciços, rochas ígneas e metamórficas tenderão a exibir altas resistividades, assim como sedimentos secos, como areias e cascalhos ou materiais com poros preenchidos com água (livre de sais dissolvidos). Por outro lado, sedimentos ou rochas saturadas (com sais dissolvidos), ou com a presença de minerais argilosos, tenderão a possuir resistividade intermediária ou baixa, a depender do conteúdo em argilo-minerais (GALLAS, 2000 apud SOUZA, 2006).

## Caminhamento Elétrico

A técnica de medição utilizada nesta pesquisa foi o CE que é medido a partir de uma corrente  $I$  que é injetada entre os eletrodos de corrente (A-B) na superfície do terreno, gerando uma diferença de potencial ( $\Delta V$ ) que é lido entre os eletrodos de potencial (M-N) conforme Figura 3. A aquisição de dados ocorre a partir do avanço lateral de todo o arranjo de eletrodos A-MN-B, ao longo das seções. Desta forma, investiga-se uma ou mais profundidades, aproximadamente constantes privilegiando a análise das variações laterais de resistividade aparente.

O arranjo utilizado no CE foi do tipo Wenner, com leitura a cada 10 metros lineares dentro de uma seção. Para cada ponto foram feitas leituras em 4 profundidades: 0,5, 1, 2 e 3 m. Neste arranjo os eletrodos de corrente (A-B) e de potencial (M-N) estão sempre eqüidistantes, ou seja, o espaçamento entre cada eletrodo é sempre um terço da distância entre os eletrodos de corrente. Os resultados obtidos foram agrupados em seções e a partir destas foram elaboradas as curvas de isorresistividade.

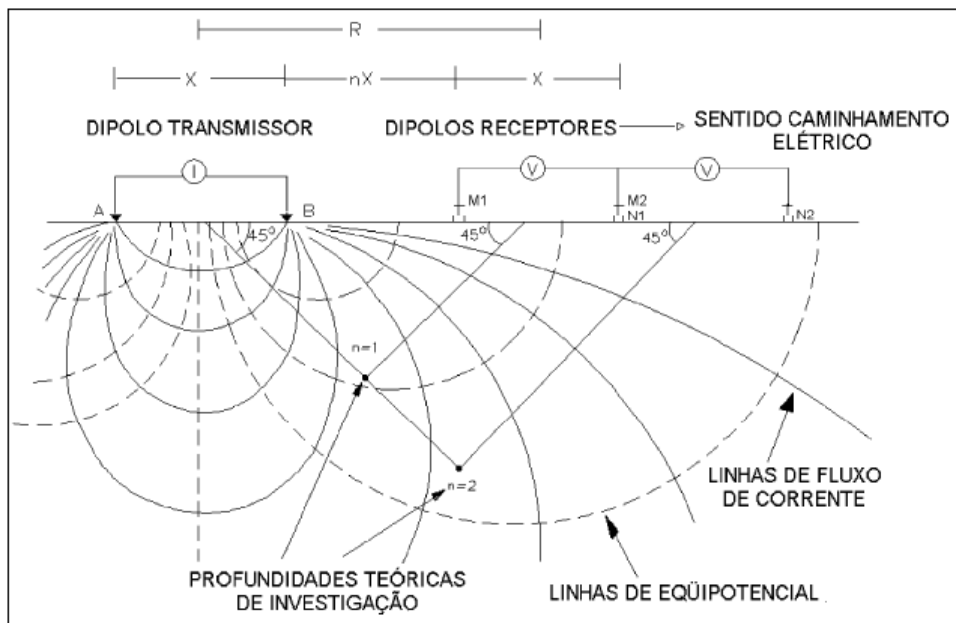


Figura 3.1: Geometria do arranjo do CE com avanço lateral (Fonte: SOUZA, 2006)

## 3.5. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

### 3.5.1. Caracterização Física

As análises e o preparo das amostras foram realizados no Laboratório de Geotecnia da COPPE, setor de Caracterização de Solos. A análise granulométrica, densidade real dos grãos ( $G_s$ ) e os limites de Atterberg ( $w_L$ ,  $w_P$ , IP) foram determinados de acordo com os procedimentos prescritos pela ABNT conforme as normas: NBR 6457, 1986; NBR 7181, 1984; NBR 6508, 1982; NBR 6459, 1984 e NBR 7180, 1984.

#### 3.5.1.1. Adensamento

O ensaio de adensamento foi realizado no Laboratório de Geotecnia da COPPE, setor de Ensaios Geotécnicos Especiais, segundo a norma rodoviária do DNER, Instrução de Ensaio DNER-IE005-94.

A compressibilidade é definida como a relação entre a magnitude das deformações e a variação no estado de tensões imposta. No caso de solos, estas deformações podem ser estabelecidas através de variações volumétricas ou em termos de variações no índice de vazios. Um dos parâmetros que define a compressibilidade do solo é o coeficiente de variação volumétrica ( $m_v$ ) definido pela Equação 3.1.

Equação 3.1

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_m}$$

Equação 3.2

Onde  $a_v$  é obtido a partir da Equação 3.2:

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p}$$

Onde:

$\Delta p$  – diferença entre a pressão inicial e a atuante durante o carregamento dos corpos de prova no ensaio;

$\Delta e$  – decréscimo de índice de vazios;

$e_m$  – índice de vazios médio;

$a_v$  – coeficiente de compressibilidade;

$m_v$  – coeficiente de variação volumétrica;

O  $m_v$  é definido pela razão entre a deformação vertical e o incremento de pressão efetiva vertical correspondente. A estimativa da variação de índice de vazios é feita com base nos parâmetros de compressibilidade do solo, os quais correlacionam variações volumétricas com variações de tensão efetiva

### 3.5.1.2. Permeabilidade

O ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da COPPE, setor de Ensaio Geotécnicos Especiais, com permeâmetro de parede rígida à carga variável segundo a NBR 14545, 2000. Foram utilizadas 2 amostras indeformadas em cilíndrico de inox fixo entre duas placas (tampas) com suas extremidades vedadas com anéis de borracha.

Muitos fatores influenciam a condutividade hidráulica, entre eles a densidade e a viscosidade da água, tamanho, forma e número de poros, e as propriedades do fluido e das partículas do solo (permeabilidade) que afetam a atração entre os dois materiais. No entanto sendo a viscosidade e a densidade constantes, para fins de estudo de percolação de água dentro do solo, considera-se permeabilidade e condutividade e somente dependentes do número de poros e a forma como estão interconetados (SILVEIRA et al., 1993 apud ALMEIDA, 2009).

A composição mineralógica e química do solo tem grande influência na condutividade hidráulica além dos parâmetros de adensamento e compactação e as características do fluido percolante.

Quanto maior o valor de  $K$  ( $\text{cm s}^{-1}$ ), menor será a resistência, ou seja, maior a facilidade com que a água se move no solo. O índice de vazios influencia diretamente esse movimento. Assim é possível estimar indiretamente o coeficiente  $K$ , em função dos coeficientes de adensamento e de variação volumétrica.

### 3.5.1.3. Classificação dos Solos

Os solos foram classificados seguindo os critérios das classificações texturais propostas pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos e pelo SUCS.

A representação das classificações texturais pode ser facilmente realizada através de diagramas triangulares (Figura 3.2) onde os solos são divididos em 10 grupos, sendo aplicável somente à fração do solo com partículas de diâmetro menor que 2 mm.

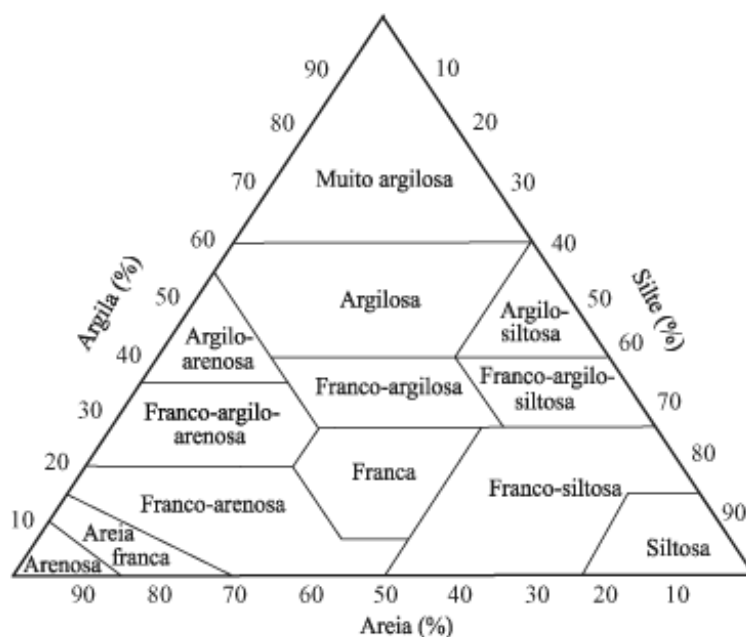


Figura 3.2: Triângulo de classificação textural de solos (Fonte: VIEIRA, 1988)

Entre as classificações geotécnicas destaca-se o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Desenvolvida por Arthur Casagrande e amplamente revisada, essa classificação se baseia nos índices  $w_L$ ,  $w_P$  e granulometria.

Os solos são representados por duas letras, a primeira relativa à granulometria e a segunda à plasticidade. Algumas limitações ocorrem principalmente em razão das diferenças existentes entre a natureza das frações de argila e areias, de solos de

regiões tropicais e regiões temperadas, para as quais tais classificações foram desenvolvidas.

Os índices estão relacionados com a fração de argila, e também são função da areia presente. Quando se quer ter uma idéia da atividade da fração de argila, os índices devem ser comparados com a fração de argila existente. Essa relação é conhecida como atividade de Skempton e é calculada pela equação Equação 3.3:

Equação 3.3

$$A_s = \frac{I_p \%}{\% < 2\mu\text{m}}$$

Onde:

$$I_p = w_L - w_p;$$

$A_s$  – menor que 0,75 é pouco ativo;

$A_s$  – de 0,75 a 1,25 é normal;

$A_s$  – maior que 1,25 é muito ativo.

A influência da fração argila nas propriedades do solo é avaliada indiretamente através do índice de atividade. Quanto maior a atividade maior a suscetibilidade de mudança nas propriedades mecânicas e hidráulicas com a mudança no tipo de cátion trocável e composição do fluido intersticial. Quando aplicado a alguns tipos de solos tropicais, o índice de atividade de Skempton pode sugerir uma atividade não compatível com a mineralogia.

### **3.5.2. Análises Físico-químicas**

Foram realizadas, segundo procedimentos do Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA, no Laboratório de Geotecnia da COPPE - setor de Química e Mineralogia dos Solos, as análises físico-químicas: pH, CEE,  $C_{\text{orgânico}}$  e CTC.

#### **3.5.2.1. Capacidade de Troca Catiônica**

A CTC foi obtida no Laboratório de Geotecnia da COPPE, setor de Química e Mineralogia dos Solos.

As bases foram determinadas a partir da extração dos teores disponíveis quantificados por fotometria de chama e absorção atômica. Os cátions adsorvidos são

removidos por soluções de Cloreto de Potássio, Acetato de Cálcio e Ácido Clorídrico e posteriormente determinados por métodos volumétricos (Cálcio, Magnésio e acidez), por espectrometria de Absorção Atômica (Alumínio) e por fotometria de chama (Sódio e Potássio).

Como cátions trocáveis são apresentados os íons:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{+++}$ ,  $\text{Al}^{+++}$ ,  $\text{Mn}^{++}$  e  $\text{H}^+$ . Denomina-se Soma de Bases ou S a soma de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , e a porcentagem equivalente dentro da Capacidade Total de Troca (T) chama-se Saturação ou V% ( $V=S.100/T$ ). O  $\text{Al}^{+++}$ ,  $\text{Mn}^{++}$  e  $\text{H}^+$  podem ser agrupados como acidez trocável (VIEIRA, 1988).

A capacidade de troca catiônica (CTC) é uma medida da distribuição das cargas elétricas disponíveis na superfície das partículas do solo para a retenção de água e cátions dispersos na solução do solo. Os valores de CTC de um solo dependem da classe textural, do tipo de mineral de argila presente e do teor de matéria orgânica (Brady, 1989).

### 3.5.2.2. pH, CEE e $C_{\text{orgânico}}$

Os valores de pH foram determinados potenciometricamente por meio de um eletrodo combinado imerso em suspensão sólida: líquido (água e KCl) na proporção 1:2,5. Potenciômetro marca Analion, modelo PM-606F, com eletrodo de vidro combinado, Analion modelo V-620.

Caso a diferença  $\Delta\text{pH}=\text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  seja negativa o solo tem naturalmente cargas superficiais negativas, caso seja positiva o solo tem naturalmente cargas superficiais positivas e para valores pequenos, próximos de Zero as cargas estão em equilíbrio (MENDONÇA, 2000).

A CEE foi determinada através de condutivímetro, marca Analion, modelo C-701 com célula de condutividade igual a 1cm.

Na análise do  $C_{\text{orgânico}}$  foi utilizada amostra seca ao ar e passada na peneira 80 mesh. Foi obtido a partir do procedimento de rotina em amostras de solo, método colorimétrico; oxidação com dicromato de sódio usando sulfato de prata como catalisador e o excesso dosado por titulação com solução padrão de sulfato ferroso e difenilamina como indicador.

A matéria orgânica segundo MENDONÇA, 2000 tem CTC de 100 a 500 meq/100g. Podemos considerar que em solos com baixa CTC, o percentual de MO, mesmo que pequeno, exerce um papel importante na capacidade de troca de íons.

### 3.5.2.3. Extração Sequencial

As técnicas de extração seqüencial são comumente usadas para o fracionamento de metais em solos, sedimentos e outras matrizes ambientais e buscam avaliar o potencial de mobilidade e disponibilidade destes metais. Os métodos mais empregados são baseados no procedimento de extração em várias etapas, nas quais diferentes reagentes são empregados consecutivamente, usando soluções de menor energia para as de maior energia, adotando ataques químicos sucessivos na matriz do solo.

Nesta pesquisa foi utilizado no fracionamento geoquímico o método BCR e as análises realizadas no Laboratório do Departamento de Geoquímica do Instituto de Química da UFF-Universidade Federal Fluminense. As frações operacionalmente definidas como as solúveis em ácido, redutível e oxidável, obtidas através de ataques químicos sucessivos, pseudototal com água régia a quente, e significam:

Fração 1: Trocável (Solúvel em ácido) – Metais ligados aos carbonatos;

Fração 2: Redutora - Metais ligados aos óxidos de Ferro e Manganês;

Fração 3: Oxidante – Metais complexados pela matéria orgânica;

Fração 4: Residual – 10 ml de água Régia.

As amostras foram secas em estufa a 60°C (para amostras com matéria orgânica a 40°C) durante 1 a 2 dias, maceradas e peneiradas em malha de 230 mesh (pó < 63µm);

Para cada amostra de solo o procedimento adotado na determinação das frações em cada etapa foi:

- Fração 1: Pesou-se 1g de amostra, foram adicionados 20 mL de Ácido Acético (0,11M) e a agitação durou 16 horas. Depois foi realizada centrifugação a 2500 rpm por 5 minutos. O sobrenadante foi guardado para análise (E1) e o resíduo (R1) lavado 2 vezes com 10 mL de água MILLI-Q.

- Fração 2: Adicionou-se ao resíduo (R1) 20 mL de Cloridrato de Hidroxilamina (0,5M - pH= 1,5), agitou-se durante 16 horas e depois centrifugou a 2500 rpm por 5 minutos. O sobrenadante foi guardado para análise (E2) e o resíduo (R2) lavado 2 vezes com 10 mL de água MILLI-Q.

- Fração 3: Dividida em 2 etapas: (i)Foram adicionados 5 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ao resíduo (R2), deixando reagir durante 1 hora e agitando eventualmente. Foi Aquecido em banho-maria (~85 °C) até quase secura. Este procedimento repetiu-se por 2 vezes.



(ii) Após resfriado foram adicionados 25 mL de Acetato de Amônio (1M - pH= 2,0) e deixar agitando por 16 horas, em seguida centrifugar, guardar o sobrenadante (E3) e lavar com água. Guardar o resíduo (R3)

- Fração 4: Adicionar ao resíduo (R3) 10 mL de água régia (HCl:HNO<sub>3</sub>), deixar em repouso por 16 horas e depois aquecer por 2 horas. Resfriar e centrifugar a 2500 rpm por 5 minutos.

Os extratos de cada fração foram diluídos quando necessário e a concentração dos metais de interesse foram determinadas por ICP-MS com célula de colisão.

### **3.5.3. Análise Mineralógica**

A análise Mineralógica da Fração Argila por Difractometria de Raios-X foi realizada no Laboratório de Solos da EMBRAPA. Esta análise pode ser realizada em preparações orientadas ou as difrações podem ocorrer com amostra total. As lâminas utilizadas nesse ensaio foram preparadas com amostras deformadas, de forma orientada, pelo método do esfregaço no laboratório da EMBRAPA.

No relatório recebido, apresentado no Anexo 5, constam as especificações dos equipamentos utilizados, metodologia do ensaio, os difratogramas interpretados e outras informações.

### **3.5.4. Ensaio de Batelada**

O ensaio de batelada é usado para determinação de parâmetros de interação solo contaminante. Este ensaio fornece uma estimativa da adsorção por um solo (material adsorvente) de uma substância química (soluto ou contaminante) presente em uma solução até atingir o equilíbrio. O uso desta técnica permite obter curvas isotérmicas de adsorção que indicam a variação de concentração de um soluto em contato com um solo.

O ensaio proporciona um intenso contato físico entre a massa de adsorvente e a solução contendo o soluto (s) investigado (s), com agitação constante, durante um período de tempo pré-definido no qual uma situação de equilíbrio entre adsorção e desorção é alcançada à temperatura constante. Para os ensaios realizados nesta pesquisa foi adotada a técnica de manter os volumes de solução iguais variando as quantidades de solo.

As soluções utilizadas foram produzidas a partir dos sais Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> e Cu(NO<sub>3</sub>).3H<sub>2</sub>O da VETEC. A determinação das concentrações dos solutos investigados foi realizada por espectrometria de Absorção Atômica, com o

equipamento: Espectrofotômetro de Absorção Atômica / Perkin Elmer / Modelo AAnalyst 300

Para garantir a consistência dos resultados, a razão solo:solução e o tempo de equilíbrio foram determinados.

### 3.5.4.1. Razão Solo:Solução (RSS)

A razão solo: solução (RSS) é definida como a massa equivalente a solo seco em gramas por volume em mililitros da solução contendo o soluto investigado usados nos ensaios. A razão solo: solução recomendada é a que proporcione um percentual de adsorção entre 10% e 30% da maior concentração de soluto. A Equação 3.4 mostra o cálculo do percentual adsorvido (A%) usando a concentração de soluto na solução inicial e a concentração do soluto na solução filtrada da mistura

Equação 3.4

$$\%A = \frac{C_0 - C \times 100}{C_0}$$

Onde:

% A = percentual adsorvido

C<sub>0</sub> = concentração inicial do soluto (mg/L)

C = concentração do soluto após agitação com o adsorvente e filtração (mg/L)

Na determinação da RSS a concentração da solução é mantida constante variando a massa de adsorvente para um tempo de equilíbrio de 24h. A massa de adsorvente refere-se à massa de solo seco.

Amostras deformadas foram secas em estufa com ventilação forçada a 40°C, destorroadas e passadas na peneira n.200. Com os valores de umidade determinados nos ensaios de caracterização foi efetuado o cálculo da correção da massa de solo seca a ser utilizada no ensaio.

Após a correção pesou-se o solo dentro do frasco de polietileno onde permaneceu em contato com a solução contendo o soluto. Foram ensaiadas as RSS nas proporções de 1:4, 1:10, 1: 20, 1:50, 1:100 e 1:200. Em seguida os frascos foram fixados no agitador e as amostras permaneceram em agitação durante 24 horas.

### 3.5.4.2. Determinação do Tempo de Equilíbrio

O tempo de equilíbrio é definido como o intervalo de tempo mínimo de agitação das amostras durante o ensaio que estabeleça uma variação de até 5% na concentração de soluto na solução não podendo ser inferior à 24 horas.

O tempo de equilíbrio foi determinado com a RSS obtida anteriormente usando os seguintes intervalos de tempo de agitação: 1, 4, 8, 24, 48 e 72 horas. Estes intervalos representam o tempo de agitação em que a interação entre a superfície sólida do adsorvente e a fase líquida é intensificada. A variação na concentração dos solutos na solução foi determinada pela Equação 3.5:

Equação 3.5

$$\% \Delta C = \left( \frac{C_1 \times C_2}{C_1} \right) \times 100$$

Onde:

%  $\Delta C$  = variação da concentração em porcentagem

$C_1$  = concentração de soluto no tempo  $t_1$ ;

$C_2$  = concentração de soluto no tempo  $t_2$  ;

A determinação do tempo de equilíbrio deve ser efetuada para cada espécie investigada.

### 3.5.4.3. Ensaio de Batelada

O ensaio consiste na determinação da massa de soluto adsorvida da solução por unidade de massa de adsorvente, que pode ser determinada pela Equação 3.6:

Equação 3.6

$$S = \frac{(C_0 - C_e) \times (V)}{M}$$

Onde:

S = quantidade de soluto adsorvida por quantidade de massa de adsorvente;

M = massa de adsorvente em gramas na mistura (massa equivalente de solo seco);

$C_0$  = concentração inicial do soluto na solução (antes do contato com o solo);

$C_e$  = concentração de equilíbrio do soluto na solução (após contato com o solo);

V = volume de solução em contato com o adsorvente.

Com a RSS e o tempo de equilíbrio definidos pesou-se o solo dentro do frasco de polietileno onde permaneceu em contato com a solução contendo o soluto nas concentrações de 5, 20, 50, 200, 400, 600, 800 e 1000 ppm de Cu e para o Pb nas concentrações de 10, 30, 50, 80, 100, 300, 400 e 500 ppm Os frascos foram levados para mesa agitadora e finalizada a agitação 24 horas depois, foram determinados o pH e a condutividade elétrica. O resíduo que permaneceu no papel filtro foi descartado e o filtrado encaminhado para a análise dos elementos em estudo. Os parâmetros de sorção foram obtidos a partir de modelos de isotermas. Linear, de Freundlich e de Langmuir.

O modelo Linear considera uma relação direta e linear entre a quantidade de soluto adsorvido pelo solo (S) e a concentração de equilíbrio ( $C_e$ ). O coeficiente angular da reta corresponde ao coeficiente de distribuição (Kd). O modelo apresenta algumas limitações como à capacidade de adsorção do solo ser considerada infinita, não definindo o limite superior da massa que pode ser adsorvida pelo solo. É definido pela Equação 3.7:

Equação 3.7

$$S = Kd \cdot C_e$$

Onde:

S = quantidade de soluto adsorvida por unidade de massa de adsorvente;

Kd = coeficiente de distribuição;

$C_e$  = concentração de equilíbrio do soluto;

O modelo de Freundlich é definido pela Equação 3.8:

Equação 3.8

$$S = Kf \cdot C_e^N$$

Onde:

S = quantidade de soluto adsorvida por unidade de massa de adsorvente;

Kf= proporcional à capacidade de adsorção máxima do solo;

N = declividade da curva de adsorção;

$C_e$  = concentração de equilíbrio do soluto;

A isoterma que melhor se ajusta é determinada nos modelos linearizados. Através da comparação entre os coeficientes de correlação (maior  $R^2$ ) dos gráficos

verifica-se qual a melhor se ajusta ao comportamento apresentado pelo soluto. A Equação 3.9 representa o modelo de Freundlich linearizado.

Equação 3.9

$$\log S = N \log C_e + \log K_f$$

O coeficiente de distribuição pode ser definido a partir da Equação 3.10:

Equação 3.10

$$K_d = K N C_e^{N-1}$$

Como a isoterma Linear, a isoterma de Freundlich supõe uma sorção ilimitada. Essa limitação do modelo prediz uma moderação na utilização de dados experimentais.

A Equação 3.11 representa o modelo de Langmuir:

Equação 3.11

$$S = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot C_e}{1 + \alpha \cdot C_e}$$

Onde:

S = quantidade de soluto adsorvida por unidade de massa de adsorvente;

$C_e$  = concentração de equilíbrio do soluto (após contato com o adsorvente)

$\alpha$  = constante de adsorção;

$\beta$  = quantidade máxima de soluto adsorvida pelo solo;

A Equação 3.12 representa o modelo de Langmuir linearizado.

Equação 3.12

$$\frac{C_e}{S} = \frac{1}{\alpha \cdot \beta} + \frac{C_e}{\beta}$$

O coeficiente de distribuição pode ser definido a partir da Equação 3.13:

Equação 3.13

$$K_d = \frac{\alpha \cdot \beta}{(1 + \alpha \cdot C_e)^2}$$

Os modelos de isoterma apresentados são baseados na hipótese de que o equilíbrio das reações é atingido durante o ensaio de batelada.

## 4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 4.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO

A área de destruição de munição do exército está localizada dentro do Depósito Central de Munição do Exército Brasileiro, DCMun, no município de Paracambi-RJ. A Figura 4.1 mostra a área de destruição e seu entorno. Nas Figura 4.2 e Figura 4.3 é possível ver a área de destruição em detalhe.

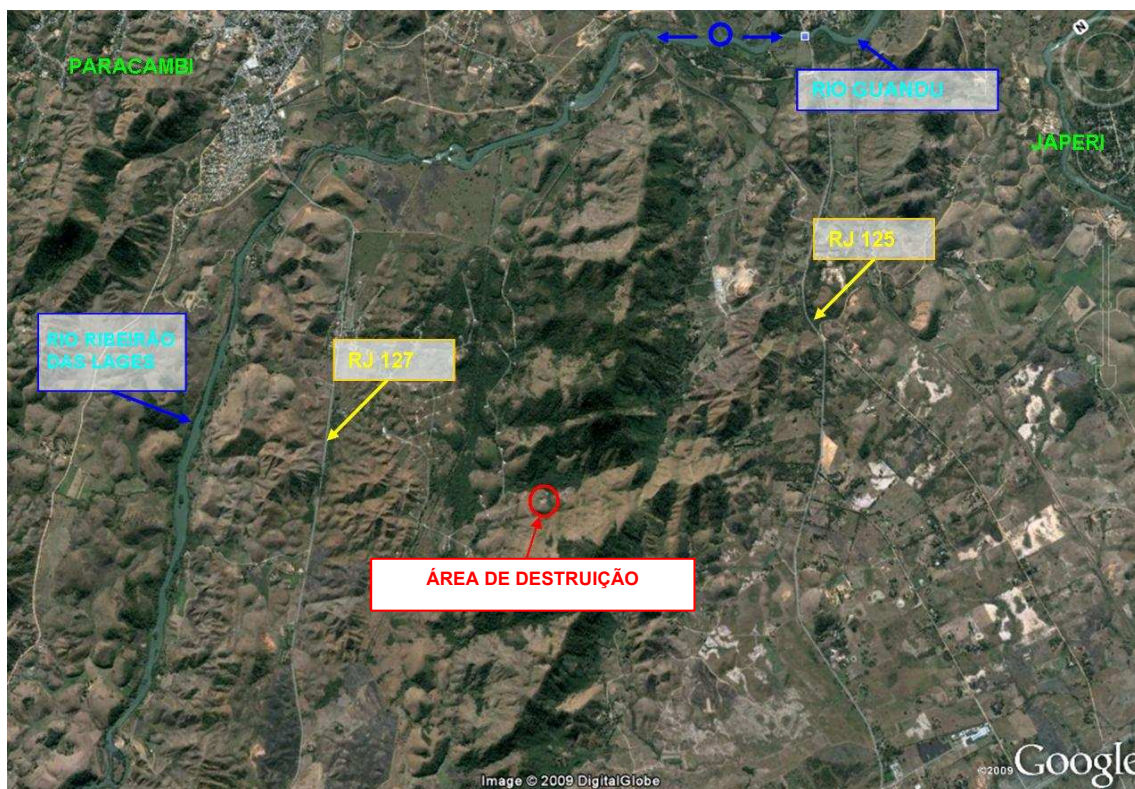


Figura 4.1: Localização do DCMun (Fonte: Google Earth, 2009).



Figura 4.2: Vista da área de destruição no DCMun (Fonte: Google Earth, 2009).



Figura 4.3: Vista frontal da área de destruição no DCMun.

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO REGIONAL

### 4.2.1. Hidrografia

A área em estudo está localizada na bacia hidrográfica do Rio Guandu. O rio tem 48 km de extensão e é formado pelo encontro dos rios Santana e Ribeirão das Lages desaguando na Baía de Sepetiba. Grande parte de sua água é oriunda do rio Paraíba do Sul devido a uma transposição que ocorre no reservatório de Santa Cecília, estação da LIGHT (empresa fornecedora de energia elétrica do Estado do Rio de Janeiro) no município de Barra do Piraí (CAMPOS & AZEVEDO, 2002 apud SALAMENE, 2007).

A Bacia Hidrográfica do rio Guandu está dividida em três sub-bacias: Rio Guandu, Rio da Guarda e Rio Guandu Mirim totalizando uma área de 1.395km<sup>2</sup>.

A área de destruição está inserida no domínio da Sub-bacia do Rio Guandu, conforme Figura 4.4, numa zona limítrofe entre as sub-bacias do Rio Guandu e do Rio da Guarda, no sopé da serra do Cambraia, o que pode ser visto na Figura 4.5.



Figura 4.4: Limites das sub-bacias hidrográficas do Rio Guandu (Fonte: ANA, 2006).





Figura 4.5: Localização da Serra do Cambraia-zona limítrofe das sub-bacias hidrográficas (Fonte: Google Earth, 2009).

## 4.2.2. Meteorologia

### Clima

A região apresenta clima de natureza essencialmente tropical chuvoso (tipo A), variando de quase quente a quente e de úmido a superúmido. Está sujeito também a uma influência marítima periódica e irregular devido à proximidade da faixa litorânea. O clima da região pode ser classificado, dentro dos critérios de Köppen, como do tipo Aw caracterizado como quente e úmido, com estação seca no inverno e cerca de 85% das chuvas anuais ocorrendo entre outubro e março (LIGHT,2007).

### Pluviometria

Com base nos dados observados na estação climatológica de Ecologia Agrícola (LIGHT,2007), estima-se que a precipitação média anual na região é 1225 mm, sendo a máxima média mensal de 195 mm em janeiro e a mínima média mensal de 31 mm em junho. Os meses mais chuvosos se prolongam de novembro a abril e os mais secos de maio a setembro, sendo o mês de outubro o de transição.

## Temperatura

A temperatura média anual varia de 20 a 27°C, sendo que a média das mínimas está entre 15 e 23°C e a média das máximas entre 26 e 32°C. A pressão atmosférica apresenta uma média anual da ordem de 1.015 hPa (hectopascal). Os maiores valores de pressão são registrados nos meses de junho a agosto, enquanto que os mais baixos ocorrem entre dezembro e março (SEMADS, 2001b apud SALAMENE, 2007).

## Evaporação

De acordo com os dados da estação de Ecologia Agrícola (LIGHT, 2007), a evaporação média anual é de 1352 mm, com máximo em agosto e mínimo em abril.

No verão a taxa de evaporação varia de 120-140 mm/mês, com uma redução no outono de 80-100 mm/mês, voltando a subir nas estações inverno-primavera cujos índices vão para 100-120 mm/mês. (ROSA, 1995).

## Umidade Relativa

Com base nos dados das normas climatológicas publicadas pelo INMET (LIGHT, 2007), a umidade relativa média mensal varia de 73 a 80%. Atinge valor máximo (88%) no período de maior pluviosidade (dezembro-março) e valor mínimo (65%) entre maio e setembro (SEMADS, 2001b apud SALAMENE, 2007).

## Ventos

Em virtude do relevo e da proximidade com o oceano, o vento apresenta, como primeira predominância, os quadrantes sul (S) e oeste-sudoeste (OSO) e como segunda predominância os quadrantes norte-nordeste (NNE) e leste-nordeste (ENE). Quanto à velocidade do vento, no período 1981/89, o percentual de calmas (19,4%), é consideravelmente inferior ao de ventos com velocidade na faixa de 1,5 a 5,0 m/s (67,7%) (SEMADS, 2001b apud SALAMENE, 2007).

## Insolação

A insolação total anual, isto é, o número de horas de brilho do sol, é aproximadamente de 2.280 horas, com valores mais elevados registrados no trimestre junho-agosto. Os valores mais baixos são encontrados no período setembro-dezembro. A média anual de nebulosidade é de 6/8 e os períodos de maior e menor nebulosidade são setembro-dezembro e maio-agosto, respectivamente (SALAMENE, 2007).

### 4.2.3. Vegetação

A Bacia Hidrográfica do rio Guandu, situada no domínio da Mata Atlântica, era coberta, principalmente, por Floresta Ombrófila Densa e Floresta Estacional Semidecidual. Devido ao desmatamento intenso na região para a expansão agropecuária e urbana, quase nada restou dessas formações. Os poucos remanescentes florestais encontrados estão localizados em Unidades de Conservação, como o Parque Nacional Serra da Bocaina e a Reserva Biológica do Tinguá. Além dessas formações, ocorrem na região restingas e mangues, que se encontram muito degradados por ações antrópicas (VELOSO & GÓES-FILHO, 1982 apud SALAMENE, 2007).

### Cobertura Vegetal – Área Estudada

A região estudada está inserida no domínio fitogeográfico da Mata Atlântica, sendo classificada como área de Floresta Ombrófila Densa. As matas remanescentes no domínio original de florestas atlânticas foram extensivamente derrubadas, dando lugar a atividades como pecuária, culturas agrícolas e reflorestamentos (LIGHT, 2007).

Provavelmente atividades como pecuária e culturas agrícolas já foram desenvolvidas na região. Porém a área estudada pertence ao Ministério da Guerra desde a década de 60, sendo destinada exclusivamente às atividades militares.

### 4.2.4. Solos

Segundo o mapeamento realizado pelo CPRM (2001), apresentado na Figura 4.6, a região estudada é caracterizada pela presença de solos Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico e solos Aluviais eutróficos.

Segundo a classificação vigente do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999) os solos constatados na sua classificação antiga tiveram suas classes atualizadas, apresentada no Quadro 4.1.

| Classificação Antiga       | Classificação Vigente      |
|----------------------------|----------------------------|
| Podzólico Vermelho-Amarelo | Argissolo Vermelho-Amarelo |
| Solos Aluviais             | Neossolo Flúvico           |

Quadro 4.1: Classificação vigente dos solos (Fonte: EMBRAPA, 1999).



## Argissolo Vermelho-Amarelo

São solos minerais, não hidromórficos, pouco profundos a profundos (50-200 cm), caracterizados pela presença de um horizonte B textural de coloração vermelho-amarelada. Normalmente possuem um horizonte A moderado, de cor clara, reflexo da perda de argila e materiais corantes para o horizonte B. O horizonte B geralmente apresenta acúmulo significativo de argila, acompanhado ou não de cerosidade. Quanto à textura, apresentam inúmeras variações: arenosa-média, arenosa-argilosa, média-argilosa ou mesmo textura argilosa no A e B. Dependendo do material de origem, podem apresentar cascalho ao longo do perfil. Quase sempre apresentam argila de atividade baixa (Tb). Ocorrem em áreas de relevo desde o suave ondulado até o forte. Estas variedades são extremamente suscetíveis a erosão hídrica, devido ao fato de que a água, ao percolar de forma relativamente fácil no horizonte superficial, encontrando logo abaixo um horizonte naturalmente adensado, tem sua velocidade de infiltração drasticamente diminuída. Há assim, uma rápida saturação dos poros no horizonte superficial, aumento da lâmina de água na superfície, com conseqüente aumento do escoamento superficial e dos riscos de erosão, normalmente nas áreas mais declivosas, onde estes solos ocorrem. Este fato é normalmente agravado pelo baixo índice de agregação no horizonte A, que apresentam.

### **4.2.5. Geologia**

#### Região Sudeste

Eventos termo-tectônicos e/ou tectono-magmáticos atuaram por processos geodinâmicos, que causaram retrabalhamento em rochas preexistentes, sendo que o último evento tectônico na área refere-se ao Brasileiro – Ciclo Orogênico neoproterozóico/cambriano (450-700 M.A. Milhões de anos), correspondendo à região e faixa de dobramento Sudeste (UFRRJ, 1987 apud ROSA,1995).

O embasamento da plataforma sul-americana, mais particularmente o escudo atlântico, está estruturado essencialmente sobre rochas metamórficas de fácies anfíbolito, granulito e granitóides de idade arqueana. Esta plataforma teve sua evolução e cratonização completadas no final do Proterozóico e início do Paleozóico. Os escudos estão constituídos de terras emersas durante as grandes invasões marinhas (UFRRJ, 1987 apud ROSA,1995).

O Pré-cambriano superior engloba as rochas que constituem o grupo da serra dos Órgãos que correspondem aos paragneisses de fácies geosinclinal. As rochas

desse grupo tiveram origem a partir da remobilização parcial do ciclo Brasileiro, cuja formação se deve ao grupo Paraíba do Sul, formado durante a evolução tectônica no ciclo Transamazônico. Posteriormente, os efeitos de um tectonismo com magnetismo básico e alcalino, houve a formação de bacias tectônicas costeiras e interiores.

## Região estudada

A região estudada é constituída essencialmente pelos terrenos gnáissico-migmatíticos e granitóides de idades pré-cambrianas pertencentes ao Complexo Paraíba do Sul. Suas rochas foram submetidas a metamorfismos diversos, em função de sucessivos ciclos tectono-termiais. Tais eventos, além de produzirem a metamorfização de rochas pré-existentes, foram responsáveis por falhamentos e dobramentos, gerando unidades geológicas ou litoestratigráficas diferentes. Os contatos entre esses conjuntos litológicos são de difícil separação, face à transição e interpenetração entre um tipo litológico e outro, em decorrência dos dobramentos ocorridos tanto nas rochas mais antigas do embasamento arqueano como nas rochas supracrustais do Proterozóico, que as colocaram lado a lado gerando um grande paralelismo entre elas.

As unidades litoestratigráficas ocorrentes nessa região, os maciços graníticos da unidade Batólito Serra das Araras e Rio Negro complementam a sequência dos depósitos aluvionares quaternários. Na Figura 4.7 é possível verificar a localização da área de destruição mapeamento geológico publicado pelo CPRM, 2001.

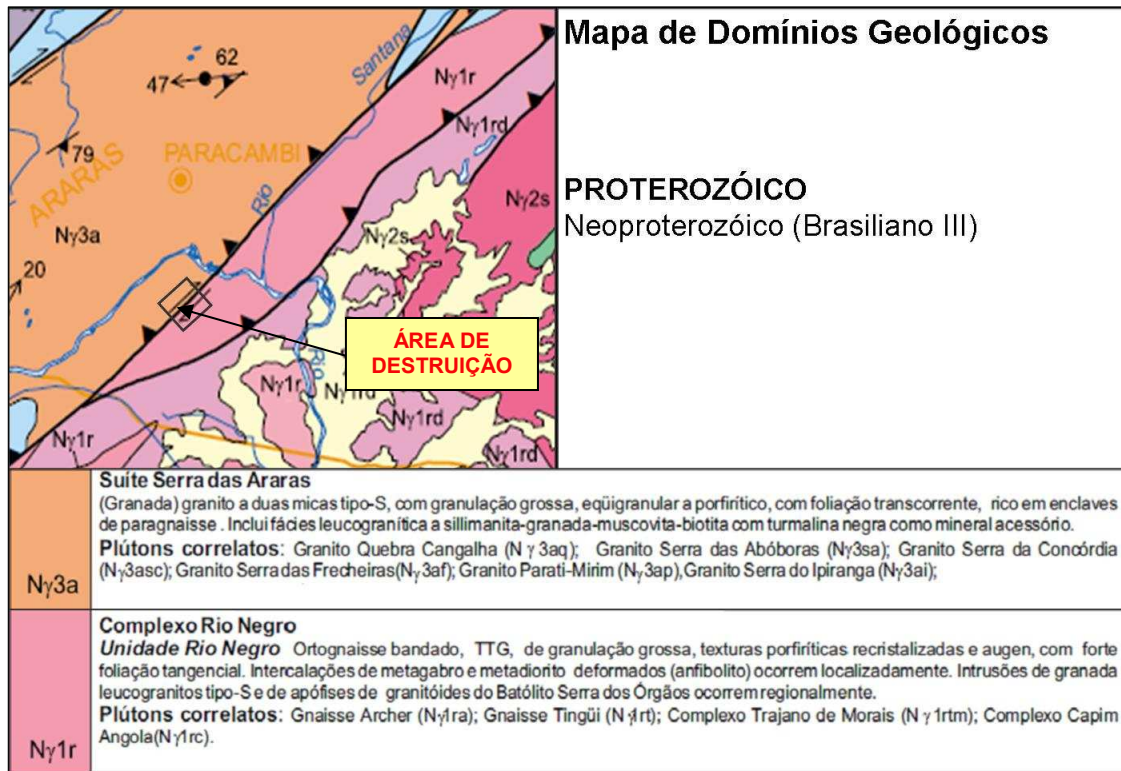


Figura 4.7: Mapa de domínios Geológicos (Fonte: CPRM, 2001)

A seguir são apresentadas as descrições sucintas das unidades supracitadas:

- Unidade Batólito Serra das Araras

Esta unidade é formada por um conjunto onde predominam rochas de composição granítica, incorporando também os migmatitos granatíferos a ele associado. Os processos cataclásticos ocorridos mudaram a textura original das rochas granitóides, transformando-as em granito-gnaisse. A granulação desse plutonito é, em geral, média com domínios ricos em granada e feldspato. Ocorrem xenólitos parcialmente assimilados. Em zonas fortemente cataclasadas assume aspecto bandado, transicionando para um migmatito onde o paleossoma é de rochas das Unidades Três Ilhas ou Itaocara. Em domínios ricos em granada, a rocha adquire um caráter de gnaisse kinzigítico.

- Unidade Rio Negro

A unidade Rio Negro constitui-se de migmatitos, em geral, estromático, com paleossoma de biotita-anfíbólio-gnaisse e neossoma granítico, associado à biotita gnaisse porfiroblástico e gnaisse granítico. A litologia mais comum é o gnaisse granítico. Os estromatitos são constantes e os gnaisses porfiroblásticos são encontrados ocasionalmente. O gnaisse granítico é constituído de feldspato rosado e branco, biotita e quartzo, de granulação média a fina com foliação irregular. Apresenta-

se em geral injetado por veios aplíticos e pegmatíticos. O biotita gnaisse porfiriblastico apresenta cristais centimétricos de microclina rosada, quartzo, biotita e muscovita.

#### - Sedimentos Quaternários

O material dos aluviões é representado por areias mais ou menos ricas em feldspato algo caulinizado, com níveis de cascalho e bancos e lentes de argila; situam-se ao longo dos vales dos cursos d'água e nos terraços, nas margens dos principais rios e córregos.

### **4.2.6. Geomorfologia**

#### Aspectos Geomorfológicos

A área está inserida no domínio morfoestrutural Faixas de Dobramentos Remobilizados, na região geomorfológica Escarpas e Reversos da Serra do Mar (RADAMBRASIL, 1983 apud LIGHT, 2007), compreendendo dois tipos distintos de modelados – unidades de relevo Morros Altos com Serras Restritas com acentuados desníveis altimétricos e Morros Baixos e Colinas com predomínio de morros em meias-laranjas e alvéolos intermontanos.

Pertence à unidade geomorfológica denominada de Escarpa da Serra de Paracambi, consiste num degrau de borda de planalto intensamente dissecado e recuado, apresentando cristas amorreadas. Está alçado por tectônica a mais de 500m de altitude, emoldurando o recôncavo da baixada de Sepetiba. A linha de cumeada do topo do escarpamento sustenta altitudes entre 500 e 600m nas serras de Paracambi (SILVA & CUNHA, 2001 apud PAIVA, 2009). As escarpas das serras de Paracambi apresentam alta vulnerabilidade à erosão e movimentos de massa, tanto pelo relevo acidentado submetido a um forte controle litoestrutural, quanto pelo desmatamento generalizado. A escarpa da Serra das Araras e de Paracambi são os trechos da Serra do Mar mais devastados do Estado do Rio de Janeiro. A região é cortada pela Estrada de Ferro Rio-São Paulo e pela Rodovia RJ-127. (SILVA & CUNHA, 2001 apud PAIVA, 2009).

Embutidos nessa morfologia se encontram ambientes de acumulação fluvial, localizados ao longo dos cursos d'água mais expressivos e nos terraços marginais, constituindo as Planícies Alúvio-Coluvionares.

Na Figura 4.8 é possível identificar as unidade de relevo presentes na região do DCMun: planície alúvio-coluvionar, morros e morrotes.





Figura 4.8: Vista do relevo da área de destruição do DCMun (Fonte: Google Earth, 2009)

## Unidades de Relevo

### - Morros Altos Com Serras Restritas

Nesta unidade localiza-se regiões com altitude entre 200 m e 600 m, relevo forte ondulado a montanhoso e declividades entre 30% e 60%.

Os solos derivados de rochas gnáissicas e migmatíticas são em geral pouco profundos, bastante dissecados por sulcos e vales de erosão que dão início à linhas de drenagem.

Os topos são arredondados, às vezes angulosos e alongados, constituindo cristas indiferenciadas. As vertentes são convexas, os vales alongados, com trechos retilíneos controlados por fraturas.

### - Morros Baixos e Colinas

Esta unidade engloba integralmente a região da mesma forma que a unidade anterior, apresenta cobertura vegetal originária de floresta tropical, quase que totalmente substituída por pastagens. Esse tipo de relevo apresenta concentrações de terracetes de pisoteio associados a sulcos erosivos, demonstrando tendências a erosão laminar e em sulcos. As colinas são curtas, rebaixadas, de topos arredondados e vertentes convexas e mais suaves que os morros.

#### - Planícies Alúvio-Coluvionares

Ocorrem ao longo dos principais cursos d'água como o ribeirão das Lajes e afluentes, formando manchas extensas e estreitas, relevo plano a suavemente ondulado. São constituídas de sedimentos quaternários aluvionares e coluvionares, compostos por cascalhos, areias, siltes e argilas, inconsolidados. São depósitos heterogêneos e totalmente selecionados pela ação das águas correntes.

A fração coluvionar dos depósitos tem sua origem a partir das partes mais altas, com maiores acumulações nas áreas de contato da planície com os morros e colinas circundantes.

### 4.3. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

O levantamento planialtimétrico do DCMun foi realizado em dezembro/2009 pela 5ª Divisão de Levantamento da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro.

A Figura 4.9 é uma superposição meramente ilustrativa (sem escala) das curvas de nível em uma imagem capturada no Google Earth. As curvas de nível do arquivo gerado no levantamento planialtimétrico não possuem atributos suficientes para serem inseridas na malha do Google Earth com precisão.

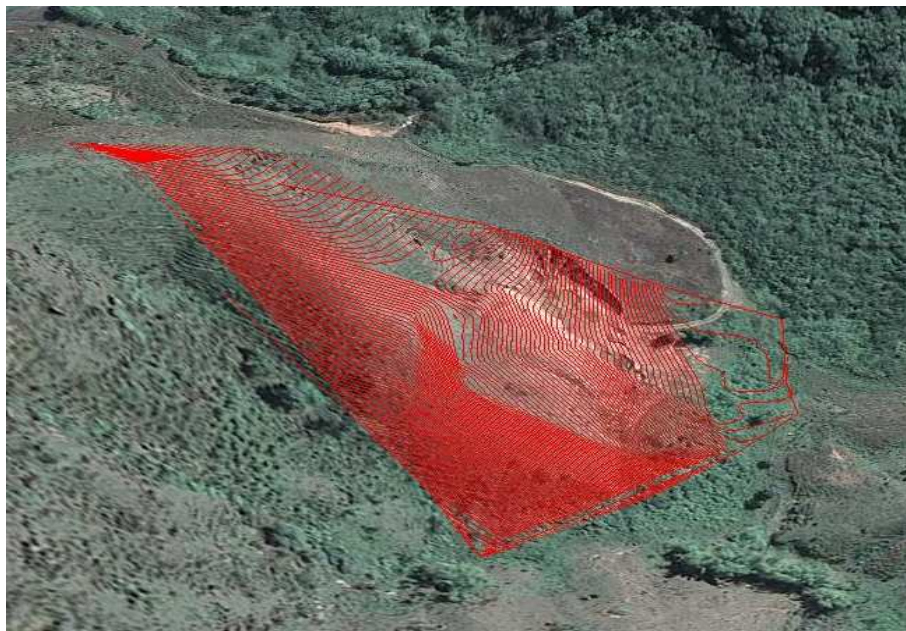


Figura 4.9: Superposição ilustrativa das curvas de nível na área de (Fonte:Google Earth, 2009).

A Figura 4.10 contempla a delimitação da área estudada e a locação dos pontos notáveis na área de destruição.



Figura 4.10: Levantamento Planialtimétrico da área de destruição do DCMun com a locação dos pontos de sondagem SPT, perfis do subsolo e áreas para Levantamento Geofísico.

## 4.4. ESTRATIGRAFIA

### 4.4.1. Coleta de Amostras

Foram realizadas duas campanhas de amostragem em Outubro/2009 e Abril/2010. A seleção dos pontos em ambas foi feita em caráter preliminar com base na inspeção visual. Foram identificados quatro tipos de solo apresentados na Figura 4.11.



Figura 4.11: Identificação visual de tipos de solo para amostragem (em 07/10/2009).

Dois estratos de solo residual jovem e saprolito, separando em lado esquerdo e lado direito da área de destruição (solos 1 e 2). Um solo sedimentar de várzea originalmente coberto por um lago e ladeando um córrego (solo 3). E um solo residual mais maduro (ou solo transportado) mais argiloso na parte alta do lado esquerdo (solo 4), localizado fora da área de destruição.

#### 4.4.1.1. 1ª Campanha de Amostragem de Solo

A 1ª campanha de amostragem foi realizada em duas etapas, sendo a primeira coleta em 07/10/2009 e a segunda em 15/10/2009. O Quadro 4.2 apresenta a correlação dos pontos de coleta com os tipos de solo identificados.

| Pontos de Coleta | Inspeção visual do solo   | Data     | Solo        |
|------------------|---|----------|-------------|
| 1                | Solo saprolítico – lado esquerdo da área de destruição  | 07/10/09 | Solo 1      |
| 2                | Solo solto no centro da área de destruição  | 07/10/09 | Solos 1 e 2 |
| 3                | Sedimento arenoso orgânico da planície de inundação do córrego a jusante da área de destruição                      | 07/10/09 | Solo 3      |
| 4                | Solo residual - lado direito da área de detonação   | 15/10/09 | Solo 2      |
| 5                | Sedimento argilo arenoso com matéria orgânica da área de planície junto ao córrego, a jusante da área de destruição | 15/10/09 | Solo 3      |

Quadro 4.2: Correlação dos pontos de coleta com os tipos de solo identificados.

Na primeira etapa (07/10/2009) foram coletadas amostras deformadas nos Solos 1,2 e 3 (pontos 1,2 e 3). Para o Solo 1 também foi coletado um bloco de 0,70 a 1,0 metros de profundidade em relação à superfície do talude no ponto. Na segunda etapa (15/10/2010) foram coletadas no total seis amostras indeformadas e cinco amostras deformadas nos Solos 2 e 3 (pontos 4 e 5) variando as profundidades. Todas as amostras foram identificadas conforme apresentado no Quadro 4.3.

| Pontos de Coleta | Solo        | Identificação | Tipo de amostras                          | Profundidade (m) |
|------------------|-------------|---------------|---|------------------|
| 1                | Solo 1      | AM01          | Deformada em saco plástico de polietileno | 0,7 a 1,0        |
|                  | Solo 1      | Bloco         | Bloco indeformado                         | 0,7 a 1,0        |
| 2                | Solos 1 e 2 | AM02          | Deformada em saco plástico de polietileno | Superfície       |
| 3                | Solo 3      | AM03          | Deformada em saco plástico de polietileno | 0,20 a 0,30      |
| 4                | Solo 2      | AM4A          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,20 a 0,30      |
|                  | Solo 2      | AM4B          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,20 a 0,30      |
|                  | Solo 2      | AM4A/B        | Deformada em saco plástico de polietileno | 0,20 a 0,30      |
|                  | Solo 2      | AM4C          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,45 a 0,55      |
|                  | Solo 2      | AM4D          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,45 a 0,55      |
|                  | Solo 2      | AM4C/D        | Deformada em saco plástico de             | 0,45 a 0,55      |
|                  | Solo 2      | AM4E          | Deformada em saco plástico de polietileno | 0,55 a 0,60      |
| 5                | Solo 3      | AM5S          | Deformada em saco plástico de polietileno | Superfície       |
|                  | Solo 3      | AM5A          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,25 a 0,35      |
|                  | Solo 3      | AM5B          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,25 a 0,35      |
|                  | Solo 3      | AM5A/B        | Deformada em saco plástico de polietileno | 0,25 a 0,35      |

Quadro 4.3: Identificação das amostras da 1ª Campanha de Coleta.

A Figura 4.12 mostra a coleta dos Solos 1 e 2 nos pontos 1 e 2. A coleta do Solo 2 nas proximidades do ponto 4 pode ser vista na Figura 4.13. A coleta do Solo 3 foi realizada nos pontos 3 e 5, a localização de ambos é apresentada na Figura 4.14.



Figura 4.12: Coleta de amostra no Ponto 1 (em 07/10/2009).



Figura 4.13: Vista frontal da área do Solo 2. Proximidade do ponto 4 (em 15/10/2009).

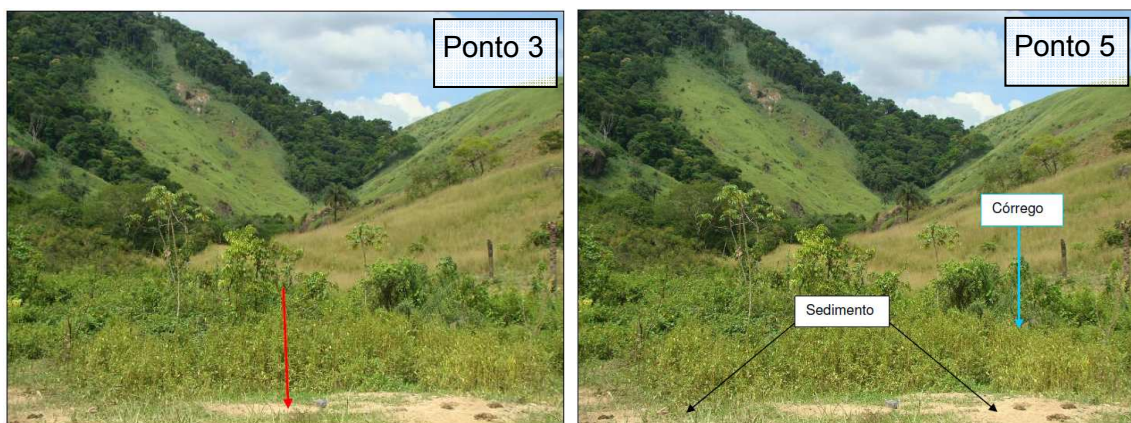


Figura 4.14: Localização da coleta de amostra nos Pontos 3 e 5 (realizadas os dias 7 e 15 de 10/2009 respectivamente).

As amostras deformadas e indeformadas foram coletadas de acordo com a NBR 9604, 1986 e CONAMA, 2009, considerando as especificidades dos metais pesados, para a realização das análises físicas, químicas e físico-químicas na Caracterização dos solos. A Figura 4.15, a Figura 4.16 e a Figura 4.17 apresentam algumas etapas dos procedimentos adotados.



Figura 4.15: Limpeza e retirada do material adjacente para liberar a amostra.



Figura 4.16: Regularização e colocação da amostra deformada em saco fechado.



Figura 4.17: Regularização e colocação do cilindro com amostra indeformada em saco fechado.

#### 4.4.1.2. 2ª Campanha de Amostragem de Solo

A 2ª campanha de amostragem foi realizada em 20/04/2010. Todas as amostras foram identificadas conforme apresentadas no Quadro 4.4. Com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados com as amostras da 1ª campanha, os solos 2 e 3 (pontos 4 e 5) foram priorizados para continuidade dos ensaios. O objetivo dessa amostragem foi coletar material suficiente para a realização de nova caracterização física, análises físico-químicas e mineralógicas e Ensaio de Batelada.

| Pontos de Coleta | Solo   | Identificação | Tipo de Amostras                          | Profundidade (m) |
|------------------|--------|---------------|---|------------------|
| 4                | Solo 2 | AM4F          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,45 a 0,55      |
|                  |        | AM4G          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,45 a 0,55      |
|                  |        | AM4H          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,45 a 0,55      |
|                  |        | AM4I          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,45 a 0,55      |
|                  |        | AM4J          | Deformada em saco plástico de polietileno | 0,55 a 0,60      |
| 15               | Solo 3 | AM5C          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,35 a 0,45      |
|                  |        | AM5D          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,35 a 0,45      |
|                  |        | AM5E          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,35 a 0,45      |
|                  |        | AM5F          | Indeformada em cilindro de latão          | 0,35 a 0,45      |
|                  |        | AM5G          | Deformada em saco plástico de polietileno | 0,45 a 0,50      |

Quadro 4.4: Identificação das amostras da 2ª Campanha de Coleta

A Figura 4.18 mostra a coleta de solo 2 no ponto 4. A coloração escura do solo 3 na profundidade da coleta, provavelmente devido à presença de matéria orgânica pode ser vista na Figura 4.19.



Figura 4.18: Coleta de amostras de Solo 2 no ponto 4





Figura 4.19: Coleta de amostras do Solo 3 no ponto 5.

#### 4.4.2. Caracterização Física

Os resultados dos ensaios de análise granulométrica, umidade e densidade real dos grãos estão resumidos na Destruição incompleta de materiais explosivos. e na Tabela 4.2, referentes à 1ª campanha de amostragem. No Anexo 1 estão apresentadas as curvas granulométricas.

##### 4.4.2.1. Amostras da 1ª Campanha

Tabela 4.1: Resumo dos resultados da determinação da Umidade e Gs.

| Pontos de Coleta | Solo  | Identificação | Profundidade (m) | Umidade natural (%) | Densidade Real (Gs) |
|------------------|-------|---------------|------------------|---------------------|---------------------|
| 1                | 1     | AM01          | 0,7 a 1,0        | 9,48                | 2,668               |
| 2                | 1 e 2 | AM02          | Superficies      | 12,55               | 2,656               |
| 3                | 3     | AM03          | 0,20 a 0,30      | 2,57                | 2,638               |
| 4                | 2     | AM4A/B        | 0,20 a 0,30      | 10,18               | 2,666               |

Tabela 4.2: Resumo dos resultados das Análises Granulométricas.

| Solo  | Identificação | Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) |       |       |       |        | Pedregulho |
|-------|---------------|---|-------|-------|-------|--------|------------|
|       |               | Argila                                      | Silte | Areia |       | Grossa |            |
|       |               |   |       | Fina  | Média |        |            |
| 1     | AM01          | 12  | 27    | 36    | 12    | 5      | 8          |
| 1 e 2 | AM02          | 8   | 23    | 19    | 22    | 17     | 11         |
| 3     | AM03          | 17  | 26    | 9     | 21    | 25     | 2          |
| 2     | AM4A/B        | 45  | 14    | 6     | 14    | 15     | 6          |

#### 4.4.2.2. Amostras da 2ª Campanha

Os resultados da 2ª campanha estão apresentados na Tabela 4.3, na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5. Nos Anexos 1 e 2 estão apresentadas as curvas granulométricas e os Limites de Atterberg respectivamente.

Tabela 4.3: Resumo dos resultados da determinação da Umidade Higroscópica e G<sub>s</sub>.

| Pontos de Coleta | Solo | Identificação | Profundidade (m) | Umidade Higroscópica (%) | Densidade Real (Gs) |
|------------------|------|---------------|------------------|--------------------------|---------------------|
| 4                | 2    | AM4J          | 0,55 a 0,60      | 1,697                    | 2,683               |
| 5                | 3    | AM5G          | 0,45 a 0,50      | 1,056                    | 2,473               |

Tabela 4.4: Resumo dos resultados das Análises Granulométricas.

| Solo | Identificação | Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) |       |       |       |        | Pedregulho |
|------|---------------|---|-------|-------|-------|--------|------------|
|      |               | Argila                                      | Silte | Areia |       | Grossa |            |
|      |               |   |       | Fina  | Média |        |            |
| 2    | AM4J          | 28  | 40    | 18    | 8     | 8      | 2          |
| 3    | AM5G          | 30  | 45    | 10    | 7     | 7      | 1          |

Tabela 4.5: Limites de Atterberg

| Solo | Identificação | w <sub>L</sub> | w <sub>P</sub> | I <sub>P</sub> |
|------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 2    | AM4J          | 72             | 33             | 39             |
| 3    | AM5G          | 55             | 22             | 33             |

Os índices da atividade de Skempton, obtido a partir da Equação 3., para a amostra AM4J foi 1,39, considerado de alta atividade e para a amostra AM5G foi 1,1, atividade moderada.

#### 4.4.2.3. Classificação do Solo

A classificação textural das amostras da 1ª campanha está apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Classificação Textural do solo.

| Solo | Identificação | Composição Granulométrica ( %) |       |       | Classificação Textural |
|------|---------------|--------------------------------|-------|-------|------------------------|
|      |               | Argila                         | Silte | Areia |                        |
| 1    | AM01          | 12                             | 27    | 61    | Franco-arenoso         |
| 2    | AM02          | 8                              | 23    | 69    | Franco-arenoso         |
| 3    | AM03          | 17                             | 26    | 57    | Franco-arenoso         |
| 2    | AM4A/B        | 45                             | 14    | 41    | Argiloso               |

As amostras coletadas na 2ª campanha foram classificadas segundo o SUCS com base nos resultados da Análise Granulométrica e Limites de Atterberg apresentados na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5 respectivamente. Constam no Anexo 3 as planilhas utilizadas na classificação, o resumo dos resultados está apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Classificação do solo

| Solo | Identificação | SUCS                              |
|------|---------------|-----------------------------------|
| 2    | AM4J          | CH – argila com alta plasticidade |
| 3    | AM5G          | CH – argila com alta plasticidade |

O solo 2 (0,20-0,30) na 1ª coleta apresentou 45% de argila e 35% de areia, foi classificada como argilosa e solo 3 (0,20-0,30) da mesma coleta apresentou 17% de argila e 55% de areia, classificada como franco-arenosa.

Na 2ª campanha foram realizadas análises granulométricas e limites de Atterberg. O solo 2 (0,55-0,60) apresentou 28% de argila, 40% de silte, 34% de areia,  $w_L = 72$  e  $w_P = 33$ , classificada pelo SUCS como CH- argila com alta plasticidade. O solo 3 (0,45-0,50) apresentou 30% de argila, 45% de silte, 24% de areia,  $w_L = 55$  e  $w_P = 22$ , também foi classificada como CH- argila com alta plasticidade

### 4.4.3. Análises Mineralógicas

Foi observado nos difratogramas apresentados na Figura 4.20 e na Figura 4.21, que a constituição mineralógica de ambas as amostras é semelhante, com exceção da goethita, que não é observada na amostra 05.

A Caulinita, aparentemente, é predominante nas duas amostras. Sua presença é evidenciada pelas reflexões mais bem formadas e de elevada intensidade, que desaparecem após o aquecimento da amostra a 550° C.

A mica ocorre de forma mais expressiva na amostra 05. Pelas características do alargamento da base das reflexões, em ambas as amostras, a mica se acha em estágio de degradação. O aquecimento a 550° C da amostra saturada com potássio, melhora a expressão das reflexões. O aumento da intensidade se deve também ao colapso dos outros argilominerais (vermiculita e interestratificado mica-vermiculita) presentes nas amostras.

Pequenas reflexões indicam a presença de vermiculita e interestratificado mica-vermiculita. Na amostra 05, a presença destes minerais é melhor evidenciada.

A gibbsita ocorre nas duas amostras. Sua presença é evidenciada por uma pequena reflexão, na região de 18,30° (2 $\theta$ ), que desaparece após o aquecimento a 350°C.

A presença de goethita na amostra 04, também é evidenciada por uma pequena reflexão, observada apenas na amostra total na região de ~21,40° (2 $\theta$ ), que desaparece após o tratamento da amostra por CBD.

Resumidamente as amostras são compostas por:

Amostra 04 - caulinita, mica, vermiculita, interestratificado mica-vermiculita, goethita e gibbsita;

Amostra 05 - caulinita, mica, vermiculita, interestratificado mica-vermiculita e gibbsita.

**Legenda das Figuras:**  
**Vm** – vermiculita      **Mi-Vm** – Interestratificado mica-vermiculita      **Mi**- mica;  
**Ct** – caulinita      **Gb** – Gibbsita      **Gt** – goethita.

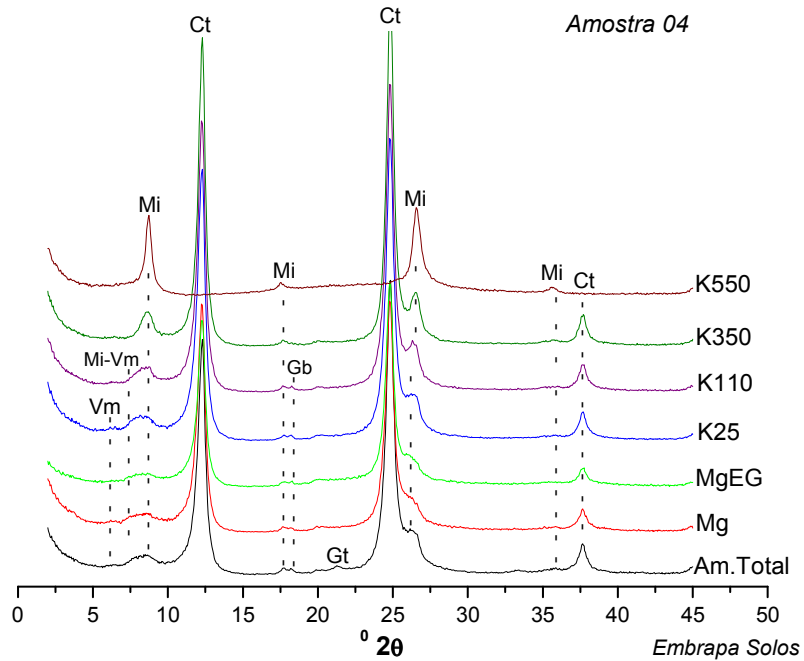


Figura 4.20: Difratoograma – Amostra 4

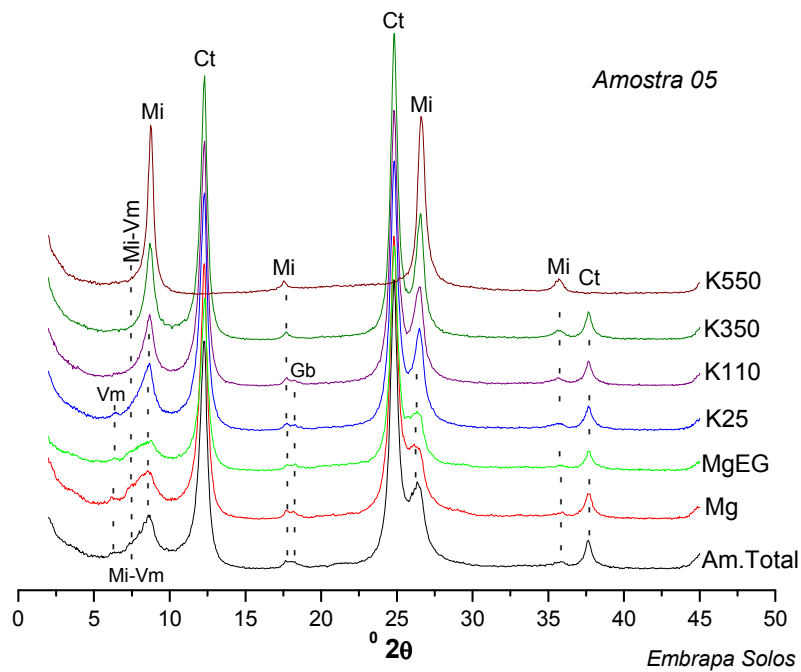


Figura 4.21: Difratoograma – Amostra 5

#### 4.4.4. Análises Físico-Químicas

Tabela 4.8: Resultados das Análises Físico-Químicas

| Amostra | pH               |        | C <sub>orgânico</sub><br>(g/kg) | CÁTIONS TROCÁVEIS (cmol <sub>c</sub> /kg) |                  |                 |                |         |                  |                |         |
|---------|------------------|--------|---------------------------------|---|------------------|-----------------|----------------|---------|------------------|----------------|---------|
|         | H <sub>2</sub> O | KCl 1M |                                 | Ca <sup>2+</sup>                          | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Valor S | Al <sup>3+</sup> | H <sup>+</sup> | Valor T |
| AM4J    | 5,23             | 4,04   | 5,60                            | 1,8                                       | 0,0              | 0,28            | 0,39           | 2,5     | 0,90             | 16,8           | 20,2    |
| AM5G    | 4,50             | 3,78   | 60,9                            | 1,3                                       | 1,9              | 0,92            | 0,43           | 4,6     | 1,58             | 26,8           | 32,9    |

Os valores obtidos para pH em água são considerados fortemente ácidos. A variação entre o pH em água e em KCl ( $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) para o solo 2 é -1,19 e para o solo 3 é -0,72. O resultado negativo indica retenção de cátions, já no caso do solo 3, o valor está próximo de Zero, o que significa que as cargas superficiais estão em equilíbrio.

O pH ácido favorece a dessorção de alguns metais permitindo que os contaminantes presentes fiquem mais disponíveis devido a diminuição da adsorção desses elementos no solo.

O teor de matéria orgânica da AM4J é de 0,56% e da amostra AM5G é de 6,09%. O solo 3 é um sedimento arenoso orgânico da planície de inundação do córrego a jusante da área de destruição.

A CTC de um solo também é dependente da presença de matéria orgânica. Valores de CTC da matéria orgânica variam de 400 a mais de 600  $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ . Essas variações ainda dependem do tipo de material orgânico presente no solo. (McBRIDE, 1989).

Quanto a CTC do solo 2 (amostra AM4J) podemos dizer que o H<sup>+</sup> representa 83% dos cátions trocáveis seguido do Ca<sup>2+</sup>. No solo 3 (amostra AM5G) o H<sup>+</sup> representa 82% dos cátions trocáveis seguido do Mg<sup>2+</sup>. A acidez trocável (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>) destas amostras é considerada alta. Não houve correção de valores em função da MO.

Partículas menores (fração argila, f<2mm) apresentam um uma área superficial maior, logo solos mais argilosos apresentam maior CTC do que solos arenosos. Os resultados obtidos na análise mineralógica revelam que o solo 3 (amostra AM5G) tem mais finos que o solo 2, verifica-se coerência nos valores de CTC mediante esses parâmetros.

A caulinita apresenta CTC baixa, na faixa de 5-10  $\text{cmol}_e/\text{kg}$ . A mica e a vermiculita na faixa de 10-50, 100-150  $\text{cmol}_e/\text{kg}$  respectivamente. Os óxidos de Fe (gohetita) e de Al (gibbisita) apresentam menores que a caulinita, 2-5  $\text{cmol}_e/\text{kg}$ .

O solo 2 apresentou CTC 20, 2  $\text{cmol}_e/\text{kg}$  e o solo 3, 32,9  $\text{cmol}_e/\text{kg}$ . Ambas bem superiores ao da caulinita, o argilo mineral predominante em ambos os solos. Porém esse valor não foi corrigido em função da presença de MO que no solo 3 por exemplo é significativa. Descontando essa parcela a CTC fica bem menor, possivelmente se aproximando da CTC da caulinita. Valores de CTC da MO variam de 400 a 600  $\text{cmol}_e/\text{kg}$ .

A presença de MO e os óxidos de Fe e Al contribuem para possível retenção de metais em ambos os solos, mas evidentemente no solo 3 devido a taxa de MO.

#### **4.4.5. Sondagem à Percussão**

Os 5 pontos de sondagem foram locados conforme apresentados na Figura 4.10. A Figura 4.22 mostra a execução do furo SP06. Foram definidos perfis longitudinais do local a partir das SPT realizadas.

Inicialmente foram previstos furos de sondagem na zona central da área de destruição, contudo era significativa a quantidade de munições que não foram detonadas corretamente. A Figura 4.23 mostra restos de explosivos expostos após um período de fortes chuvas. Detalhe de restos de munições não detonadas pode ser visto na Figura 4.24.



Figura 4.22: Execução do furo SP06-sondagem à percussão.



Figura 4.23: Restos de explosivos parcialmente destruídos





Figura 4.24: Munições não detonadas que permaneceram na área de destruição (Fonte: BRUM, 2010)

Para minimizar qualquer possibilidade de acidentes foi previsto para região central da área de destruição método de investigação indireta, o Levantamento Geofísico.

O perfil A-A' configura um corte na área de destruição, de jusante SP-05 (cota 47,50) à montante SP-04A (cota 68,25) apresentado na Figura 4.25. O furo 5 foi executado na região no Solo 3 (pontos 3 e 5) e o furo 4A nas proximidades do Solo 1, região acima da área de destruição. Na Tabela 4.9 (SP-04A) e Tabela 4.11 (SP-05) são descritas as camadas dos solos, com o tipo de material e a profundidade que ocorre a mudança de camada até o impenetrável.

O perfil B-B' mostra um corte transversal na região à montante da área de destruição SP-04A (cota 68,25) – SP-04 (cota 69,46) conforme Figura 4.26. A SP-04 foi realizada na parte alta da região identificada como Solo 2. Na Tabela 4.12 (SP-04) são descritas as camadas de solo.

O perfil C-C' mostra um corte transversal na região à jusante da área de destruição SP-03 (cota 48,56) – SP-05 (cota 47,50) - SP-06 (cota 46,84) conforme figura 4.11. Este perfil é representativo do solo identificado como Solo 3. Na Tabela 4.10 (SP-03) e na Tabela 4.9 (SP-06) são descritas as camadas de solo.

No Anexo 9 estão apresentados os boletins de sondagem fornecidos pela SONDOSOLO.

Tabela 4.10: Identificação do solo numerado no perfil da SP-03

| SP-03 |           |  |
|-------|-----------|--|
| Nº    | Prof. (m) | Solo   |
| 1     | 0,00-0,20 | Argila siltosa com areia média a fina, detritos.           |
| 2     | 0,25-2,00 | Argila siltosa com pouca areia, cor amarelada.             |
| 3     | 2,00-4,61 | Argila siltosa com pouca areia, cor amarelada a variegada. |
| 4     | 4,61-7,85 | Silte com areia fina, micáceo de cor variegada.            |
|       | 7,85      | Limite da sondagem<br>SOLO RESIDUAL                        |
|       |           | N.A. – 0,90 m  |

Tabela 4.9: Identificação do solo numerado no perfil da SP-04A

| SP-04A |           |   |
|--------|-----------|---|
| Nº     | Prof. (m) | Solo  |
| 1      | 0,00-0,25 | Argila siltosa com areia média fina, detritos vegetais de cor amarronzada.  |
| 2      | 0,25-0,92 | Argila siltosa com areia média a fina, pedregulhos médios de cor amarelada. |
| 3      | 0,92-1,79 | Silte argiloso com pouca areia fina, micáceo de cor amarelada.              |
| 4      | 1,79-5,37 | Silte argiloso com areia fina, micáceo de cor variegada.                    |
|        | 5,37      | Limite da sondagem<br>SOLO RESIDUAL   |
|        |           | N.A. – não detectado  |

Tabela 4.12: Identificação do solo numerado no perfil da SP-04.

| SP-04 |           |  |
|-------|-----------|--|
| Nº    | Prof. (m) | Solo   |
| 1     | 0,00-0,20 | Argila siltosa com areia fina, detritos vegetais de cor amarronzada.         |
| 2     | 0,20-1,23 | Argila siltosa com areia média a fina com pedregulhos médios, cor amarelada. |
| 3     | 1,23-1,80 | Silte arenoso pouco argiloso de cor amarelada.                               |
| 4     | 1,80-5,45 | Areia siltosa micácea de cor variegada.                                      |
|       | 5,45      | Limite da sondagem<br>SOLO RESIDUAL  |
|       |           | N.A. – não detectado   |

Tabela 4.11: Identificação do solo numerado no perfil da SP-05

| SP-05 |           |  |
|-------|-----------|--|
| Nº    | Prof. (m) | Solo   |
| (*)   | 0,00-0,07 | Camada vegetal.  |
| 1     | 0,07-0,28 | Argila siltosa com areia, cor cinza.                             |
| 2     | 0,28-0,77 | Areia média a fina, muito argilosa, cor cinza.                   |
| 3     | 0,77-3,97 | Argila siltosa com areia média a fina, cor variegada.            |
| 4     | 3,97-7,67 | Silte argiloso com areia média a fina, micáceo de cor variegada. |
| 5     | 7,67      | Limite da sondagem<br>SOLO RESIDUAL                              |
|       |           | N.A. – profundidade 0,10 m                                       |

Tabela 4.13: Identificação do solo numerado no perfil da SP-06

| SP-06                      |              |   |
|----------------------------|--------------|---|
| Nº                         | Prof.<br>(m) | Solo  |
| (*)                        | 0,00-0,05    | Camada vegetal.   |
| (*)                        | 0,05-0,10    | Camada de turfa.  |
| 1                          | 0,10-0,53    | Aterro areno siltoso com pedregulhos médios.                                |
| 2                          | 0,53-2,65    | Argila siltosa com pouca areia fina, micácea de cor variegada.              |
| 3                          | 2,65-4,00    | Silte argiloso com areia média a fina, micáceo de cor variegada.            |
| 4                          | 4,00-4,50    | Argila silto arenosa de cor cinza.  |
| 5                          | 4,50-5,91    | Areia média a fina, argilosa de cor cinza.                                  |
| 6                          | 5,91-12,65   | Silte com pouca areia fina, micáceo, de cor cinza a variegada.              |
| 7                          | 12,65-15,21  | Silte arenoso, micáceo, de cor variegada amarelada a cinza, muito compacto. |
|                            | 15,21        | Limite da sondagem<br>SOLO RESIDUAL   |
| N.A. – profundidade 0,30 m |              |   |

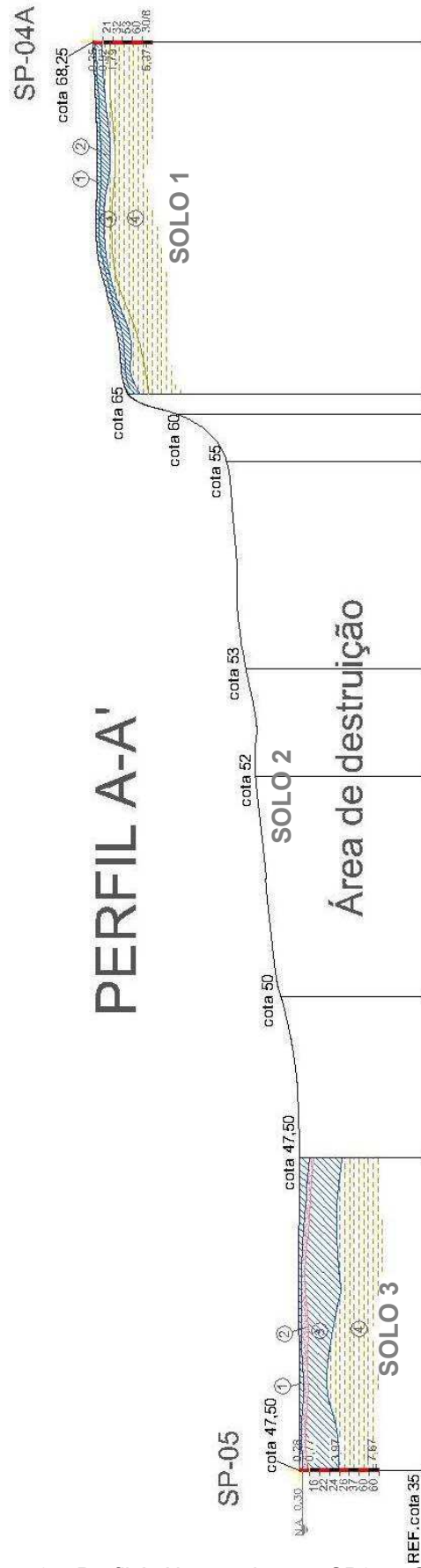


Figura 4.25: Perfil A-A' – sondagens SP05 – SP04A.  
 (\*) – Camada imperceptível na escala da figura.

# PERFIL B-B'

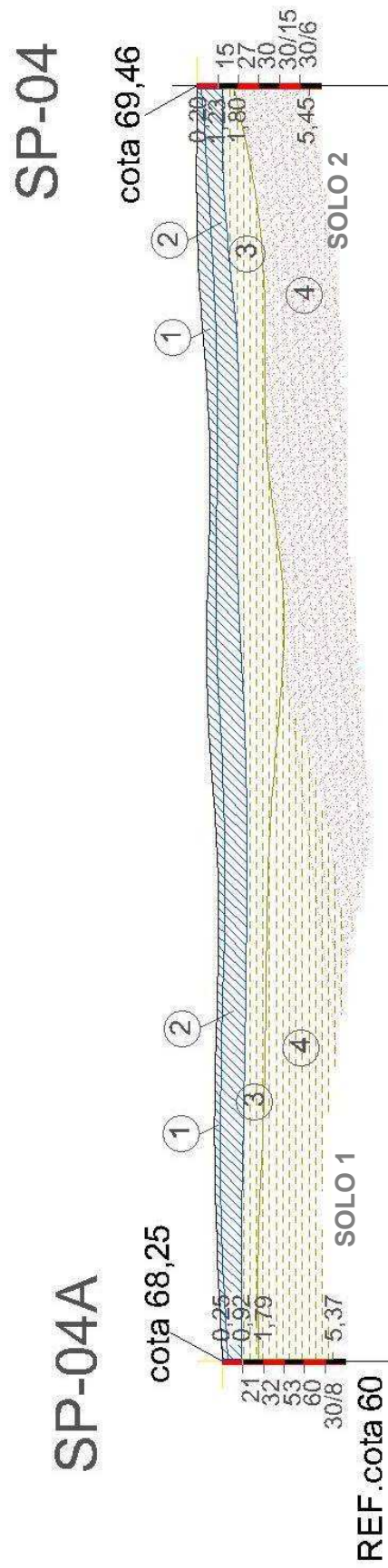


Figura 4.26: Perfil B-B' – sondagens SP04A – SP04.

# PERFIL C-C'

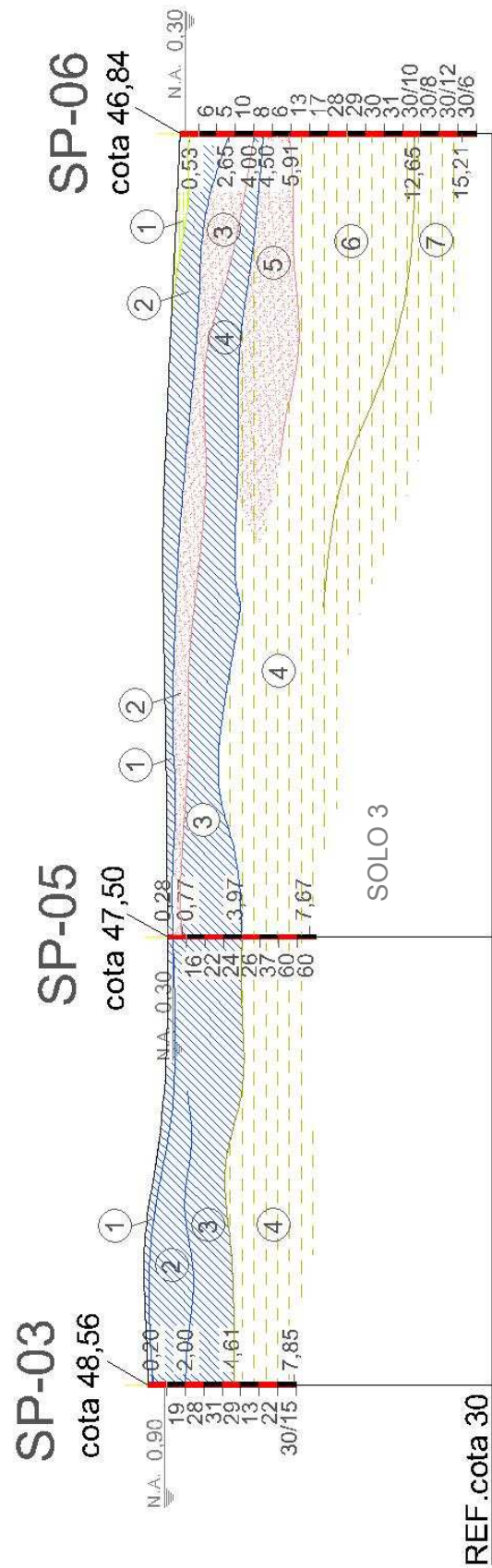


Figura 4.27: Perfil C-C' – sondagens SP03 - SP05 – SP06.  
 (\*) – Camada imperceptível na escala da figura.

## 4.5. IDENTIFICAÇÃO DAS ROTAS DE FLUXO SUPERFICIAL E SUBSUPERFICIAL

O levantamento planialtimétrico demarcou a área de interesse e as elevações do relevo local. A área de destruição foi implantada no sopé de um morrote, hoje bem degradado.

As sucessivas explosões aceleram o processo erosivo natural. A continuidade das atividades de destruição desestabiliza a base do morrote ocasionando desmoronamentos. Devido à alta pluviosidade do local, a erosão hídrica é o principal agente transportador do material desagregado pelas explosões. Ocorreram fortes chuvas em todo o Estado do Rio de Janeiro no período que antecedeu a 2ª campanha de amostragem em Abril/2010. A Figura 4.28 mostra a área após essas chuvas.



Figura 4.28: Vista frontal da área de destruição após a ocorrência de fortes chuvas

Na região central da área destruição verificamos um afloramento de lençol que segundo informações é permanente conforme Figura 4.29. O nível d'água se apresentou próximo da superfície na região mais plana. A montante, na parte mais alta, não foi detectado nível d'água nos furos de sondagem SP-04 e SP04A. Os perfis longitudinais (Figura 4.25, Figura 4.26 e Figura 4.27) produzidos a partir das sondagens à percussão revelaram uma camada argilosa seguida de uma camada arenosa. A espessura da camada argilosa varia de 0,92 – 4,00 m, horizonte de interesse para o estudo. As setas na Figura 4.29 mostram aproximadamente a mudança de camada indicando uma rota de fluxo favorável para o escoamento subsuperficial.



Figura 4.29: Afloramento do NA no centro da área de destruição.

A jusante localizamos um corpo hídrico, provavelmente o receptor da maior parcela do escoamento superficial da área de destruição. Na Figura 4.30 pode ser observado o curso aproximado desse receptor.

Figura 4.30: Localização aproximada do corpo hídrico receptor (Fonte:Google Earth, 2010).



Este canal é um tributário direto do Rio Valão de Areia, que por sua vez drena para o Rio Ribeirão das Lages, um dos formadores do Rio Guandu, percorrendo uma distância em torno de 4,2 Km conforme Figura 4.31.





Figura 4.31: Visão macro do curso do corpo hídrico até o Rio Ribeirão das Lages. (Fonte: Google Earth, 2010).

## 5. ANÁLISE DA CONTAMINAÇÃO

### 5.1. IDENTIFICAÇÃO DOS CONTAMINANTES EM POTENCIAL

As principais técnicas utilizadas pelo EB na destruição de munições e explosivos são a queima e a detonação a céu aberto executadas diretamente no solo. A explosão libera para a atmosfera gases e particulados. Esse resíduo ao se depositar sobre o solo se associa aos elementos já existentes no meio

Além dos compostos reativos que formam as munições e explosivos, a destruição envolve também as peças que encapsulam essas substâncias explosivas como as bases, copos, estojos e projéteis. Frequentemente muitas peças ficam parcialmente destruídas, enterradas no local e/ou no entorno da área de destruição conforme a Figura 4.23 e a Figura 4.24, liberando substâncias tóxicas lentamente para o meio.

São apresentados na Quadro 2.3 os potenciais contaminantes provenientes da destruição das munições e explosivos citados na área de destruição da unidade militar DCMun. Com base nessas informações investigamos os elementos: Cr, Mn, Fe, Ni,

Zn, Cd, Sb, Ba, Cu e Pb, priorizando as análises com Cu e Pb, validando os resultados obtidos em estudos realizados anteriormente.

## 5.2. RESULTADOS DOS ESTUDOS ANTERIORES

### 5.2.1.1. Estudos da PUC-Rio

No relatório foram apresentadas as conclusões: a área de destruição de munição localizada na Unidade do Exército em Paracambi não apresenta contaminação para o composto TNT (trinitolueno) e não foi observada transferência de contaminantes da área para o rio Ribeirão das Lages (PUC-RJ, 2008).

### 5.2.1.2. Estudos da UFRRJ

A Figura 5.1 Figura 5. mostra onde foram locados os pontos de amostragem. A Figura 5.2 apresenta uma correlação aproximada dos pontos com uma imagem da área de destruição capturada do Google Earth em 2010.

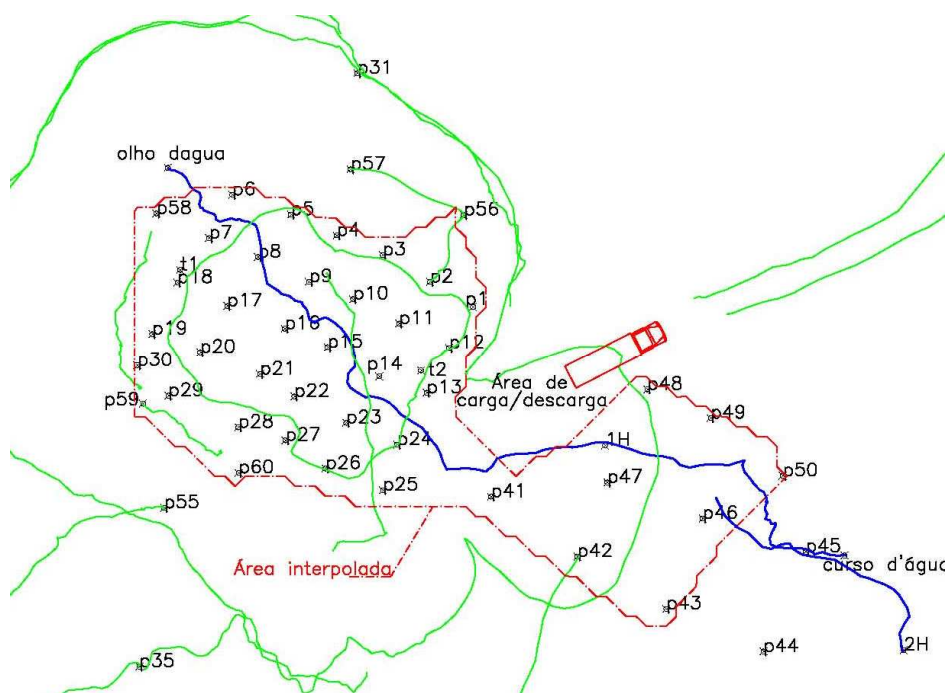


Figura 5.1: Área de estudo com grade de amostragem de solo para análise geoestatística (Fonte: AMARAL SOBRINHO, 2008).

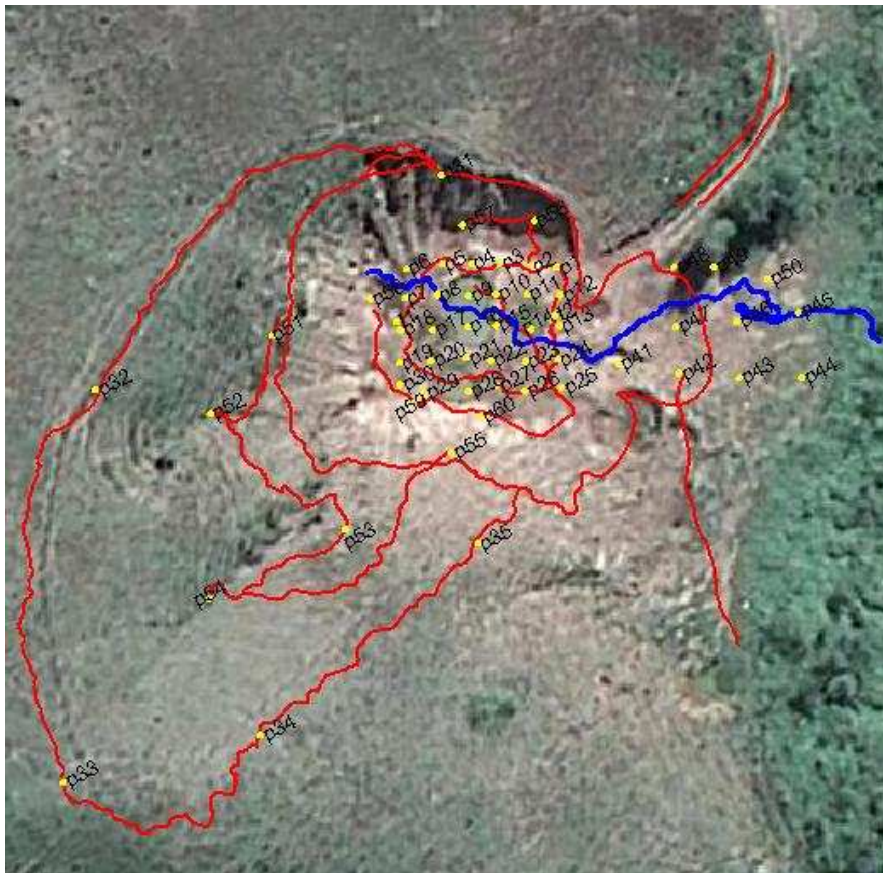


Figura 5.2: Correlação dos pontos de amostragem realizados em 2008 com a área de destruição (Fonte:Google Earth-set/2009).

Para os valores de Intervenção, indicados na Figura 4.2: Vista da área de destruição no DCMun (Fonte: Google Earth, 2009)., adotaram o cenário de área Agrícola e/ou Área de Proteção Máxima propostos pela CETESB, em decorrência da drenagem da área apresentar uma associação íntima com o Ribeirão das Lages.

A Tabela 5.2 apresenta o resumo percentual dos resultados das análises realizadas para Chumbo e Cobre em todas as amostras coletadas. Segundo o Art. 12 da proposta para Valores Orientadores do CONAMA após a etapa de diagnóstico a área será considerada como:

**Área Limpa:** quando estiver dentro dos parâmetros dos valores de Referência de Qualidade do solo e abaixo do valor de prevenção.

**Área de Alerta:** quando for constatada a concentração de contaminantes acima dos valores de Prevenção e abaixo do valor de Intervenção.

**Área Contaminada,** quando for constatada concentração de contaminantes acima dos valores de Intervenção.

Tabela 5.1: Valores Orientadores para solo (mgkg<sup>-1</sup>)

| Metal    | Referência | Prevenção | Intervenção |             |            |
|----------|------------|-----------|-------------|-------------|------------|
|          |            |           | Agrícola    | Residencial | Industrial |
| Chumbo   | 17         | 72        | 180         | 300         | 900        |
| Cobre    | 35         | 60        | 200         | 400         | 600        |
| Cádmio   | 0,5        | 1,3       | 3,0         | 8,0         | 20,0       |
| Cromo    | 40         | 75        | 150         | 300         | 400        |
| Ferro    | -          | -         | -           | -           | -          |
| Manganês | -          | -         | -           | -           | -          |
| Níquel   | 13         | 30        | 70          | 100         | 130        |
| Zinco    | 60         | 300       | 450         | 1000        | 2000       |

Fonte: CETESB, 2005 AMARAL SOBRINHO, 2008.

Tabela 5.2: Resumo das análises dos metais **Chumbo e Cobre** no solo

| Valores de Referência (mgkg <sup>-1</sup> ) | Referência Espacial       |           |                         |           |                        |           |
|---|---------------------------|-----------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|   | Área de destruição P1-P30 |           | Área à Montante P56-P60 |           | Área à Jusante P41-P50 |           |
|   | Chumbo (%)                | Cobre (%) | Chumbo (%)              | Cobre (%) | Chumbo (%)             | Cobre (%) |
| < Prevenção                                 | 14                        | 33        | 38                      | 50        | 60                     | 76        |
| > Prevenção<br>< Intervenção                | 49                        | 67        | 42                      | 50        | 38                     | 2         |
| > Intervenção                               | 37                        | -         | 20                      | -         | 2                      | -         |

Fonte: AMARAL SOBRINHO, 2008.

Considerando esses resultados, a investigação efetuada pela UFRRJ concluiu que a área de destruição de munição encontrava-se com contaminação elevada de Chumbo e média de Cobre e Cádmio na região central da área de destruição. Na presente pesquisa os metais Pb e Cu foram priorizados.

A análise geoestatística da área foi realizada apenas para os metais que apresentaram as concentrações mais elevadas. Os dados de concentração dos metais nas camadas de solo foram classificados e representados nos mapas de variabilidade espacial como: Área Limpa em verde, Área de Alerta em azul e Área Contaminada em vermelho.

A Figura 5.3 e a Figura 5.4 mostram os mapas de variabilidade para o Chumbo e Cobre respectivamente, referentes à área interpolada indicada na Figura 5.1. Dentre os metais pesados, somente o Chumbo apresentou áreas com classe denominada contaminada.

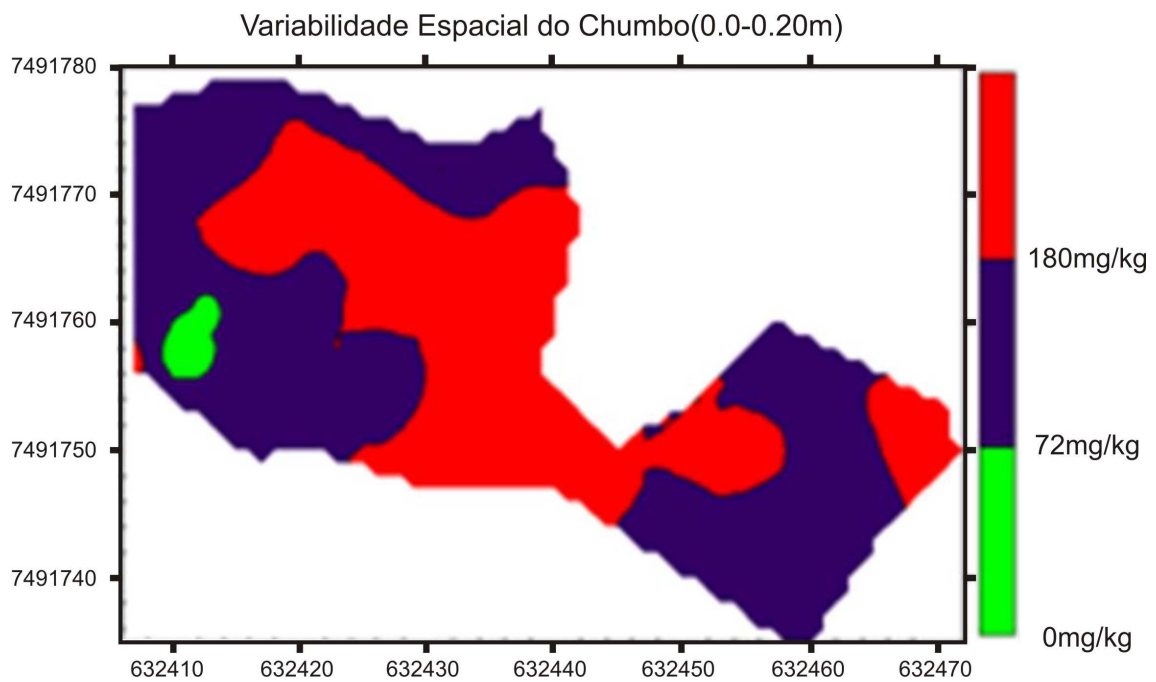


Figura 5.3: Mapa de variabilidade espacial da concentração de Chumbo na área de destruição (Fonte:AMARAL SOBRINHO, 2008).

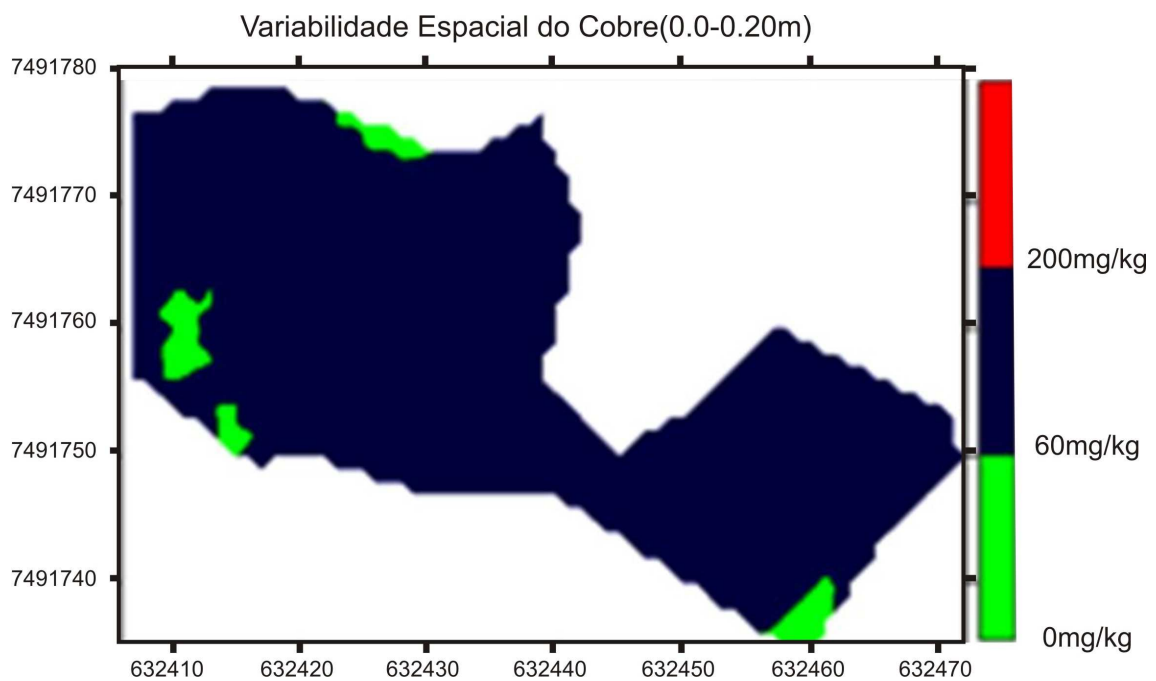


Figura 5.4: Mapa de variabilidade espacial da concentração de Cobre na área de destruição (Fonte:AMARAL SOBRINHO, 2008).

### 5.3. RESULTADOS DO LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

A Figura 5.5 mostra a localização dos CE na área de destruição e seu entorno. A área 1 foi dividida em 5 seções com 100 m lineares cada uma, a área 2 em 3 seções com 50 m lineares cada uma e a área 3 em 3 seções com 40 m lineares cada uma. A aquisição de dados ocorreu a partir do avanço lateral de todo o arranjo de eletrodos ao longo das seções nos sentidos indicados pelas setas exibidas na Figura 5.5.

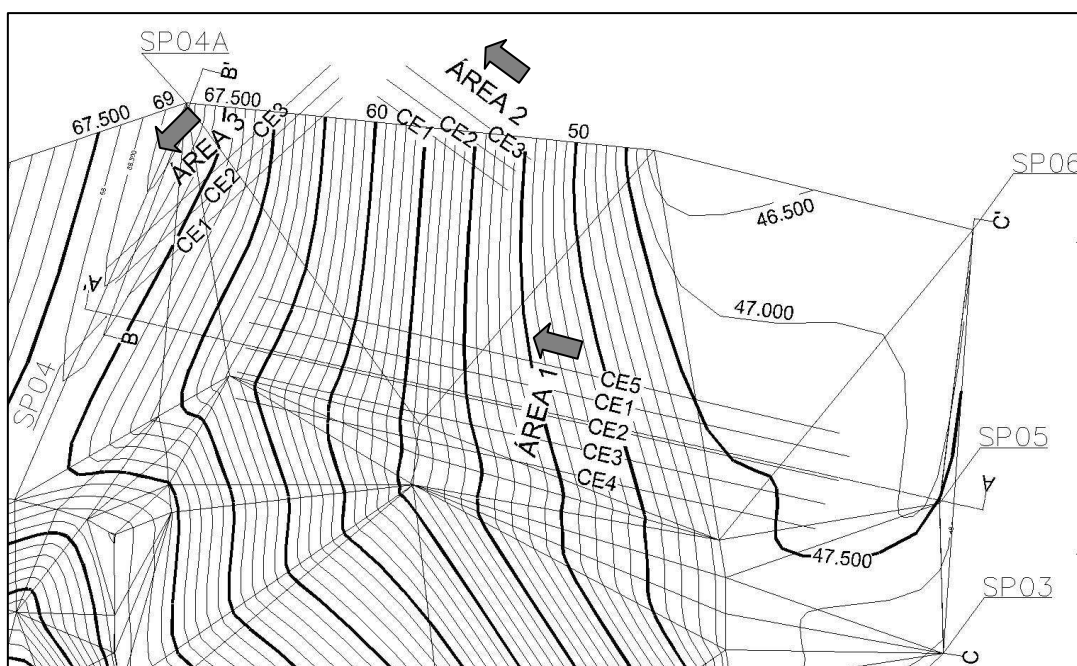


Figura 5.5: Localização dos Caminhamentos Elétricos na área de destruição

Com base nos dados obtidos foram elaboradas as curvas de isorresistividade das áreas apresentadas na Figura 5.16, na Figura 5.17 e na Figura 5.18.

#### Interpretação dos dados obtidos

##### ÁREA 1

A Figura 5.6 mostra a disposição dos Caminhamentos Elétricos (CE) da Área 1 (A1) em uma imagem que exibe a área de destruição vista da cota mais alta.

A associação das resistividades obtidas mostrou-se coerente, descrevendo características do ambiente com concentração de resistividades muito baixas (1 – 15 ohm.m) na profundidade de 0,5 a 1,0m.



Figura 5.6: Lay-out das Seções (Caminhamentos Elétricos) da ÁREA 1.

A seção CE-1 da A1 apresentou uma anomalia na faixa de 30 a 70 metros da origem do levantamento geofísico. As resistividades muito baixas (1-15 ohm.m) foram detectadas no intervalo de 0,5 a 1,0 metro de profundidade. Também ocorreram variações de 15 a 40 ohm.m caracterizando resistividades baixas possivelmente relacionadas a concentrações menores de substâncias condutivas. Nesta mesma seção, há 100m da origem do levantamento geofísico (final do CE) foi observada a ocorrência de resistividades muito baixas no intervalo de 0,5 a 3,0m de profundidade. Esta discrepância ocorreu possivelmente devido a interferência proveniente da presença de substâncias condutivas intercaladas entre sedimentos e blocos de rocha, e por ser um local com fluxo de água superficial que favorece o comportamento decrescente das isolinhas resistivimétricas.

Na CE-2 da A1 a área anômala apresentou um comportamento parecido com a da CE-1 na faixa de 40 a 80 m da origem. As resistividades muito baixas (1-15 ohm.m) foram encontradas no intervalo de 0,5 a 1,0 m de profundidade. Também houve a ocorrência de resistividades que variaram de 15 a 40 ohm.m possivelmente relacionadas a concentrações menores de substâncias condutivas.

Na CE-3 da A1a área anômala tem comportamento similar à área anômala da CE-2.



Figura 5.7: Leitura na seção CE-2 da ÁREA 1, região central da área de destruição.



Figura 5.8: Leitura na seção CE-2 da ÁREA 1 à jusante da área de destruição.



Na CE-4 as resistividades muito baixas (1-15 ohm.m) foram encontradas a 0,5 m de profundidade. Porém detectou-se forte influência do meio condutivo com resistividades de 30 a 40 ohm.m em profundidades que variam de 0,5 a 3,0 metros a partir de 20 metros da origem do levantamento



Figura 5.9: Seção CE-5 da ÁREA 1.

Na CE-5 foram detectadas resistividades muito baixas (1-15 ohm.m) na faixa de 0,5 a 1,0 m. O comportamento das isolinhas resistivimétricas se assemelhou ao da CE-4, onde as resistividades baixas de 30 a 40 ohm.m foram evidentes no intervalo de 0,5 a 3,0m de profundidade. A Figura 5.9 mostra a colocação dos eletrodos durante a leitura na CE-5.

## ÁREA 2

A associação das resistividades obtidas na Área 2, descreveu características de ambiente com concentração de resistividades altas (60 a 300 ohm.m) nos níveis que variam de 1,0 a 3,0m. Foram registradas ocorrências de resistividades baixas (20 a 50 ohm.m) em profundidades de 0,5 a 1,0 metro.

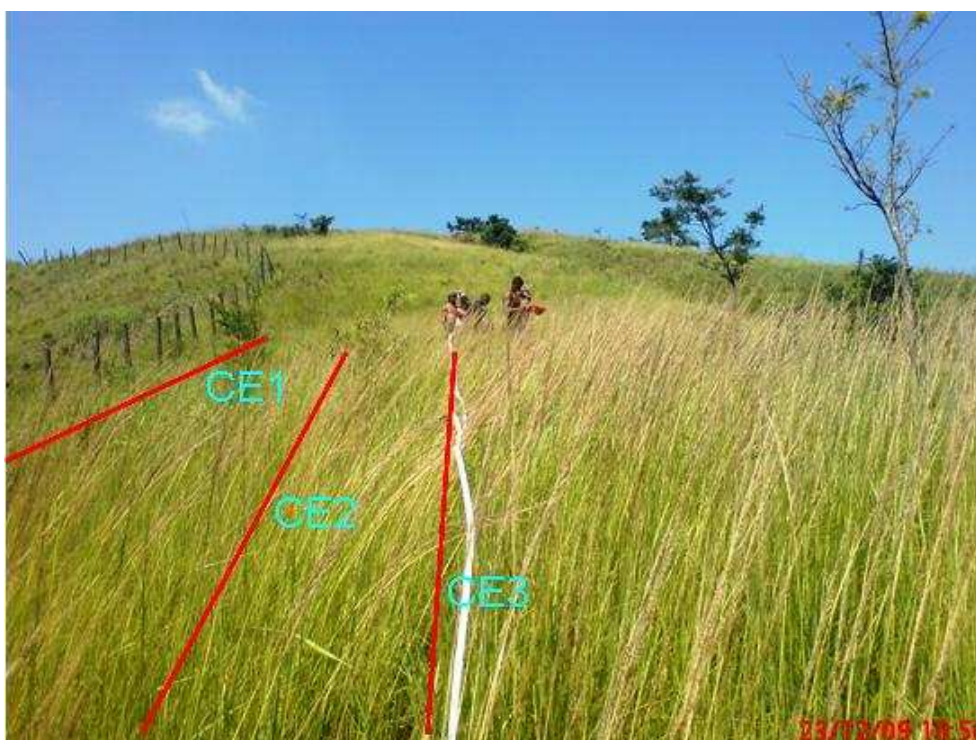


Figura 5.10: Lay-out das Seções (Caminhamentos Elétricos) da ÁREA 2.

Na CE-1 da Área -2, as resistividades baixas (20 a 50 ohm.m) se apresentaram no intervalo de 0,5 a 1,0m. Possivelmente devido a interferência de substâncias condutivas provenientes de percolação através dos interstícios da matriz sedimentar ou variação do solo argiloso para areno argiloso com umidade. As resistividades altas (60 a 300 ohm.m) está diretamente correlacionadas a presença de material sedimentar areno argiloso variando para um solo residual com baixa umidade.

Na CE-2 da Área -2, as resistividades baixas (20 a 50 ohm.m) se evidenciaram na profundidade de 0,5m. As resistividades altas (60 a 300 ohm.m) foram detectadas no intervalo de 1,0 a 3,0m.

Na CE-3 da Área -2, as isolinhas resistivimétricas se comportaram semelhantes as isolinhas da CE-1 da Área 2, com as resistividades baixas variando de 35 ohm.m a 50 ohm.m. As resistividades altas (60 a 300 ohm.m) ocorrerão nos níveis de 1,0 a 3,0m.



Figura 5.11: Leitura na seção CE-1 da ÁREA 2.



Figura 5.12: Leitura na seção CE-1 da ÁREA 2.

### ÁREA 3

A associação das resistividades obtidas na Área 3, descreveu características de ambiente resistivo, com concentração de resistividades altas (60 a 300 ohm.m) nos níveis que variam de 0,5 a 3,0m, com exceções nas CE-2 e CE-3 onde há ocorrências de resistividades baixas (20 a 50 ohm.m) no nível de 0,5 metro.



Figura 5.13: Lay-out das Seções (Caminhamentos Elétricos) da ÁREA 3

Na CE-1 da Área -3, as resistividades altas (60 a 300 ohm.m) foram detectadas nos níveis de 0,5 a 1,0m. Provavelmente devido as propriedades físicas do solo, como sedimentos areno argilosos, com presença de cascalhos e solo residual.

Na CE-2 da Área -3, ocorreram vestígios de resistividades baixas (20 a 50 ohm.m) no nível de 0,5m. As resistividades altas (60 a 300 ohm.m) em maior evidência, ocorreram entre os níveis de 0,5 a 3,0m.

Na CE-3 da Área -3, o comportamento das isolinhas resistivimétricas é parecido com a CE-2 da Área 3.



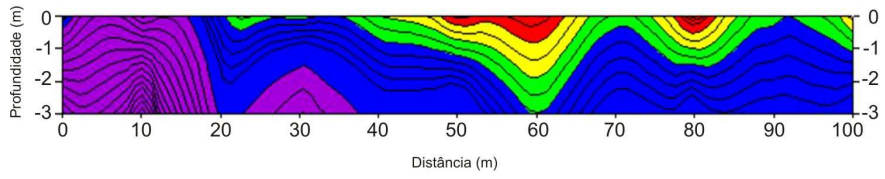
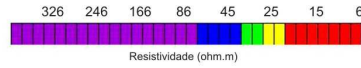
Figura 5.14: Leitura na seção CE-1 da ÁREA 3.



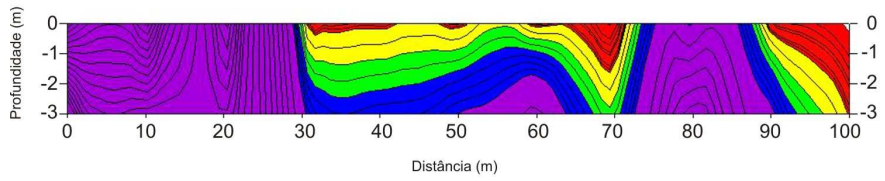
Figura 5.15: Leitura na seção CE-2 da AREA 3.

As curvas de isorresistividade das Áreas 1, 2 e 3 estão apresentadas respectivamente na Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18 respectivamente.

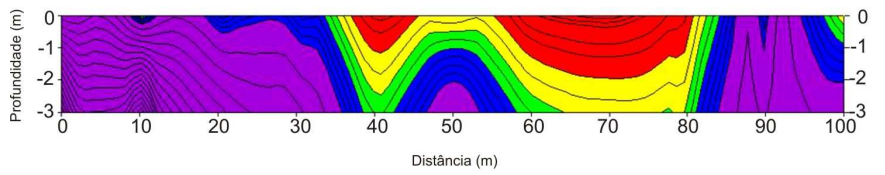
Levantamento Geofísico - Seção Transversal CE - 4 AREA 1



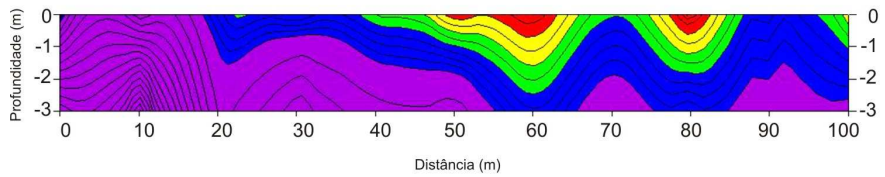
Levantamento Geofísico - Seção Transversal CE - 1 AREA 1



Levantamento Geofísico - Seção Transversal CE - 2 AREA 1



Levantamento Geofísico - Seção Transversal CE - 3 AREA 1



Levantamento Geofísico - Seção Transversal CE - 5 AREA 1

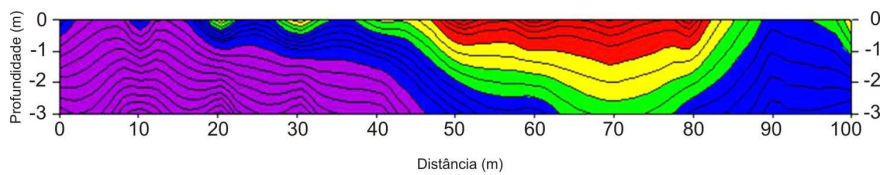
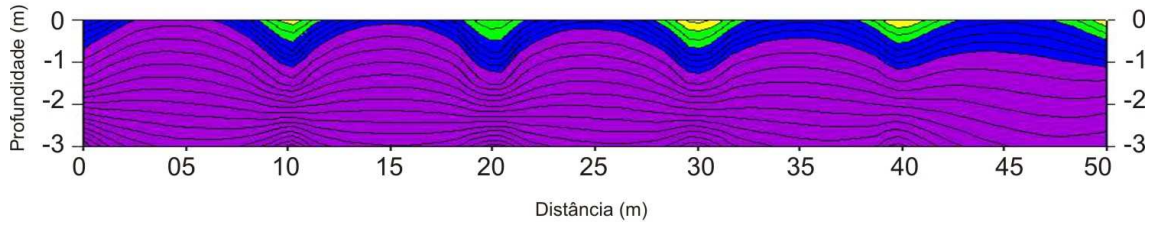
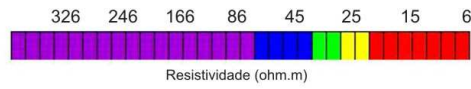
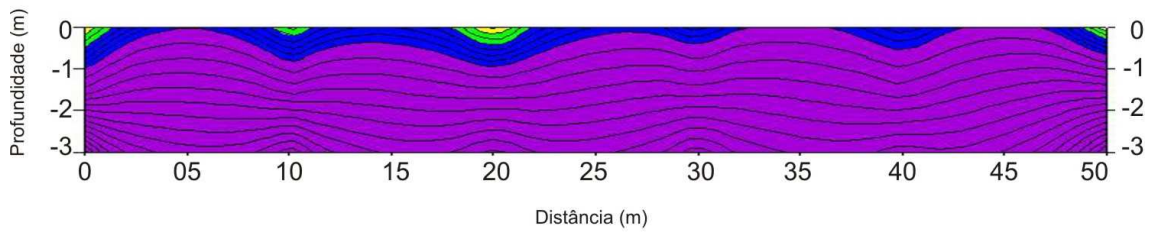


Figura 5.16: Curvas de isorresistividade da Área 1.

### Levantamento Geofísico - Seção Transversal CE - 1 AREA 2



### Levantamento Geofísico - Seção Transversal CE - 2 AREA 2



### Levantamento Geofísico - Seção Transversal CE - 3 AREA 2

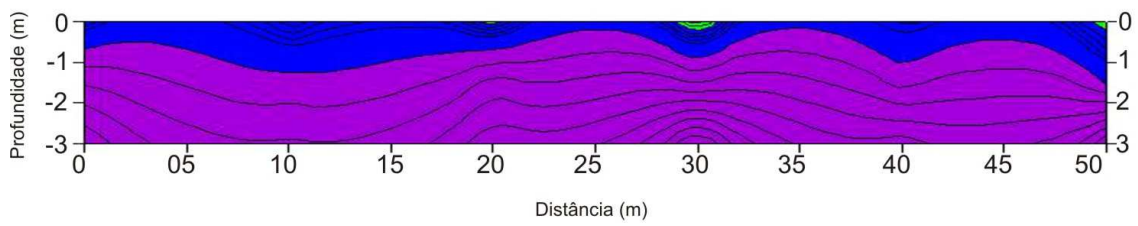
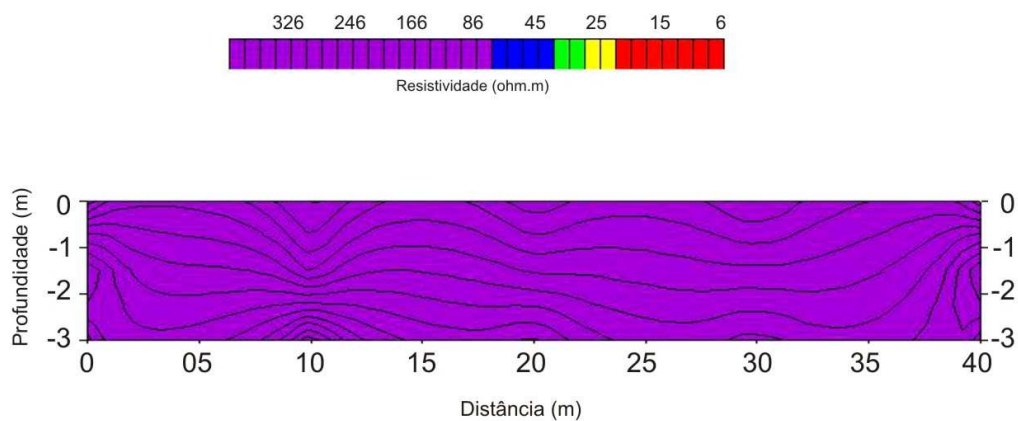
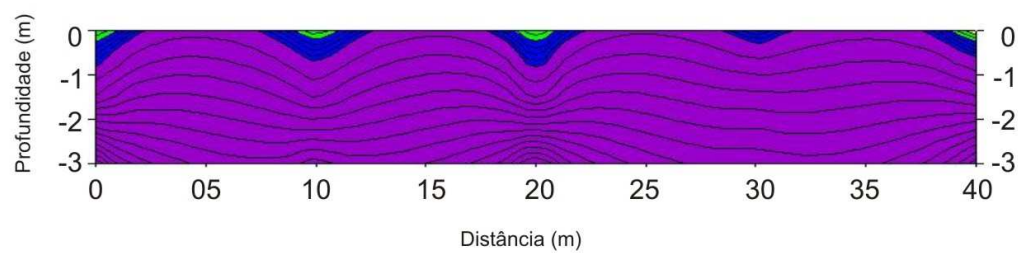


Figura 5.17: Curvas de isorresistividade da Área 2.

### Levantamento Geofísico - Seção Transversal CE - 1 AREA 3



### Levantamento Geofísico - Seção Transversal CE - 2 AREA 3



### Levantamento Geofísico - Seção Transversal CE - 3 AREA 3

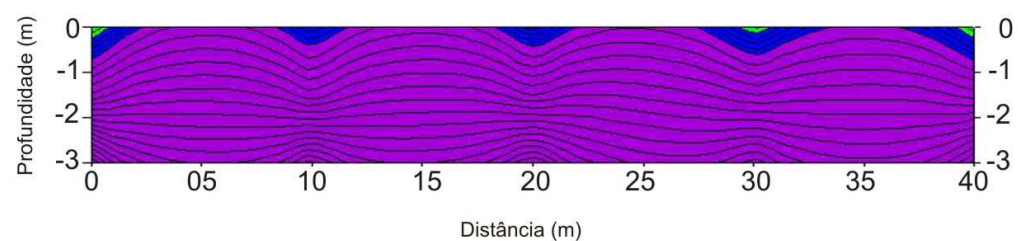


Figura 5.18: Curvas de isoresistividade da Área 3.



## 5.4. RESULTADOS DA EXTRAÇÃO SEQUENCIAL

A Tabela 5.3 apresenta a soma das frações obtidas no ensaio, totalizando o teor de cada elemento analisado nas cinco amostras. O solo 3, representado pela AM03, obteve os teores de metais mais elevados. O solo 1 também apresentou teores expressivos de metais na AM01. As amostras AM04-A/B, C/D e E, referentes ao solo 2, foram retiradas em profundidades diferentes dentro da área de destruição. No solo 2 o Cu apresentou a maior concentração na amostra mais superficial e o Pb apresentou a maior concentração na camada intermediária. Esse comportamento se assemelha ao apresentado nos demais solos: o Cu está mais ligado a fração trocável e o Pb aos óxidos de Fe e Mn.

Tabela 5.3: Total das frações obtidas na Extração Seqüencial

| Solo | Amostras | Cr    | Mn     | Fe       | Ni    | Cu             |        |      |      |                       | Pb            |
|------|----------|-------|--------|----------|-------|----------------|--------|------|------|-----------------------|---------------|
|      |          |       |        |          |       | Zn             | Cd     | Sb   | Ba   | (mgkg <sup>-1</sup> ) |               |
| 1    | AM01     | 48,36 | 457,78 | 43036,23 | 14,76 | <b>1095,76</b> | 125,49 | 0,18 | 0,06 | 136,35                | <b>60,60</b>  |
| 3    | AM03     | 53,11 | 429,03 | 38904,09 | 15,26 | <b>2168,63</b> | 168,90 | 0,46 | 3,66 | 128,67                | <b>178,66</b> |
| 2    | AM04-A/B | 55,36 | 146,00 | 43868,79 | 8,32  | <b>38,20</b>   | 31,78  | 0,01 | -    | 24,60                 | <b>10,55</b>  |
| 2    | AM04-C/D | 74,07 | 158,13 | 55011,61 | 12,35 | <b>10,82</b>   | 38,48  | 0,01 | -    | 25,95                 | <b>15,52</b>  |
| 2    | AM04-E   | 3,54  | 9,67   | 626,07   | 0,48  | <b>2,90</b>    | 3,80   | -    | -    | 9,81                  | <b>6,44</b>   |

A concentração mais elevada de Pb na fração trocável foi encontrada no solo 3 - sedimento próximo ao córrego, e a concentração mais baixa no intervalo de 0,55-0,60 m de profundidade no solo 2. Nos solos 1 e 3 o Pb obteve as parcelas mais significativas na fração redutora, ou seja, na fração de óxidos de ferro e manganês. No solo 2 obteve os maiores teores na parcela residual e em seguida na redutora. Apresentou um comportamento coerente com o citado na literatura, associando-se mais expressivamente com os óxidos de Fe e Mn.

Os teores mais significativos do Cu foram detectados na parcela trocável, exceto no solo 2 na profundidade de 0,45 m. O maior concentração ocorreu no solo 3, que apresentou o maior teor de MO. Assim como o Pb, mostrou um comportamento de acordo com o esperado, além da ligação com substâncias orgânicas apresentou baixa mobilidade para os pontos analisados.

A Tabela 5.4 apresenta o percentual da cada fração obtida na Extração Sequencial, nas amostras analisadas, para o Cu e o Pb. A Figuras 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23 mostram os gráficos de barras para os teores de Cu e Pb para cada fração nas amostras analisadas.

Tabela 5.4: Percentual das frações da Extração Sequencial para Cu e Pb

| Amostras | Metal | Fração Trocável | Fração Redutora | Fração Oxidável | Fração Residual |
|----------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|          |       | %               | %               | %               | %               |
| AM01     | Cu    | 93,86           | 0,98            | 0,27            | 4,89            |
|          | Pb    | 15,76           | 48,91           | 10,31           | 25,02           |
| AM03     | Cu    | 96,07           | 0,87            | 0,30            | 2,77            |
|          | Pb    | 21,88           | 54,18           | 8,38            | 15,55           |
| AM04 A/B | Cu    | 81,15           | 1,96            | 0,58            | 16,31           |
|          | Pb    | 3,89            | 25,50           | 13,74           | 56,87           |
| AM04 C/D | Cu    | 28,74           | 1,48            | 2,13            | 67,65           |
|          | Pb    | 3,48            | 24,03           | 18,75           | 53,74           |
| AM04 E   | Cu    | 65,86           | 4,14            | 5,17            | 24,83           |
|          | Pb    | 8,70            | 55,12           | 29,81           | 6,37            |

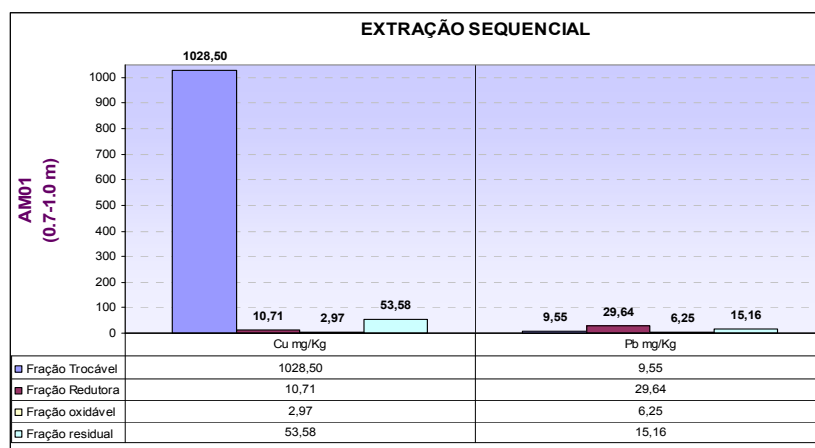


Figura 5.19: Extração Sequencial do Solo 1 (AM01) para Cu / Pb

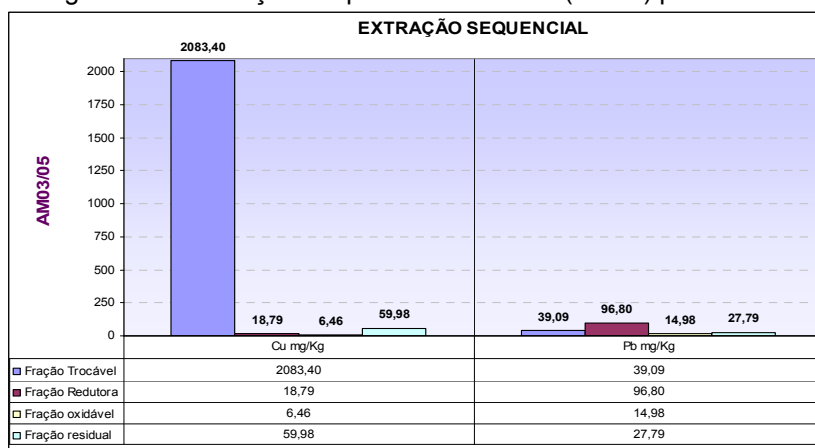


Figura 5.20: Extração Sequencial do Solo 3 (AM03/05) para Cu / Pb

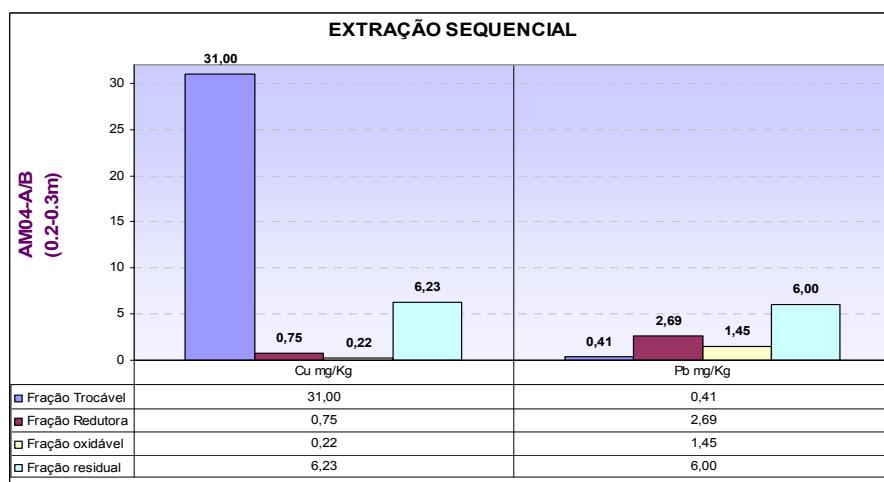


Figura 5.21: Extração Sequencial do Solo 2 (AM04-A/B) para Cu / Pb

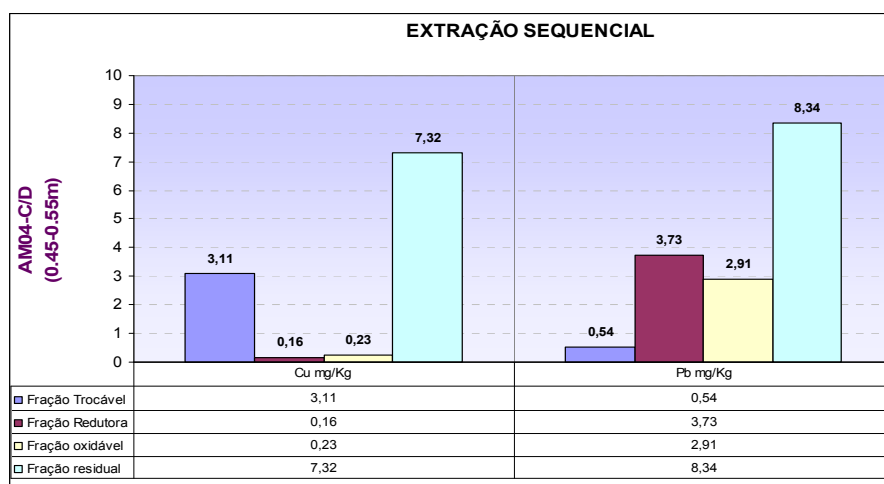


Figura 5.22: Extração Sequencial do Solo 2 (AM0A-C/D) para Cu / Pb

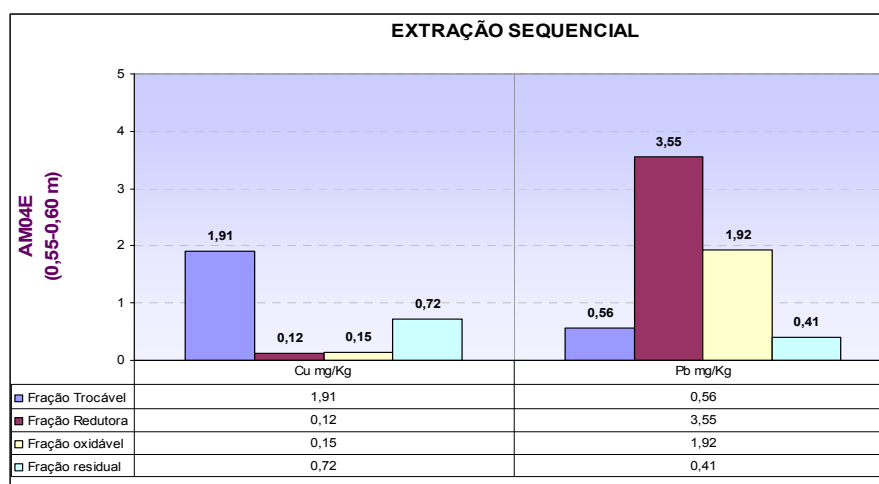


Figura 5.23: Extração Sequencial do Solo 2 (AM04E) para Cu / Pb

## 5.5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO PARCIAL

### CARACTERIZAÇÃO REGIONAL

A área em estudo está localizada na bacia hidrográfica do Rio Guandu e o clima predominante é essencialmente tropical chuvoso. Pertence à unidade geomorfológica denominada de Escarpa da Serra de Paracambi. Apresenta relevo ondulado a montanhoso com declividades entre 30% e 60% e planícies alúvio-coluvionares que ocorrem ao longo dos cursos d'água constituídas por sedimentos quaternários. Na fração coluvionar os depósitos originam-se das partes mais altas com maiores acumulações nas áreas de contato da planície com os morros e colinas e na fração aluvionar os depósitos são heterogêneos e totalmente selecionados pela ação das águas correntes. Com base nessas informações, a topografia foi limitada pelos divisores de água e vizinhanças área de destruição mais uma faixa de 20 metros (horizontalmente).

### CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E PERFIL GEOTÉCNICO

O solo 2 representado pela amostra AM4A/B (0,20-0,30) referente a 1ª coleta apresentou 45% de argila e 35% de areia, classificada como argilosa e o solo 3 representado pela amostra AM03 (0,20-0,30) da mesma coleta apresentou 17% de argila e 55% de areia, classificada como franco-arenosa.

Para as amostras coletadas na 2ª campanha foram realizadas análises granulométricas e limites de Atterberg. O solo 2, amostra AM4J (0,55-0,60) apresentou 28% de argila, 40% de silte, 34% de areia,  $w_L = 72$  e  $w_P = 33$ , classificada pelo SUCS como CH- argila com alta plasticidade. O solo 3, amostra AM5G (0,45-0,50) apresentou 30% de argila, 45% de silte, 24% de areia,  $w_L = 55$  e  $w_P = 22$ , também foi classificada como CH- argila com alta plasticidade.

Os índices da atividade de Skempton para o solo 2 foi 1,39, considerados de alta atividade e para o solo 3 foi 1,1, atividade moderada.

Os perfis geotécnicos interpretados a partir dos cinco furos de sondagem executados no entorno da área de destruição revelaram que a montante, na cota mais alta (perfil B-B') o subsolo apresentou uma camada de aproximadamente 1,00m de material argiloso com camadas subsequentes de material silto-arenoso a arenoso. Essa região foi identificada visualmente como solo 1 (lado esquerdo) e solo 2 (lado direito-residual). A jusante, na cota mais baixa próximo ao córrego (perfil C-C') apresentou uma camada de material argiloso com presença de matéria orgânica a

silto-argiloso, com espessura média de 4,00m, seguida de material silto-arenoso a arenoso e identificada como solo 3. O nível d'água variou de 0,10-0,90 m. O perfil A-A' configura um corte de jusante (solo 2) a montante (solo 3), englobando a região central da área onde não foram realizadas sondagens a percussão, com NA aflorando.

#### ANÁLISE MINERALÓGICA

A Caulinita, aparentemente, é predominante nas duas amostras. A mica ocorre de forma mais expressiva no solo 3. Pequenas reflexões indicam a presença de vermiculita e interstratificado mica-vermiculita. No solo 3 a presença destes minerais é melhor evidenciada. A gibbsita ocorre nas duas amostras. Goethita ocorre somente no solo 2. A caulinita é um mineral tipicamente formado em associação com perfis de intemperismo, em condições de boa drenagem.

Resumidamente os solos são compostos por: Solo 2 - caulinita, mica, vermiculita, interstratificado mica-vermiculita, goethita e gibbsita; e Solo 3 - caulinita, mica, vermiculita, interstratificado mica-vermiculita e gibbsita.

Os óxidos hidratados de Fe e Al são minerais dominantes na constituição do colóide inorgânico de muitos solos de áreas intertropicais. A este grupo pertencem minerais como a goethita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e a gibbsita ( $\text{AlO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ).

Os teores de gibbsita estão relacionados com o grau de intemperização dos solos, quanto maiores os teores do mineral maior o grau de intemperização. Os óxidos hidratados são de elevada importância para a adsorção de elementos no solo apresentando afinidades distintas quanto à adsorção de metais.

#### ANÁLISE QUÍMICA

Quanto a CTC do solo 2 (amostra AM4J) podemos dizer que o  $\text{H}^+$  representa 83% dos cátions trocáveis seguido do  $\text{Ca}^{2+}$ . No solo 3 (amostra AM5G) o  $\text{H}^+$  representa 82% dos cátions trocáveis seguido do  $\text{Mg}^{2+}$ . A acidez trocável ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$ ) destas amostras é considerada alta.

Os valores obtidos para pH em água são considerados fortemente ácidos. A variação entre o pH em água e em KCl ( $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) para o solo 2 é -1,19 e para o solo 3 é -0,72. O resultado negativo indica retenção de cátions, já no caso do solo 3, o valor está próximo de Zero, o que significa que as cargas superficiais estão em equilíbrio.

O teor de matéria orgânica do solo 2 (AM4J) é de 0,56% e do solo 3 (AM5G) é de 6,09%. O solo 3 é um sedimento arenoso orgânico da planície de inundação do córrego a jusante da área de destruição.

A caulinita apresenta CTC baixa, na faixa de 5-10  $\text{cmol}_e/\text{kg}$ . A mica e a vermiculita na faixa de 10-50, 100-150  $\text{cmol}_e/\text{kg}$  respectivamente. Os óxidos de Fe (gohetita) e de Al (gibbisita) apresentam menores que a caulinita, 2-5  $\text{cmol}_e/\text{kg}$  (MARTINS, 2005).

O solo 2 apresentou CTC 20, 2  $\text{cmol}_e/\text{kg}$  e o solo 3, 32,9  $\text{cmol}_e/\text{kg}$ . Ambas bem superiores ao da caulinita, o argilo mineral predominante em ambos os solos. A presença de MO e os óxidos de Fe e Al contribuem para possível retenção de metais em ambos os solos, mas evidente no solo 3 devido a taxa de MO. A presença de minerais de alta atividade como a vermiculita, por exemplo, mesmo em baixas concentrações, também pode contribuir para aumentar a CTC.

#### EXTRAÇÃO SEQUENCIAL

A realização da Extração seqüencial objetivou analisar o fracionamento dos metais no solo. A extração indica a distribuição da concentração nas frações operacionalmente definidas como solúveis em ácido, redutível, oxidável e residual.

Altos teores de Fe e Mn foram apontados principalmente na fração residual. Cu e Pb aparecem com teores significativos na fração trocável e redutora respectivamente, validando as informações obtidas pela UFRRJ.

Ba e Sb, elementos que não foram avaliados anteriormente, apresentaram teores baixos para Ba e quase nulos para Sb. O Ba apresentou as maiores concentrações no solo 3, solo com teor MO.

Nos solos 1 e 3 o Pb obteve as parcelas mais significativas na fração de óxidos de ferro e manganês. No solo 2 obteve os maiores teores na parcela residual e em seguida na redutora. Apresentou um comportamento coerente com o citado na literatura, associando-se mais expressivamente com os óxidos de Fe e Mn.

Os teores mais significativos do Cu foram detectados na parcela trocável e a maior concentração ocorreu no solo 3, que apresentou o maior teor de MO. Também apresentou um comportamento coerente; além da ligação com substâncias orgânicas apresentou baixa mobilidade para os pontos analisados.

#### ESTUDOS ANTERIORES

O estudo da PUC-Rio não detectou contaminação devido a presença de compostos orgânicos.

Os teores pseudototais determinados pela UFRRJ, para: Chumbo, Cobre, Cádmio, Cromo, Ferro, Manganês, Níquel e Zinco apontaram contaminação elevada para Chumbo e média para Cobre e Cádmio. Esses dados possibilitaram a construção

de mapas de variabilidade espacial das concentrações desses metais área de destruição.

Muitas substâncias que estão inseridas na composição das munições e explosivos são consideradas contaminantes em potencial. Complementando as análises realizadas incluímos dois elementos, presentes nas munições: Ba e Sb.

#### LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

Devido ao risco iminente de acidentes, não foi considerada apropriada a realização de SPT na região central da área de destruição, assim o método geofísico se apresentou como uma ferramenta mais adequada para a complementação do perfil geológico-geotécnico nessa área em particular. O levantamento geofísico possibilitou uma avaliação mais realista da profundidade real que os contaminantes provavelmente estão alcançando.

A Figura 5.24 mostra a seção CE-2 na região central da área de destruição. Na figura é possível correlacionar o afloramento do NA e a área de explosões com áreas de baixa resistividade.

O impacto físico ficou evidenciado pelas curvas de isorresistividades. A origem da seção foi locada na região do solo 3, nas proximidades do ponto de coleta 5, esse material considerado um sedimento, apresentou alto teor de MO, grande índice de vazios e permeabilidade moderada. As análises químicas realizadas apontaram grande concentração de metais provavelmente devido a MO e a topografia da área; este ponto está localizado a jusante da área de destruição. Grande parcela do escoamento superficial drena para esse ponto. No levantamento geofísico esse trecho foi inserido em um intervalo que começa na faixa de 80 ohm.m a 330 ohm.m. Provavelmente essa escala não favoreceu a detecção de alguma anomalia proveniente de concentrações de substâncias condutivas, metais por exemplo.

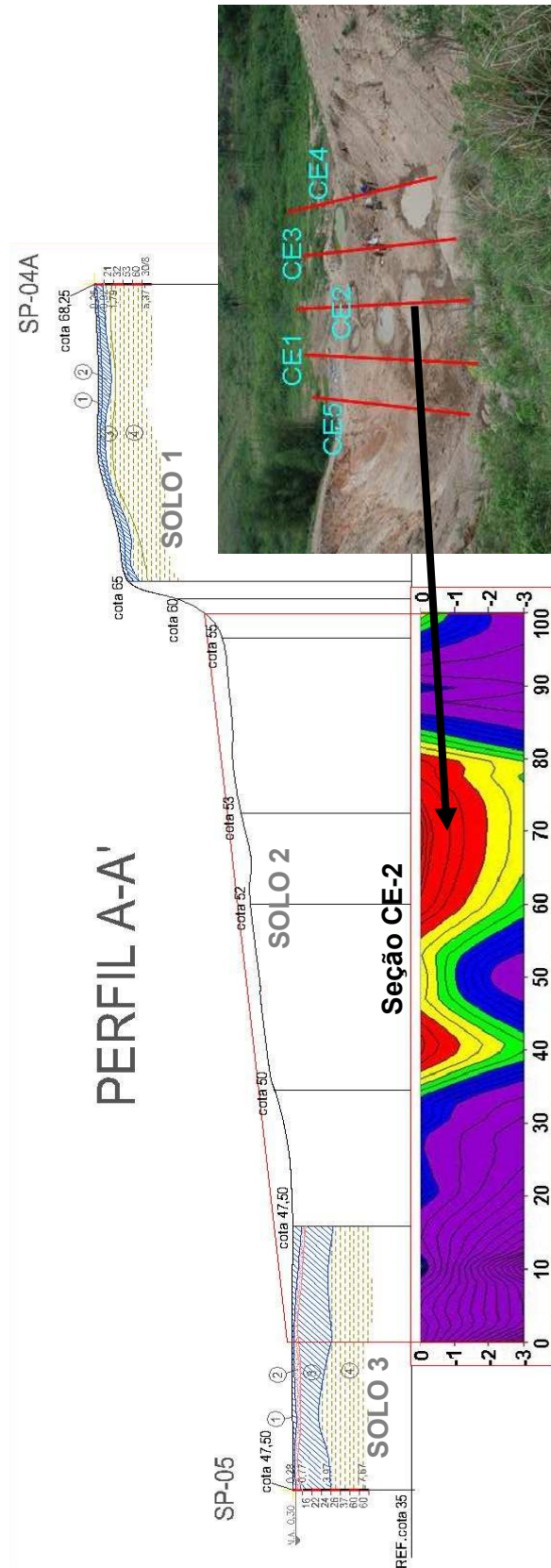


Figura 5.24: Perfil geotécnico agrupado a seção geofísica Área 1-CE2



## 6. PARÂMETROS DE FÍSICOS

### 6.1. PERMEABILIDADE E ADENSAMENTO

#### 6.1.1. Resultados do Ensaio de Adensamento Edométrico

Foram realizados ensaios edométricos convencionais em amostras indeformadas dos solos 2 e 3 solos. As amostras ficaram imersas em água durante 72 horas para garantir a saturação.

Para a amostra 4B as tensões adotadas iniciaram em 3,125 kPa e variaram até 800 kPa. A partir do último estágio de carregamento (800 kPa) foram realizados os seguintes estágios de descarregamento: 400 kPa, 200 kPa e 50 kPa. Para a amostra 5B as tensões iniciaram em 3,125 kPa variando até 400 kPa e os estágios de descarregamento foram: 200 kPa, 100 kPa e 25 kPa. O tempo de duração de cada estágio foi o suficiente para proporcionar a estabilização das deformações. As planilhas com as leituras obtidas nos ensaios estão no Anexo 8. A Tabela 6.1 mostra os índices físicos iniciais do ensaio.

Tabela 6.1: Índices físicos – condições iniciais dos corpos de prova

| Amostra | $e_0$ | $\gamma_s$           | $w_0$  | $S_0$ |
|---------|-------|----------------------|--------|-------|
|         |       | (kN/m <sup>3</sup> ) | %      | %     |
| 4B      | 0,827 | 14,59                | 25,96  | 84    |
| 5B      | 4,836 | 4,16                 | 197,45 | 101   |

Analisando os índices físicos dos corpos de prova observa-se uma grande variação no índice de vazios inicial, no peso específico, no teor de umidade inicial e no grau de saturação (48,88 a 80,52%). A grande variação nos índices físicos iniciais é devida às heterogeneidades naturais típicas de ambos os solos. Considerando o solo 2 um residual jovem e o solo 3 um sedimento com alto teor de MO, as variações são coerentes.

Os valores de  $m_v$  para o solo 2 variaram de 0,99 a 9,63 ( $10^{-4}$  kPa<sup>-1</sup>) e para o solo 3 de 2,10 a 59,93 ( $10^{-4}$  kPa<sup>-1</sup>). Os valores para todos os carregamentos estão na Tabela 6.2 e Tabela 6.3.

No Anexo 8 estão plotados os gráficos ( $e \times \log \sigma'_v$ ) e ( $\epsilon_v \times \log \sigma'_v$ ).

Tabela 6.2: Parâmetros de compressibilidade –Solo 2

| $\Delta P$<br>(kPa) | $\Delta e$ | $e_m$ | $a_v$<br>( $10^{-4}$ kPa $^{-1}$ ) | $m_v$<br>( $10^{-4}$ kPa $^{-1}$ ) |
|---------------------|------------|-------|------------------------------------|------------------------------------|
| 3,125               | 0,004      | 0,825 | 11,69                              | 6,41                               |
| 3,125               | 0,005      | 0,821 | 17,54                              | 9,63                               |
| 6,25                | 0,008      | 0,814 | 13,15                              | 7,25                               |
| 12,5                | 0,010      | 0,805 | 8,19                               | 4,54                               |
| 25                  | 0,016      | 0,791 | 6,58                               | 3,67                               |
| 50                  | 0,019      | 0,773 | 3,89                               | 2,19                               |
| 100                 | 0,024      | 0,751 | 2,44                               | 1,39                               |
| 200                 | 0,048      | 0,715 | 2,41                               | 1,41                               |
| 400                 | 0,066      | 0,658 | 1,64                               | 0,99                               |

Tabela 6.3: Parâmetros de compressibilidade –Solo 3

| $\Delta P$<br>(kPa) | $\Delta e$ | $e_m$ | $a_v$<br>( $10^{-4}$ kPa $^{-1}$ ) | $m_v$<br>( $10^{-4}$ kPa $^{-1}$ ) |
|---------------------|------------|-------|------------------------------------|------------------------------------|
| 3,125               | 0,004      | 4,834 | 12,25                              | 2,10                               |
| 3,125               | 0,055      | 4,805 | 177,58                             | 30,59                              |
| 6,25                | 0,212      | 4,671 | 339,84                             | 59,93                              |
| 12,5                | 0,364      | 4,383 | 290,86                             | 54,03                              |
| 25                  | 0,561      | 3,921 | 224,27                             | 45,58                              |
| 50                  | 0,547      | 3,367 | 109,45                             | 25,07                              |
| 100                 | 0,507      | 2,840 | 50,71                              | 13,21                              |
| 200                 | 0,457      | 2,357 | 22,87                              | 6,81                               |

### 6.1.2. Resultados do Ensaio de Permeabilidade

A amostra referente ao solo 2 apresentou um comportamento menos permeável que o apresentado pela amostra referente ao solo 3.

A composição mineralógica e química do solo tem grande influência na condutividade hidráulica além dos parâmetros de adensamento e compactação e as características do fluido percolante. A Tabela 6.1 mostra os valores do índice de vazios inicial no ensaio edométrico, para o solo 3  $e_0 = 4,836$  e para o solo 2  $e_0 = 0,827$ . Essa diferença significativa reflete diretamente nos valores de K.

O solo 2 apresentou uma textura mais argilosa, enquanto que o solo 3 é um sedimento arenoso orgânico. Os valores obtidos para K estão na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Coeficientes de permeabilidade

| Solo | Amostra | K                     |
|------|---------|-----------------------|
|      |         | (cm/s)                |
| 2    | 4B      | $1,84 \times 10^{-6}$ |
| 3    | 5B      | $2,62 \times 10^{-5}$ |

## 6.2. RESULTADOS DO ENSAIO DE BATELADA

### 6.2.1. Razão Solo: Solução

A impossibilidade de coletar amostras sem a presença de qualquer substância tóxica antropogênica na área de destruição e no seu entorno inviabilizou a obtenção do background. Foram estimadas as possíveis concentrações de Pb e Cu presentes nas amostras analisadas, com base nos resultados obtidos no fracionamento geoquímico a partir da correlação entre os teores de metais obtidos pela UFRRJ em 2008 e pela UFF em 2009, para pontos próximos aos pontos da coleta. Considerando os maiores teores totais encontrados, a concentração de Pb se encontrava na faixa de 555,2 mg/kg e a de Cu na faixa de 2170,0 mg/kg.

Para validar os intervalos estimados foi realizada a análise para determinação da melhor proporção de solo: contaminante, com solução inicial com concentração de 85 mg/l de Pb

Os resultados obtidos não ficaram na faixa de 10% a 30% de adsorção da concentração mais alta. O solo 2 até obteve valores dentro do intervalo esperado, mas para RSS com quantidade muito pequena de solo, e o solo 3 não obteve leitura dentro da faixa conforme Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Resumo dos resultados de RSS para solução de 85ppm de Pb

| Proporção | Massa de solo seco (mg) | Solução Inicial Vol.Total (ml) | Solução Inicial (ppm) | Solo2 - amostra 4     |              | Solo3 - amostra 5     |              |
|-----------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
|           |                         |                                |                       | Sol.Final média (ppm) | Adsorção (%) | Sol.Final média (ppm) | Adsorção (%) |
| 1:4       | 10                      | 40,00                          | 85,00                 | 1,23                  | 98,56        | 0,06                  | 99,93        |
| 1:10      | 4                       | 40,00                          | 85,00                 | 5,81                  | 93,16        | 0,39                  | 99,55        |
| 1:20      | 2                       | 40,00                          | 85,00                 | 14,70                 | 82,71        | 1,18                  | 98,62        |
| 1:50      | 0,8                     | 40,00                          | 85,00                 | 32,55                 | 61,71        | 9,29                  | 89,07        |
| 1:100     | 0,4                     | 40,00                          | 85,00                 | 52,75                 | 37,94        | 32,85                 | 61,35        |
| 1:200     | 0,2                     | 40,00                          | 85,00                 | 65,65                 | 22,76        | 52,45                 | 38,29        |

Todo o procedimento foi repetido para solução com concentração de 291ppm e os resultados obtidos ficaram na faixa de 10% a 30% conforme Tabela 6.6, porém para RSS com uma quantidade pequena de solo, 0,8mg para o solo 2 e 0,4mg para o solo 3.

Tabela 6.6: Resumo dos resultados de RSS para solução de 291ppm de Pb

| Proporção | Massa de solo seco (mg) | Solução Inicial Vol.Total (ml) | Solução Inicial (ppm) | Solo2 - amostra 4     |              | Solo3 - amostra 5     |              |
|-----------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
|           |                         |                                |                       | Sol.Final média (ppm) | Adsorção (%) | Sol.Final média (ppm) | Adsorção (%) |
| 1:4       | 10                      | 40,00                          | 291                   | 24,8                  | 91,48        | 1,425                 | 99,51        |
| 1:10      | 4                       | 40,00                          | 291                   | 87,1                  | 70,07        | 7,86                  | 97,30        |
| 1:20      | 2                       | 40,00                          | 291                   | 168                   | 42,27        | 51,6                  | 82,27        |
| 1:50      | 0,8                     | 40,00                          | 291                   | 227                   | 21,99        | 159,5                 | 45,19        |
| 1:100     | 0,4                     | 40,00                          | 291                   | 243,5                 | 16,32        | 218                   | 25,09        |
| 1:200     | 0,2                     | 40,00                          | 291                   | 284,5                 | 2,23         | 258                   | 11,34        |

A concentração adotada para o Pb foi de 500ppm e as RSS apresentadas na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: RSS adotadas para Pb

| Chumbo |      |         |
|--------|------|---------|
| Solo   | RSS: | Conc.   |
| 2      | 1:50 | 500 ppm |
| 3      | 1:20 | 500 ppm |

Os resultados foram coerentes com a estimativa inicial que considerou que ambos os solos já tinham experimentado concentrações de Pb na faixa de 500 ppm. Para o Cu as análises começaram com concentração de 975ppm apresentados na Tabela 6.8. Os resultados obtidos ficaram na faixa de 10% a 30%.

Tabela 6.8: Resumo dos resultados de RSS para solução de 975 ppm de Cu

| Proporção | Massa de solo seco (mg) | Solução Inicial<br>Vol.Total (ml) | Solução Inicial (ppm) | Solo2 - amostra 4     |              | Solo3 - amostra 5     |              |
|-----------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
|           |                         |                                   |                       | Sol.Final média (ppm) | Adsorção (%) | Sol.Final média (ppm) | Adsorção (%) |
| 1:4       | 10                      | 40,00                             | 975                   | 696,00                | 28,62        | 468,00                | 52,00        |
| 1:10      | 4                       | 40,00                             | 975                   | 813,00                | 16,62        | 691,50                | 29,08        |
| 1:20      | 2                       | 40,00                             | 975                   | 894,50                | 8,26         | 765,00                | 21,54        |
| 1:50      | 0,8                     | 40,00                             | 975                   | 910,50                | 6,62         | 819,50                | 15,95        |
| 1:100     | 0,4                     | 40,00                             | 975                   | 885,50                | 9,18         | 835,50                | 14,31        |
| 1:200     | 0,2                     | 40,00                             | 975                   | 889,00                | 8,82         | 860,00                | 11,79        |

A concentração adotada para o Cu foi de 1000ppm e as RSS apresentadas na Tabela 6.9.

Tabela 6.9: RSS adotadas para Cu

| Chumbo |      |          |
|--------|------|----------|
| Solo   | RSS: | Conc.    |
| 2      | 1:10 | 1000 ppm |
| 3      | 1:20 | 1000 ppm |

## 6.2.2. Tempo de Equilíbrio

A Tabela 6.10 e a Tabela 6.11 mostram os valores obtidos na análise. O tempo de equilíbrio adotado para ambos os solos e ambas as substâncias foi de 24horas.

Tabela 6.10: Resumo dos resultados da determinação do Tempo de equilíbrio - Pb

| Solução inicial: 539 ppm de Chumbo |                       |      |                       |      |               |
|------------------------------------|-----------------------|------|-----------------------|------|---------------|
| Intervalos (h)                     | Amostra 4<br>1:20     |      | Amostra 5<br>1:50     |      | Tempo adotado |
|                                    | Sol.Final média (ppm) | %ΔC  | Sol.Final média (ppm) | %ΔC  |               |
| 1                                  | 398,00                | -    | 394,00                | -    | 24h           |
| 4                                  | 393,00                | 1,26 | 382,00                | 3,03 |               |
| 8                                  | 386,50                | 1,65 | 376,50                | 1,41 |               |
| 24                                 | 387,00                | 0,13 | 374,50                | 0,52 |               |
| 48                                 | 383,50                | 0,91 | 379,00                | 1,20 |               |
| 72                                 | 382,50                | 0,26 | 374,00                | 1,32 |               |

Tabela 6.11: Resumo dos resultados da determinação do Tempo de equilíbrio - **Cu**

| Solução inicial: 978 ppm de <b>Cobre</b> |                          |              |                          |              |                  |
|--|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|------------------|
| Intervalos<br>(h)                        | Amostra 4<br>1:10        |              | Amostra 5<br>1:20        |              | Tempo<br>adotado |
|  | Sol.Final<br>média (ppm) | % $\Delta$ C | Sol.Final<br>média (ppm) | % $\Delta$ C |                  |
| 1  | 874,50                   | -            | 871,00                   | -            |                  |
| 4  | 859,00                   | 1,77         | 849,00                   | 2,52         |                  |
| 8  | 840,00                   | 2,21         | 857,00                   | 0,94         |                  |
| 24                                       | 827,00                   | 1,55         | 853,50                   | 0,40         | 24h              |
| 48                                       | 825,00                   | 0,24         | 855,00                   | 0,18         |                  |
| 72                                       | 808,50                   | 2,00         | 870,00                   | 1,76         |                  |

### 6.2.3. Procedimento do Ensaio de Batelada

A partir dos resultados obtidos foram plotadas os modelos linearizados das isotermas de Freundlich e Langmuir. Verificou-se qual isoterma melhor se ajusta através da comparação entre os coeficientes de correlação (maior R<sup>2</sup>) dos gráficos. No Anexo 7 estão plotados os gráficos dos modelos linearizados e os valores obtidos para o pH, CEE e para a concentração da solução final .

Os parâmetros obtidos estão na Tabela 6.12. Os coeficientes de distribuição foram definidos a partir das equações 3.9 e 3.12. Na Figura 6.2 e na Figura 6.3 estão plotadas as isotermas para os elementos Pb e Cu segundo as equações 3.7 (Freundlich) e 3.10 (Langmuir).

Tabela 6.12: Resumo dos parâmetros obtidos nos modelos linearizados das Isotermas de Freundlich e Langmuir

| Solução | Amostras | Freundlich |        |        | Langmuir        |                |        | Concentrações (mg/l) |
|---------|----------|------------|--------|--------|-----------------|----------------|--------|----------------------|
|         |          | Kf (l/mg)  | N      | R2     | $\alpha$ (l/mg) | $\beta$ (mg/g) | R2     |                      |
| Pb      | AM 04    | 0,5495     | 0,3189 | 0,9661 | 0,0876          | 3,0864         | 0,9777 | 10 - 500             |
|         | AM 05    | 0,6256     | 0,2749 | 0,6861 | 0,4618          | 6,4558         | 0,9982 | 10 - 500             |
| Cu      | AM 04    | 0,1652     | 0,2286 | 0,9904 | 0,0169          | 0,5912         | 0,9730 | 5 - 1000             |
|         | AM 05    | 0,2025     | 0,3994 | 0,7577 | 0,0278          | 2,4783         | 0,9866 | 5 - 1000             |

A Tabela 6.13 aponta os valores obtidos na linearização das isotermas de Freundlich e de Langmuir considerando um ponto discrepante em relação aos demais como mostra a Figura 6.1. Para a  $C_e = 575$  mg/l foi obtida  $S = 0,19$  mg/g de soluto adsorvido. Para a avaliação do ajuste das isotermas os parâmetros foram recalculados desconsiderando esse ponto, os valores adotados são os apresentados na Tabela 6.12.

Tabela 6.13: Parâmetros obtidos nos modelos linearizados para AM04 – Cu, considerando ponto discrepante

| Solução | Amostras | Freundlich |        |               | Langmuir        |                |               | Concentrações (mg/l) |
|---------|----------|------------|--------|---------------|-----------------|----------------|---------------|----------------------|
|         |          | Kf (l/mg)  | N      | R2            | $\alpha$ (l/mg) | $\beta$ (mg/g) | R2            |                      |
| Cu      | AM 04    | 0,1652     | 0,2286 | <b>0,7313</b> | 0,0169          | 0,5912         | <b>0,3544</b> | 5 - 1000             |

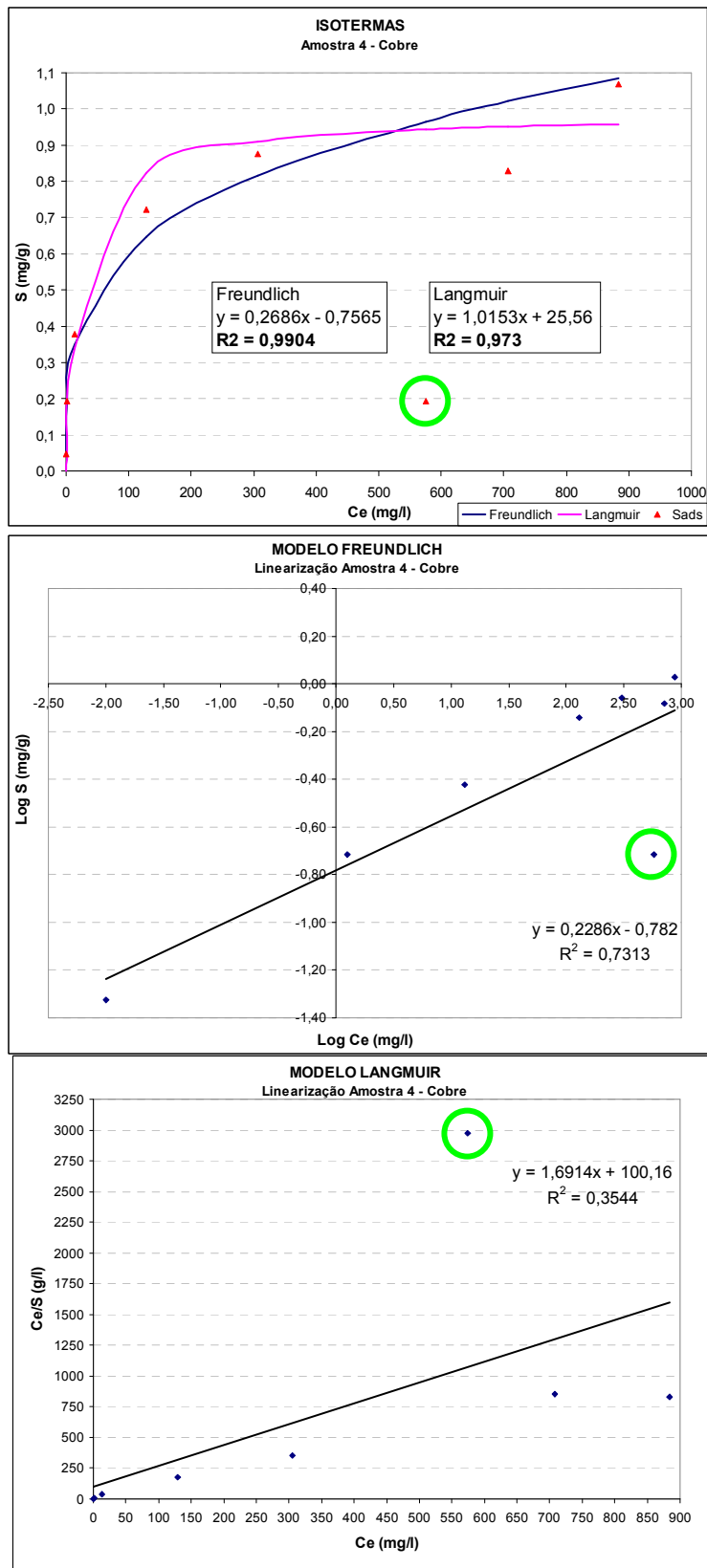


Figura 6.1: Ponto discrepante – AM04 / Cu



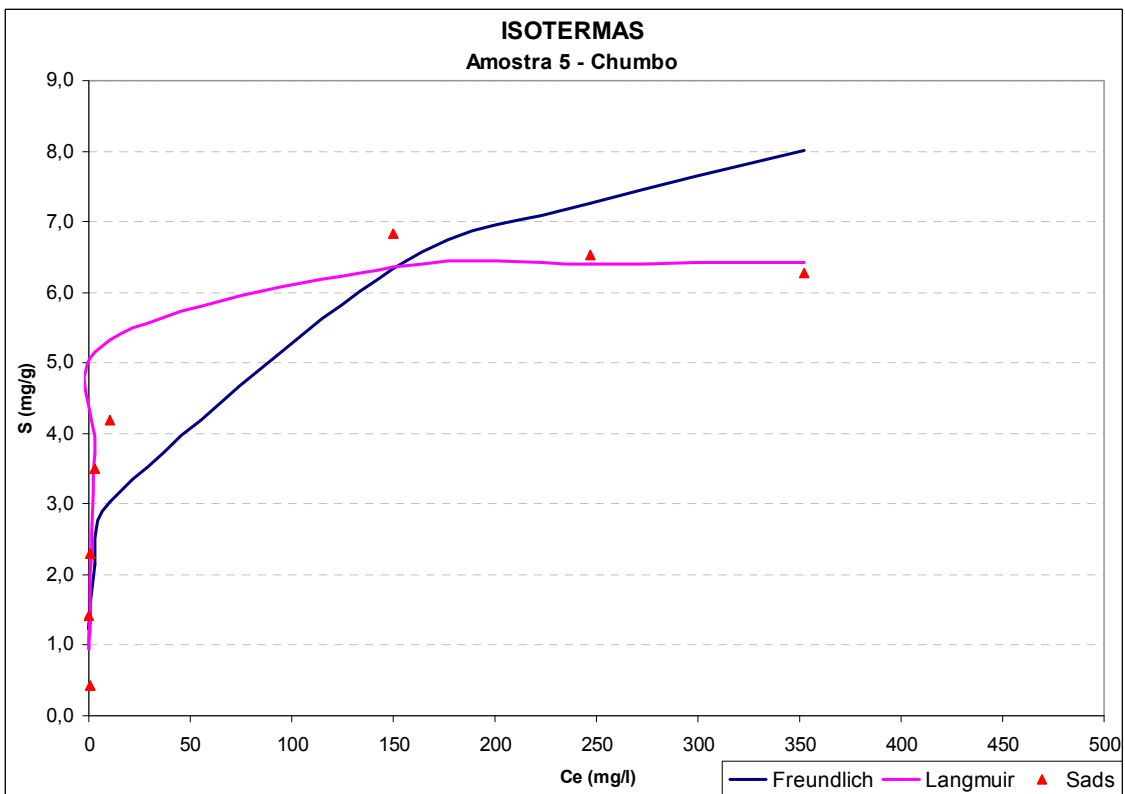
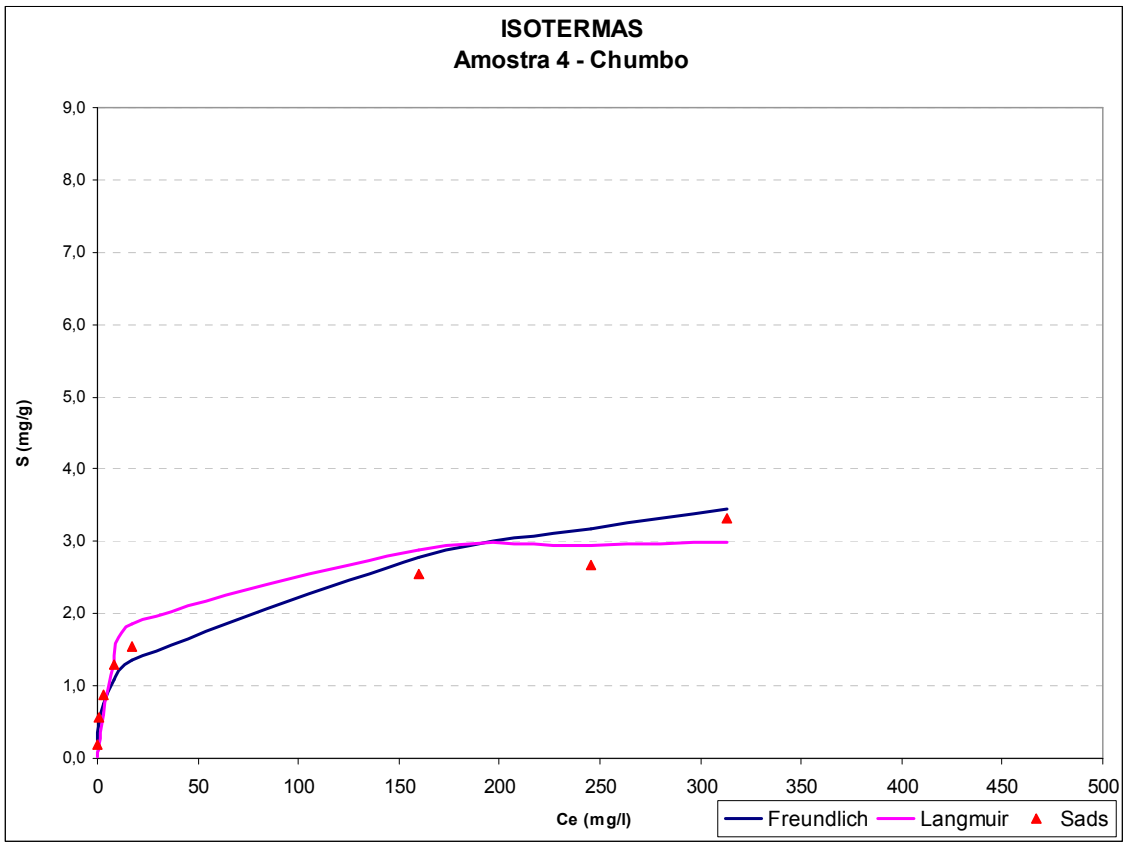


Figura 6.2: Isothermas – Chumbo

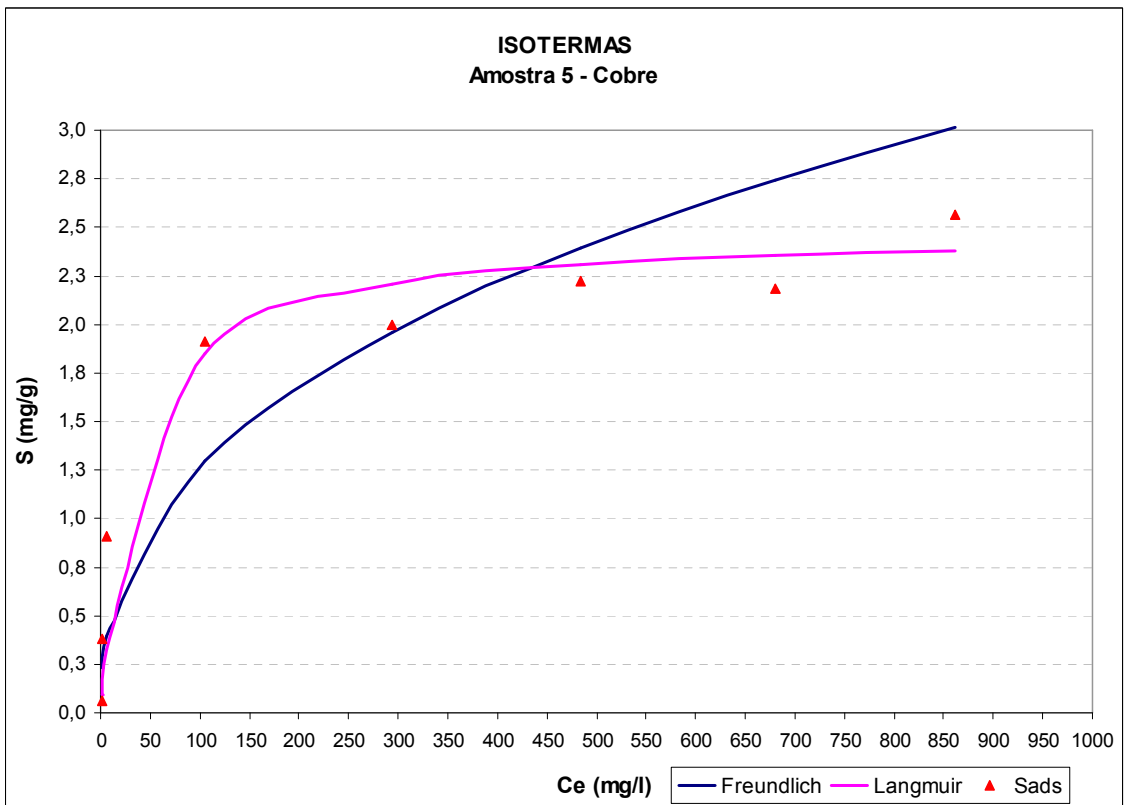
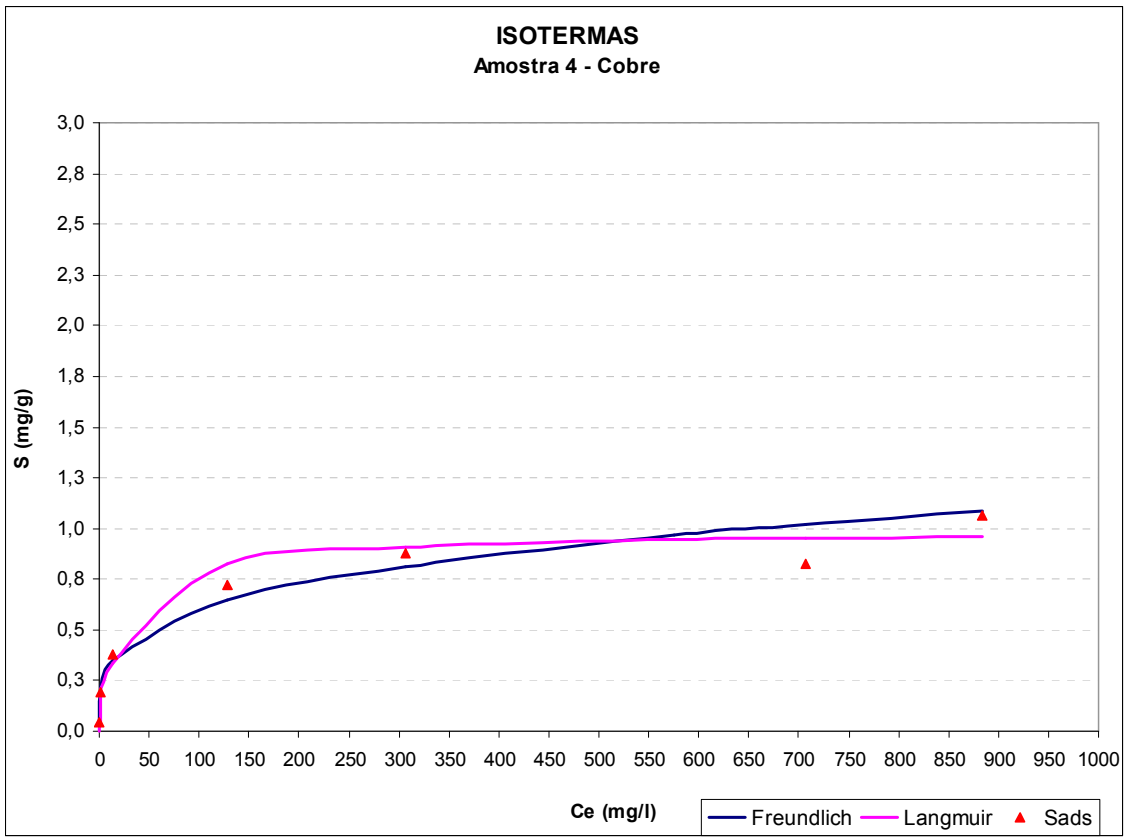


Figura 6.3: Isotermas – Cobre

### 6.3. CONCLUSÕES PARCIAIS

Não foi possível a obtenção de um background da área de destruição e seu entorno. O estudo realizado pela UFRRJ apontou a existência de metais em regiões distantes do centro da área de destruição e seu entorno.

Os ensaios foram realizados em condições competitivas. A partir dos resultados de análises químicas obtidos anteriormente constatou-se a presença de vários metais em concentrações diferentes.

A isoterma que mais se ajustou foi a de Langmuir. Exceto para o solo 2 em contato com a solução de Cobre que apresentou valor mais alto de  $R^2$  para o modelo de Freundlich. O modelo de Langmuir adota como hipótese energia de adsorção constante, não ocorrendo interação entre as moléculas adsorvidas. A adsorção se dá em locais definidos, o que significa que não há movimento da molécula na superfície do adsorvente. Foi desenvolvida com a concepção que existe um limite máximo na capacidade de adsorção do solo com o aumento de concentração do soluto.

O solo 2 apresentou  $\text{pH} = 5,23$ ,  $C_{\text{orgânico}} = 5,60 \text{ g/kg}$ ,  $\text{CTC} = 20,2$ , sendo 83% de íons  $\text{H}^+$ . Textura areno-argilosa. Granulometria com 28% de argila, 40% de silte, 34% de areia e  $w_L = 72$  e  $w_P = 33$ , classificada pelo SUCS como CH- argila com alta plasticidade. Visualmente identificado como residual, localizado no lado fireito no entorno da área de destruição. Na composição mineralógica predomina a caulinita. Também foram verificadas as ocorrências de mica, vermiculita, interestratificado mica-vermiculita, goethita e gibbsita.

O solo 3 apresentou  $\text{pH} = 4,5$ ,  $C_{\text{orgânico}} = 60,9 \text{ g/kg}$ ,  $\text{CTC} = 32,9$ , sendo 82% de íons  $\text{H}^+$ . Textura areno-argilosa. Granulometria com 30% de argila, 45% de silte, 24% de areia,  $w_L = 55$  e  $w_P = 22$ , também foi classificada como CH- argila com alta plasticidade. Visualmente identificado como sedimento orgânico, localizado na planície de inundação do córrego a jusante da área de destruição. Composição mineralógica semelhante a so solo 2, com exceção da goethita que não foi verificada.

De acordo com os de  $K_d$  obteve-se a seguinte ordem de afinidade para o solo 3:  $\text{Pb} > \text{Cu}$  e para o solo 2  $\text{Pb} \gg \text{Cu}$ . O valor de  $K_d$  obtido no solo 2 na presença de Cu foi bem menor que no solo 3. O Pb apresentou valores altos em ambos os solos, sendo o maior no solo 3.

A MO juntamente com o pH influenciou os valores de  $K_d$  dos elementos Cu e Pb. O comportamento do solo 3 reflete a importância dos óxidos de Mn, Al e Fe e do teor de MO na determinação do  $K_d$ .

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISA FUTURA

### 7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- As principais técnicas utilizadas pelo EB na destruição de munições e explosivos são a queima e a detonação a céu aberto executadas diretamente no solo. A explosão em si representa a principal contribuição no impacto associado à alternativa de detonação aberta.
- Além dos compostos formam as munições e explosivos, peças que ficam parcialmente destruídas também contribuem para a contaminação do meio. Foram investigados os potenciais contaminantes : Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Cd, Sb, Ba, Cu e Pb, priorizando as análises com Cu e Pb, validando os resultados obtidos em estudos realizados anteriormente.
- A área em estudo está localizada na bacia hidrográfica do Rio Guandu , o clima predominante é essencialmente tropical chuvoso. Apresenta relevo ondulado a montanhoso e planícies alúvio-coluvionares. Essas informações balizaram o levantamento topográfico.
- Quanto ao fluxo, verificamos um afloramento de lençol no centro da área e a jusante localizamos um corpo hídrico , provavelmente o receptor da maior parcela do escoamento superficial da área de destruição. Este canal é um tributário indireto do de um dos formadores do Rio Guandu.
- Quanto a caracterização física, química e mineralógica o solo 2 apresentou pH = 5,23, Corgânico = 5,60 g/kg, CTC = 20,2, sendo 83% de íons H<sup>+</sup>. Textura areno-argilosa. Granulometria com 28% de argila, 40% de silte, 34% de areia e wL = 72 e wP = 33, classificada pelo SUCS como CH- argila com alta plasticidade. Visualmente idenificado como residual, localizado no lado fireito no entorno da área de destruição. Na composição mineralógica predomina a caulinita. Também foram verificadas as ocorrências de mica, vermiculita, interestratificado mica- vermiculita, goethita e gibbsita.
- E o solo 3 apresentou pH = 4,5, Corgânico = 60,9 g/kg, CTC = 32,9, sendo 82% de íons H<sup>+</sup>. Textura areno-argilosa. Granulometria com 30% de argila, 45% de silte, 24% de areia, wL = 55 e wP = 22, também foi classificada como CH- argila com alta plasticidade. Visualmente idenificado como sdimento orgânico, localizado na planície de inundação do córrego a jusante da área de

destruição. Composição mineralógica semelhante a so solo 2, com exceção da goethita que não foi verificada.

- O solo 2 apresentou CTC 20, 2 cmolc/kg e o solo 3, 32,9 cmolc/kg. Ambas bem superiores ao da caulinita, o argilo mineral predominante em ambos os solos. A presença de MO e os óxidos de Fe e Al contribuem para possível retenção de metais em ambos os solos, mas evidente no solo 3 devido a taxa de MO. A presença de minerais de alta atividade como a vermiculita, por exemplo, mesmo em baixas concentrações, também pode contribuir para aumentar a CTC.
- Segundo os índices da atividade das argilas, proposto por Skempton, a argila do solo 2 com 1,39 foi considerada de alta atividade e a do solo 3 com 1,1, atividade moderada.
- Os valores obtidos para pH em água são considerados fortemente ácidos. A variação entre o pH em água e em KCl ( $\Delta\text{pH} = \text{pHKCl} - \text{pHH}_2\text{O}$ ) para o solo 2 é -1,19 e para o solo 3 é -0,72. O resultado negativo indica retenção de cátions, já no caso do solo 3, o valor está próximo de Zero, o que significa que as cargas superficiais estão em equilíbrio.
- O teor de matéria orgânica do solo 2 (AM4J) é de 0,56% e do solo 3 (AM5G) é de 6,09%. O solo 3 é um sedimento arenoso orgânico da planície de inundação do córrego a jusante da área de destruição.
- Altos teores de Fe e Mn foram apontados principalmente na fração residual. Cu e Pb aparecem com teores significativos na fração trocável e redutora Nos solos 1 e 3.
- O Pb obteve as parcelas mais significativas na fração de óxidos de ferro e manganês. No solo 2 obteve os maiores teores na parcela residual e em seguida na redutora.
- Os teores mais significativos do Cu foram detectados na parcela trocável e a maior concentração ocorreu no solo 3, que apresentou o maior teor de MO. Também apresentou um comportamento coerente; além da ligação com substâncias orgânicas apresentou baixa mobilidade para os pontos analisados.
- O estudo da PUC-Rio não detectou contaminação devido a presença de compostos orgânicos. Os estudos da UFRRJ, apontaram contaminação elevada de Pb e moderada de Cd e Cu. Os resultados obtidos nessa pesquisa validam a conclusão investigação anterior.

- O levantamento geofísico facilitou o entendimento da dimensão dos impactos produzidos pela destruição de munições e explosivos no subsolo. Os resultados apontaram a predominância do impacto físico. A ordem de grandeza dos impactos associados à explosão é superior à dos impactos associados à presença de contaminação.
- Devido ao risco de acidentes o método geofísico se apresentou como uma ferramenta mais adequada para a complementação do perfil geológico-geotécnico nessa área em particular. Nos pontos onde também foram realizadas SPT foi possível uma correlação com as camadas identificadas e o NA.
- Não foi possível a obtenção de um background da área de destruição e seu entorno. O estudo realizado pela UFRRJ apontou a existência de metais em regiões distantes do centro da área de destruição e seu entorno.
- Os ensaios foram realizados em condições competitivas. A partir dos resultados de análises químicas obtidos anteriormente constatou-se a presença de vários metais em concentrações diferentes.
- A isoterma que mais se ajustou foi a de Langmuir. Exceto para o solo 2 em contato com a solução de Cobre que apresentou valor mais alto de R2 para o modelo de Freundlich.
- De acordo com os valores de Kd obteve-se a seguinte ordem de afinidade para o solo 3: Pb>Cu e para o solo 2 Pb>>Cu. O valor de Kd obtido no solo 2 na presença de Cu foi bem menor que no solo 3. O Pb apresentou valores altos em ambos os solos, sendo o maior no solo 3.
- A MO juntamente com o pH influenciou os valores de Kd dos elementos Cu e Pb. O comportamento do solo 3 reflete a importância dos óxidos de Mn, Al e Fe e do teor de MO na determinação do Kd.

## **7.2. SUGESTÕES PARA PESQUISA**

- Estudar uma metodologia de investigação ambiental específica para destruição de munições e explosivos de uso militar contemplando suas especificidades;

Uma vez que um explosivo apresenta indícios de instabilidade química ele deve ser destruído imediatamente. Devido ao risco de auto-ignição não é inserido no processo de reciclagem. Muitos países não dispõem de tecnologia apropriada para

antever problemas como esse. Recentemente o Exército montou um laboratório de microcalorimetria capacitado para monitorar esses efeitos. Mesmo com esse avanço ainda precisamos monitorar muitos outros fenômenos específicos envolvidos nessas atividades. Incluindo análise de risco e estudo de caso da análise do Ciclo de Vida de algum tipo de munição/explosivo com o intuito de prever projetos sustentáveis de reciclagem.

A detonação aberta sem reciclagem de metais é a pior alternativa para a destruição de munições para quase todas as categorias de avaliação do impacto ambiental. A adição de reciclagem de metais para a opção de detonação aberta melhora o seu desempenho ambiental significativamente nas categorias de maior impacto, ficando nivelada com as outras opções de destruição.

- Realizar ensaios de Batelada;

A repetibilidade de ensaios com representatividade de amostras. Considerando a indisponibilidade de background na área de destruição, considero pertinente a realização de Ensaios de Extração seqüencial antes e de depois do Batch Test.

- Realizar análise de contaminantes orgânicos;

A probabilidade de existir contaminantes orgânicos é considerável. Estudos revelam algumas limitações na detecção de alguns tipos de orgânicos presentes em armamentos, com isso a realização mais ensaios, cobrindo toda a área de destruição é muito importante para a investigação geoambiental da região.

- Realizar um Levantamento Geofísico em 3D;

A técnica foi eficiente e apropriada às limitações da área estudada. Um levantamento 3D em conjunto com a modelagem Hidrogeológica será fundamental para o entendimento do cenário e determinação dos fluxos que permeiam os metais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 14545*: Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos à Carga Variável, 2000.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6457*: Solos-Preparação para ensaios de compactação e caracterização, 1986.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6459*: Determinação do limite de liquidez, 1984.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6484*:. Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio, 2001.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6508*: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, 1984
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7180*: Determinação do limite de Plasticidade, 1984
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7181*: Análise granulométrica, 1984.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 9604*: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas, 1986.
- ALMEIDA, T.L., 2009, *Implicações Ambientais dos Processos de Atenuação de Lixiviado em locais de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Paulo, SP, Brasil.
- ALVERBROA, K., BJÖRKLUNDA, A., FINNVEDENA, G., HOCHSCHORNERA, E., HÄGVALL, J. B., 2009, "A life cycle assessment of destruction of ammunition", In: *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, n.170, p.1101–1109.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B., 2008, *Avaliação da Contaminação por Metais Pesados de Área de Destruição de Munição e do seu Entorno no Depósito Central de Munição do Exército Brasileiro*, Relatório Final do Projeto, FAPUR-UFRRJ, Paracambi, RJ. (Divulgação Restrita).
- BERTHELOT, Y., EMELINE, V., AURÉLIE A., BERTIN, T., ROBIDOUX, P., Y., 2008, "Integration of toxicological and chemical tools to assess the bioavailability of metals and energetic compounds in contaminated soils". In: *Chemosphere*, n.74, p.66–177.
- BOSCOV, M. E. G., 1997, *Contribuição ao projeto de sistemas de contenção de resíduos perigosos utilizando solos lateríticos*, Tese de D.Sc., USP, São Paulo, Brasil.
- BRUM, T., 2010, *Técnicas de Remediação Ambiental de Áreas Contaminadas por Explosivos*, Dissertação de M.Sc., Engenharia de Defesa/Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CHAVES, L.H.G., BRITO, M.E.B. CARVALHO, A.P., et al., 2009, "Adsorção de cobre em amostras de Plintossolo do Estado do Piauí, com diferentes características", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.3, p.226–232.



- CRESCÊNCIO JÚNIOR, F., 2008, *Estudo de Turfas em Laboratório como Barreira Reativa na Remediação de Aqüíferos*. Dissertação de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DALGREN, K., E., WAARA, S., DÜKER, A., VON KRONHELM, T., VAN HEES, P., A., W., 2009, “Anaerobic Bioremediation of a Soil With Mixed Contaminants: Explosives Degradation and Influence on Heavy Metal Distribution, Monitored as Changes in Concentration and Toxicity”. In: *Water Air Soil Pollut*, n.202, p.301–313, doi:10.1007/s11270-009-9977-z.
- DEMUELENAERE, R. G. A., 2004, *Caracterização de Propriedades de Transporte de Metais Pesados em Solos Residuais do Rio de Janeiro*, Dissertação de M.Sc., Departamento de Engenharia Civil/Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER-IE005, 1994
- DUIJM, N. J., 2001, “Hazard analysis of technologies for disposing explosive waste”, In: *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, n.A90, p.123–135.
- EMBRAPA, 1999, *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Embrapa Solos
- FADIGAS ,F.S., AMARAL SOBRINHO, N. M. B., MAZUR, N., et al., 2002, “Concentrações Naturais de Metais Pesados em Algumas Classes de Solos Brasileiros”, In: *Bragantia-Revista de Ciências Agrônômicas*, v.61, n.2, p.151–159.
- FADIGAS, F.S., AMARAL SOBRINHO, N. M. B., MAZUR, N., et al., 2006, “Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros”, In: *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.3 (Jan), p.699–705.
- FORTUNATO, J. M., 2009, *Comportamento dos íons Chumbo, Níquel e Zinco em Área de Manguezal associado a Antigo Lixão no Município de Santos-SP*. Dissertação de M.Sc., Instituto de Geociências/USP, São Paulo, SP, Brasil.
- FREEZE, R. A., CHERRY, J. A., 1979, *Groundwater*. In: Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- GUEDES, J. N., 2009. *Diagnóstico e estudo da variabilidade espacial da contaminação por metais pesados em solos e águas superficiais de área de destruição de munição*. Dissertação de M.Sc., Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 68p.
- KABATA-PENDIA, A.; PENDIAS, H., 1984, “Soil constituents”. In: *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, Florida, p.33-50.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H., 2001, *Trace elements in soils and plants*. , CRC Press, Boca Raton , p. 315.
- LAURITZEN, E., K., STRAARUP, M., SÁNCHEZ, I., G., 2006, *Industrial Ammunition Stockpile Recovery: Saving Energy and Resources and Protecting the Environment*, capturado em: 5 de Outubro de 2010, <http://maic.jmu.edu/journal/10.2/focus/lauritzen/lauritzen.htm>

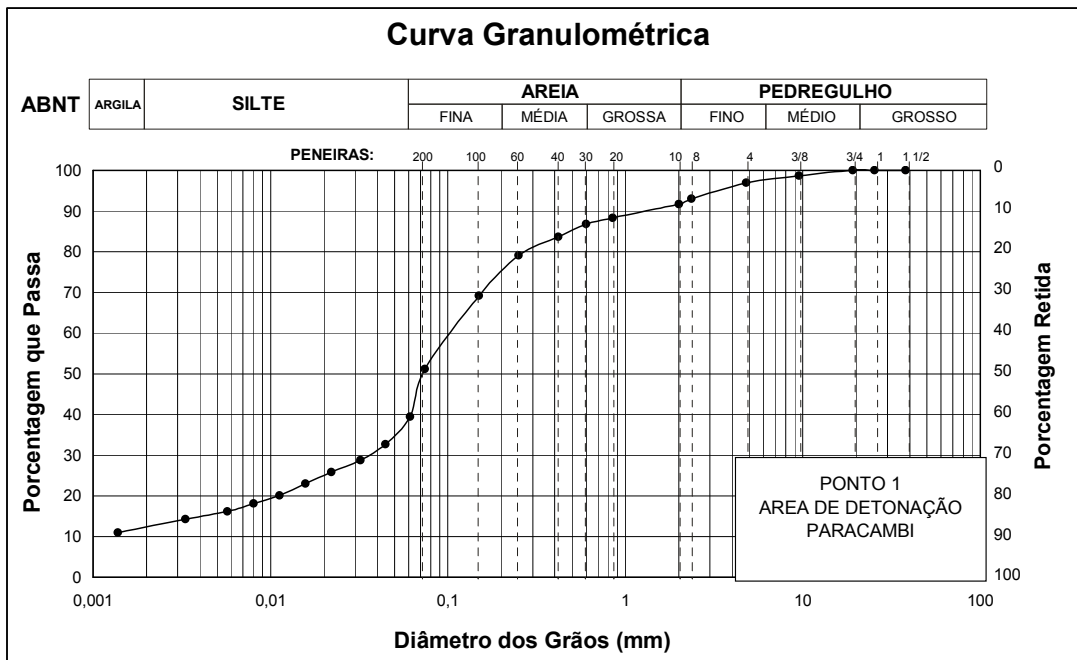
- LEWIS, T., A., NEWCOMBE, D., A., CRAWFORD, R., L., 2004, "Bioremediation of soils contaminated with explosives". In: *Journal of Environmental Management*, n. 70, p.291–307
- LIGHT, 2007, PCH Paracambi - Projeto Básico. In: Relatório Final, Volume I, Rio de Janeiro, 174p.
- MARTINS, A. P. S., 2005, *Estudo da Influência das Interações Físico-Químicas no Comportamento Mecânico de dois Solos Tropicais do Município de Ouro Preto - MG*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MATOS, A.T.; FONTES, M.P.F.; JORDÃO, C.P.; da COSTA, L.M., 1996, "Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em Latossolo Vermelho-Amarelo", *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.20, p.379-386.
- MENDONÇA, R.M.G., 2000, *Transporte e Retenção de Ânions em Solo Tropical Residual Saprolítico do Estado do Rio de Janeiro*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MIRANDA NETO, M.I., 2002, *Investigação Geoambiental em Área de Mangue na Baía de Guanabara Contaminada com Resíduos Industriais*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MONDELLI, G., 2008, *Integração de diferentes técnicas de Investigação para Avaliação da poluição e contaminação de uma área de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Paulo, SP, Brasil.
- NAMSA, NATO Maintenance and Supply Agency, 2010 *Environmental Related Projects Catalogue*. General Services Program, NATO- North Atlantic Treaty Organisation, capturado em: 5 de outubro de 2010, [www.namsa.nato.int](http://www.namsa.nato.int)  
[www.namsa.nato.int/FLYER\\_ENVIRONMENTAL\\_EN.pdf](http://www.namsa.nato.int/FLYER_ENVIRONMENTAL_EN.pdf).
- PAIVA, K., 2009, *Special Topics in Water Flow and Contaminant Transport*. Programa de Engenharia Civil, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO – PUC RJ, 2008, *Avaliação de compostos Nitroaromáticos em Amostras de Solo nas Dependências da Área de Destruição de Munição e no Entorno do Depósito Central de Munição do Exército Brasileiro*, Relatório Conclusivo: PUC - UFRJ, Paracambi, RJ. (Divulgação Restrita).
- PUC/RIO-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008, *Relatório de Contaminação por Compostos Orgânicos Aromáticos no DCMun*. Rio de Janeiro. (Divulgação Restrita).
- ROSA, A.R., 1995. *Crítérios para seleção de micróbacias experimentais: Bacia Hidrográfica da Baía de Sepetiba*. Dissertação de M.Sc., Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 70p.
- SALAMENE, S., 2007, *Estratificação e caracterização ambiental da Área de Preservação Permanente do rio Guandu*. Dissertação de M.Sc., Instituto de Florestas Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brasil.
- SOARES, M. R., 2004, *Coeficiente de Distribuição da (KD) de metais pesados em Solos do Estado de São Paulo*. Tese de D.Sc., Escola Superior de Agricultura

- SOUZA, A.A.C., 2001, *Investigação Geoambiental em Solos Argilosos Contaminados por Resíduos de Petróleo*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SOUZA, L. A. P., 2006, *Revisão Crítica da Aplicabilidade dos Métodos Geofísicos na Investigação de Áreas Submersas Rasas*. Tese de D.Sc., Instituto Oceanográfico/USP, São Paulo, SP, Brasil.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency, 1992, *Understanding Variation in Partition Coefficient, K<sub>d</sub>, Values – Volume I: The K<sub>d</sub> Model, Methods of Measurements and Application of Chemical Reaction Codes*, EPA/402-R-99-004A. Office of Air and Radiation, Washington. 212p.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency, 1992a, *Technical Resource Document: Batch-type Procedures for Estimating Soil Adsorption of Chemicals*, EPA/530-SW-87-006-F. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington. 100p.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency, 1993, *Seminar on Technologies for Remediating Sites Contaminated with Explosive and Radioactive Wastes*, EPA/625/K-93/001. In: Office of Research and Development, Washington, USA
- USEPA, United States Environmental Protection Agency, 1999, "Partition Coefficients For Lead". In: Office of Radiation and Indoor Air, U.S. Environmental Protection Agency. *Understanding Variation In Partition Coefficient, K<sub>d</sub>, Values- Volume II*, EPA 402-R-99-004B, Appendix F, Washington, DC 205, USA.
- VIEIRA, I.S., 1988, *Manual da Ciência do Solo: Com Ênfase em Solos Tropicais*. 2 ed. São Paulo, SP, Brasil, Ed. Agronômica Ceres.

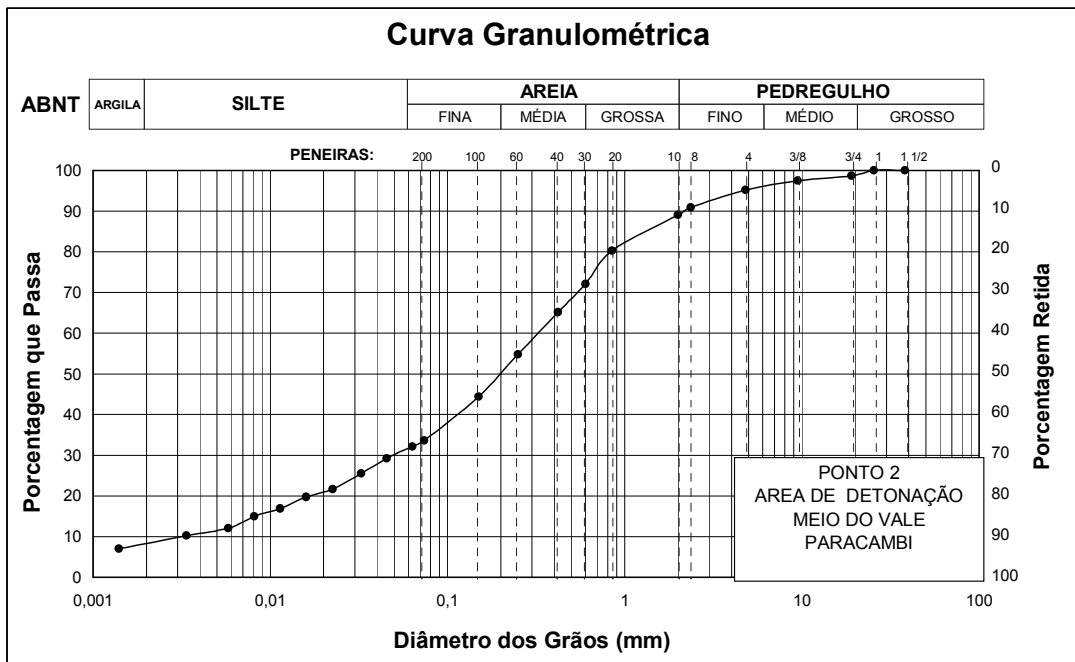
# ANEXOS

## ANEXO 1: Análises Granulométricas

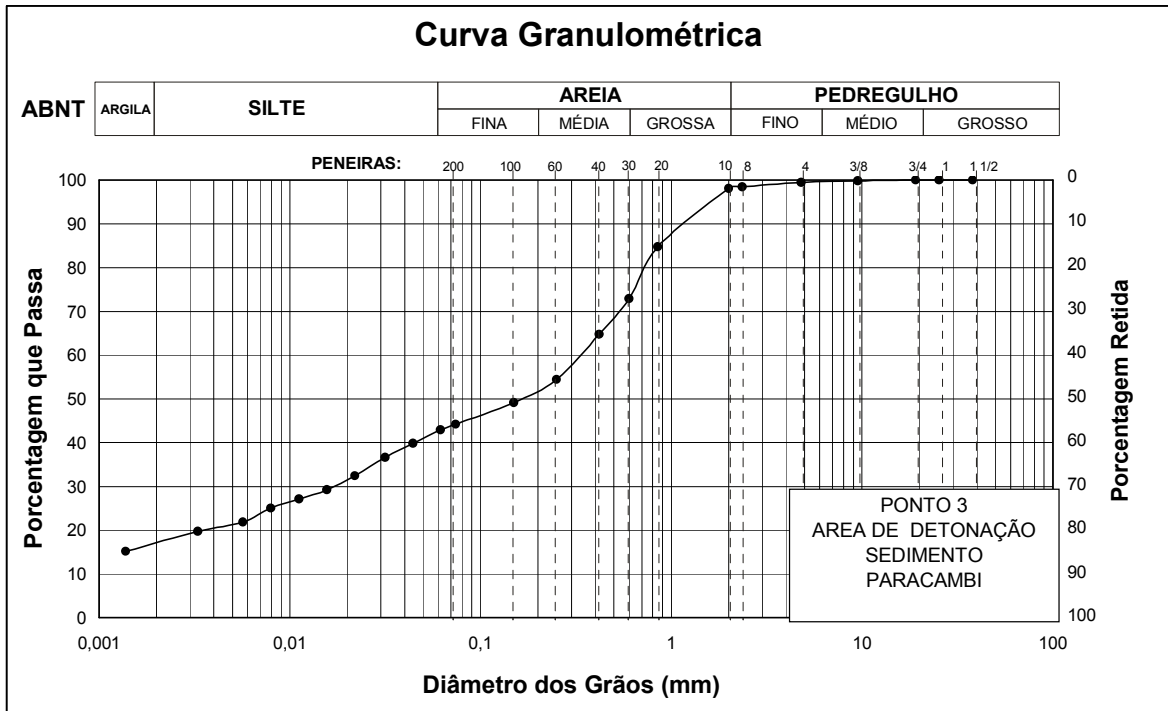
AMOSTRAS DA 1ª CAMPANHA



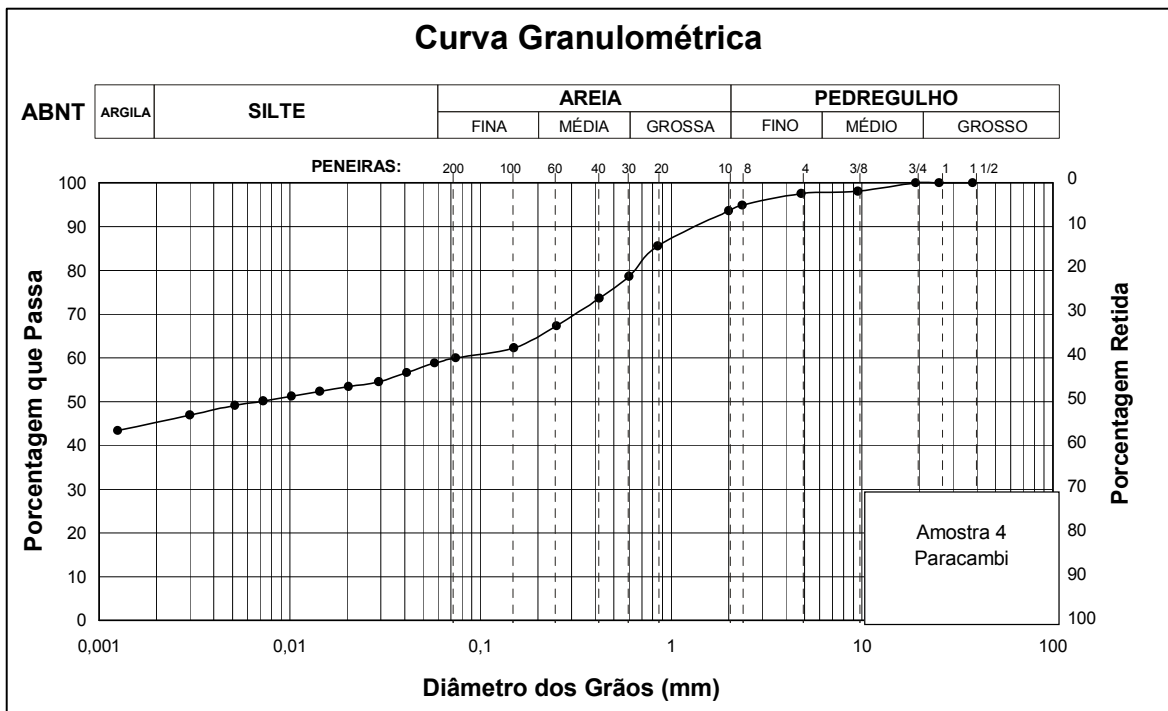
| Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) |       |       |       |        |            |
|---|-------|-------|-------|--------|------------|
| Argila                                      | Silte | Areia |       |        | Pedregulho |
|   |       | Fina  | Média | Grossa |            |
| 12  | 27    | 36    | 12    | 5      | 8          |



| Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) |       |       |       |        |            |
|---|-------|-------|-------|--------|------------|
| Argila                                      | Silte | Areia |       |        | Pedregulho |
|   |       | Fina  | Média | Grossa |            |
| 8   | 23    | 19    | 22    | 17     | 11         |

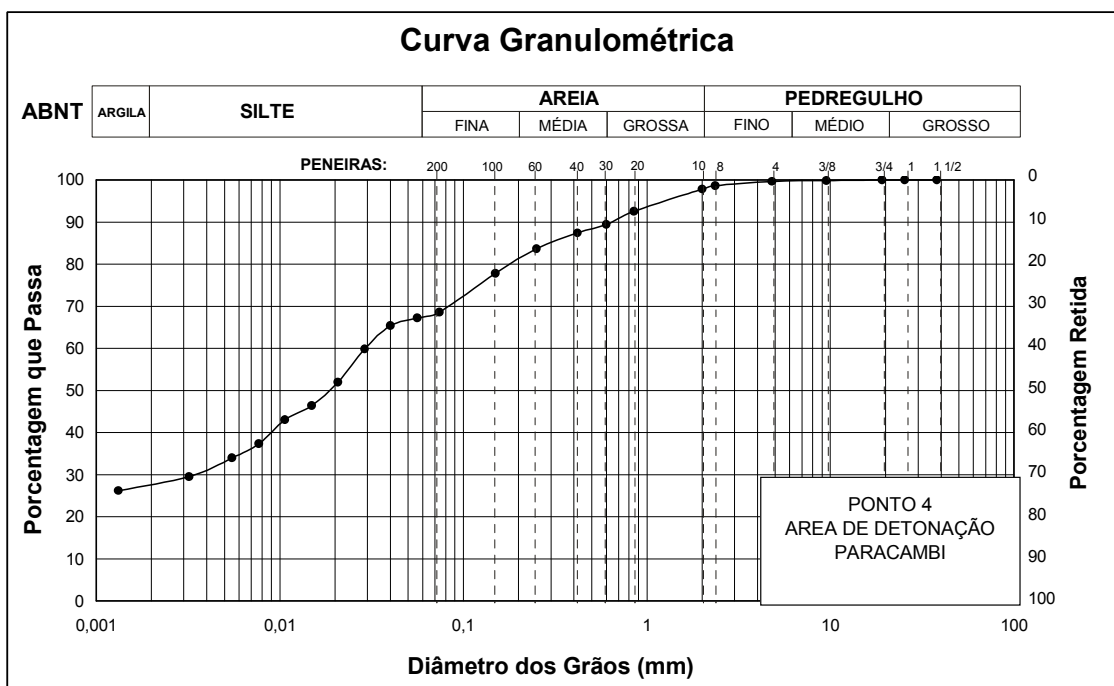


| Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) |       |       |       |        |            |
|---|-------|-------|-------|--------|------------|
| Argila                                      | Silte | Areia |       |        | Pedregulho |
|   |       | Fina  | Média | Grossa |            |
| 17  | 26    | 9     | 21    | 25     | 2          |

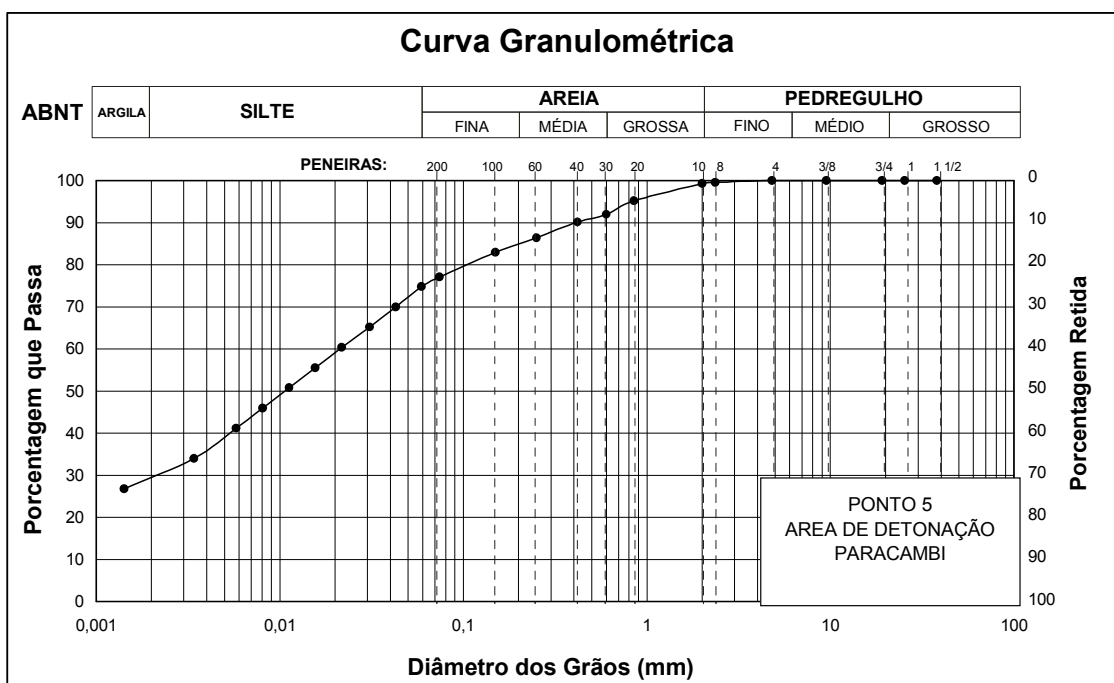


| Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) |       |       |       |        |            |
|---|-------|-------|-------|--------|------------|
| Argila                                      | Silte | Areia |       |        | Pedregulho |
|   |       | Fina  | Média | Grossa |            |
| 45  | 14    | 6     | 14    | 15     | 6          |

AMOSTRAS DA 2ª CAMPANHA



| Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) |       |       |       |        |            |
|---|-------|-------|-------|--------|------------|
| Argila                                      | Silte | Areia |       |        | Pedregulho |
|   |       | Fina  | Média | Grossa |            |
| 28  | 40    | 14    | 8     | 8      | 2          |



| Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) |       |       |       |        |            |
|---|-------|-------|-------|--------|------------|
| Argila                                      | Silte | Areia |       |        | Pedregulho |
|   |       | Fina  | Média | Grossa |            |
| 30  | 45    | 10    | 7     | 7      | 1          |

## ANEXO 2: Limites de Atterberg

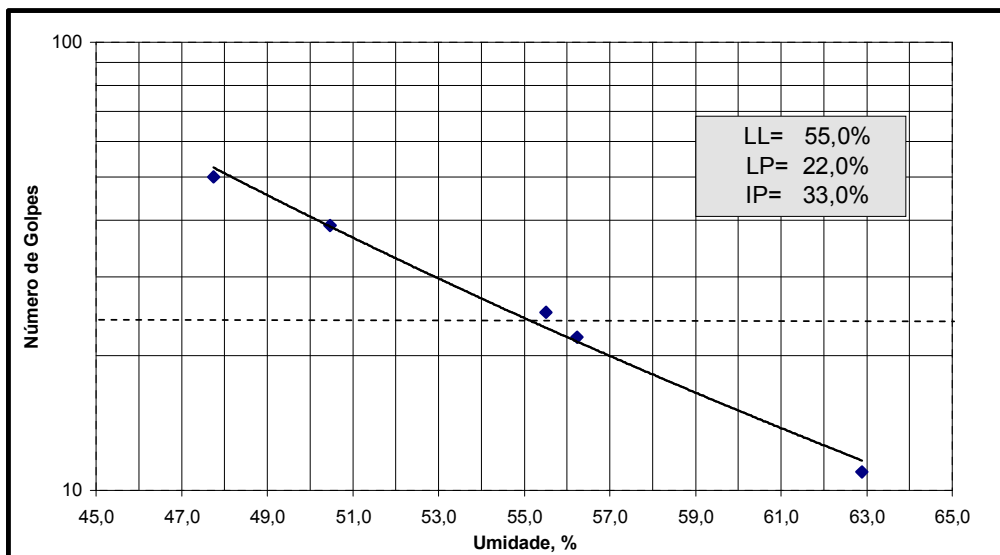
Solo 2 – ponto 4

| <b>LIMITES DE ATTERBERG</b>   |             |       |       |       |   |       |       |          |       |       |       |
|-------------------------------|-------------|-------|-------|-------|---|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| <b>LIMITE DE PLASTICIDADE</b> |             |       |       |       |   |       |       |          |       |       |       |
| Número da Cápsula             |             | 2     | 16    | 21    | 7   | 23    |       |          |       |       |       |
| O<br>S<br>E<br>P              | Total Úmido | 9,83  | 9,71  | 10,05 | 10,27                                       | 10,16 |       |          |       |       |       |
|                               | Total Seco  | 9,46  | 9,35  | 9,64  | 9,86  | 9,79  |       |          |       |       |       |
|                               | Cápsula     | 8,34  | 8,24  | 8,36  | 8,60  | 8,66  |       |          |       |       |       |
|                               | Água        | 0,37  | 0,36  | 0,41  | 0,41  | 0,37  |       |          |       |       |       |
|                               | Solo Seco   | 1,12  | 1,11  | 1,28  | 1,26  | 1,13  |       |          |       |       |       |
| Umidade (%)                   |             | 33,04 | 32,43 | 32,03 | 32,54                                       | 32,74 |       |          |       |       |       |
| Limite de Plasticidade        |             | 32,56 |       |       |   |       |       |          |       |       |       |
| <b>LIMITE DE LIQUIDEZ</b>     |             |       |       |       |   |       |       |          |       |       |       |
| Número de Golpes              |             | 40    |       | 28    |   | 19    |       | 13       |       |       |       |
| Número da Cápsula             |             | 858   | 45    | 828   | 866   | 598   | 643   | 663      | 860   | 853   | 707   |
| O<br>S<br>E<br>P              | Total Úmido | 17,60 | 15,15 | 16,62 | 17,95                                       | 17,34 | 18,43 | 16,49    | 17,17 | 17,63 | 16,12 |
|                               | Total Seco  | 15,96 | 13,62 | 14,93 | 15,97                                       | 15,52 | 16,39 | 15,13    | 15,41 | 15,74 | 14,59 |
|                               | Cápsula     | 13,74 | 11,56 | 12,50 | 13,09                                       | 12,99 | 13,54 | 13,28    | 13,03 | 13,26 | 12,58 |
|                               | Água        | 1,64  | 1,53  | 1,69  | 1,98  | 1,82  | 2,04  | 1,36     | 1,76  | 1,89  | 1,53  |
|                               | Solo Seco   | 2,22  | 2,06  | 2,43  | 2,88  | 2,53  | 2,85  | 1,85     | 2,38  | 2,48  | 2,01  |
| Umidade (%)                   |             | 73,9  | 74,3  | 69,5  | 68,7  | 71,9  | 71,6  | 73,5     | 73,9  | 76,2  | 76,1  |
| Umidade Média (%)             |             | 69,1  |       | 71,8  |   | 73,7  |       | 76,2     |       |       |       |
|                               |             |       |       |       |   |       |       |          |       |       |       |
| <b>COPPE/UFRJ</b>             |             |       |       |       | <b>PROGRAMA DE ENGENHARIA CIVIL</b>         |       |       |          |       |       |       |
| ALUNA: ALESSANDRA             |             |       |       |       | LAB. DE GEOTECNIA - SETOR DE CARACTERIZAÇÃO |       |       |          |       |       |       |
| PROFESSOR:                    |             |       |       |       | AMOSTRA: PONTO 4                            |       |       |          |       |       |       |
| OPERADOR L CARLOS             |             |       |       |       |   |       |       |          |       |       |       |
| RECEBIDO EM ___/___/___       |             |       |       |       | DATA: 10/6/2010                             |       |       | REG.LAB. |       |       |       |

**LIMITES DE ATTERBERG**

| LIMITE DE PLASTICIDADE |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Número da Cápsula      | 8     | 15    | H     | 20    | 3     |
| (g) Total Úmido        | 10,33 | 9,94  | 13,49 | 10,43 | 10,11 |
| O Total Seco           | 10,02 | 9,64  | 13,19 | 10,10 | 9,81  |
| S Cápsula              | 8,59  | 8,27  | 11,83 | 8,58  | 8,41  |
| W Água                 | 0,31  | 0,30  | 0,30  | 0,33  | 0,30  |
| L Solo Seco            | 1,43  | 1,37  | 1,36  | 1,52  | 1,40  |
| Umidade (%)            | 21,68 | 21,90 | 22,06 | 21,71 | 21,43 |
| Limite de Plasticidade | 21,75 |       |       |       |       |

| LIMITE DE LIQUIDEZ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Número de Golpes   | 50    |       | 39    |       | 25    |       | 22    |       | 11    |       |
| Número da Cápsula  | 13    | 8     | 42    | 39    | 222   | 36    | 91    | A     | 43    | 28    |
| (g) Total Úmido    | 15,63 | 13,13 | 11,19 | 12,40 | 11,87 | 14,26 | 12,39 | 13,70 | 12,45 | 14,37 |
| O Total Seco       | 13,87 | 11,49 | 9,83  | 10,75 | 10,55 | 12,51 | 11,03 | 12,26 | 10,74 | 12,64 |
| S Cápsula          | 10,21 | 8,03  | 7,11  | 7,51  | 8,17  | 9,36  | 8,62  | 9,69  | 8,03  | 9,88  |
| W Água             | 1,76  | 1,64  | 1,36  | 1,65  | 1,32  | 1,75  | 1,36  | 1,44  | 1,71  | 1,73  |
| L Solo Seco        | 3,66  | 3,46  | 2,72  | 3,24  | 2,38  | 3,15  | 2,41  | 2,57  | 2,71  | 2,76  |
| Umidade (%)        | 48,1  | 47,4  | 50,0  | 50,9  | 55,5  | 55,6  | 56,4  | 56,0  | 63,1  | 62,7  |
| Umidade Média (%)  | 47,7  |       | 50,5  |       | 55,5  |       | 56,2  |       | 62,9  |       |



|                      |   |          |
|----------------------|---|----------|
| <b>COPPE/UFRJ</b>    | <b>PROGRAMA DE ENGENHARIA CIVIL</b>         |          |
| ALUNA: ALESSANDRA    | LAB. DE GEOTECNIA - SETOR DE CARACTERIZAÇÃO |          |
| PROFESSOR:           | AMOSTRA: PONTO 5                            |          |
| OPERADOR L CARLOS    |   |          |
| RECEBIDO EM __/__/__ | DATA: 10/6/2010                             | REG.LAB. |



## ANEXO 3: Classificação do Solo

| <u>CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS</u> |       |                               |       |
|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| OPERADOR:                     |       | OBRA:DCMun                    |       |
| AMOSTRA: PONTO 4              |       | DATA:15/06/10                 |       |
| INTERESSADO:Alessandra        |       | VISTO:                        |       |
| <u>CARACTERIZAÇÃO DO SOLO</u> |       |                               |       |
| LIMITES                       |       | GRANULOMETRIA                 |       |
| Limite Liquidez (LL)          | 72    | % Passa Peneira 4 (4,8mm)     | 99,63 |
| LimitePlasticidade (LP)       | 33    | % Passa Peneira 10 (2,0mm)    | 97,85 |
| Índice de Plasticidade (IP)   | 39    | % Passa Peneira 40 (0,42mm)   | 87,39 |
|                               |       | % Passa Peneira 200 (0,075mm) | 68,62 |
|                               |       | Índice de Grupo (IG)          | 18,1  |
| <u>CLASSIFICAÇÃO</u>          |       |                               |       |
| CLASSIFICAÇÃO "HRB"           | A-7-5 | d10                           | 0     |
| CLASSIFICAÇÃO "SUCS"          | CH    | d30                           | 0     |
|                               |       | d60                           | 0     |

Solo 2

Solo 3

| <u>CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS</u> |       |                               |       |
|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| OPERADOR:                     |       | OBRA: DCMun                   |       |
| AMOSTRA: PONTO 5              |       | DATA:15/06/10                 |       |
| INTERESSADO:Alessandra        |       | VISTO:                        |       |
| <u>CARACTERIZAÇÃO DO SOLO</u> |       |                               |       |
| LIMITES                       |       | GRANULOMETRIA                 |       |
| Limite Liquidez (LL)          | 55    | % Passa Peneira 4 (4,8mm)     | 100   |
| LimitePlasticidade (LP)       | 22    | % Passa Peneira 10 (2,0mm)    | 99,29 |
| Índice de Plasticidade (IP)   | 33    | % Passa Peneira 40 (0,42mm)   | 90,1  |
|                               |       | % Passa Peneira 200 (0,075mm) | 77,11 |
|                               |       | Índice de Grupo (IG)          | 19,0  |
| <u>CLASSIFICAÇÃO</u>          |       |                               |       |
| CLASSIFICAÇÃO "HRB"           | A-7-6 | d10                           | 0     |
| CLASSIFICAÇÃO "SUCS"          | CH    | d30                           | 0     |
|                               |       | d60                           | 0     |

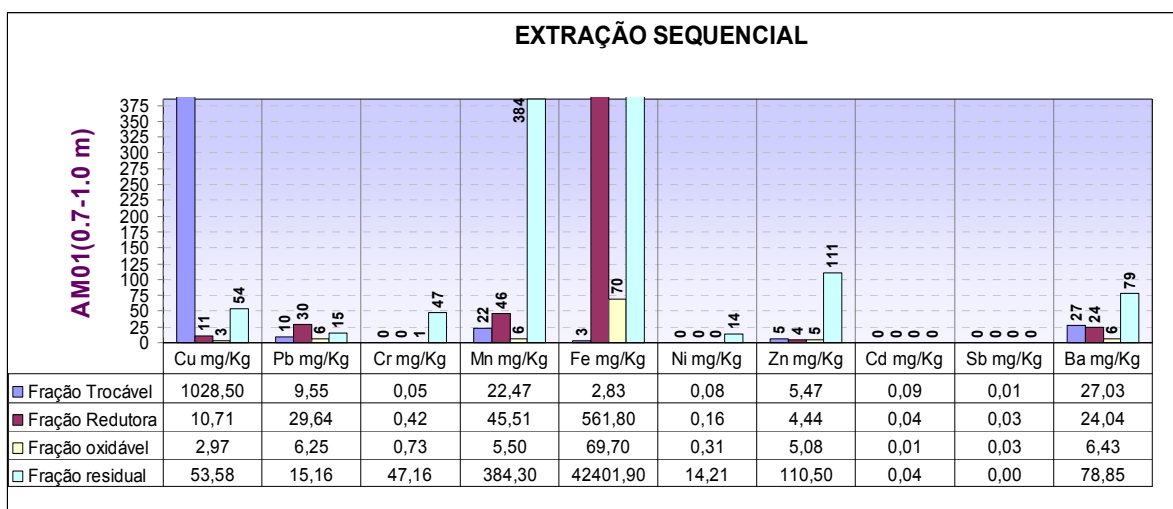
## ANEXO 4: Extração Sequencial

Valores obtidos na análise realizada na UFF

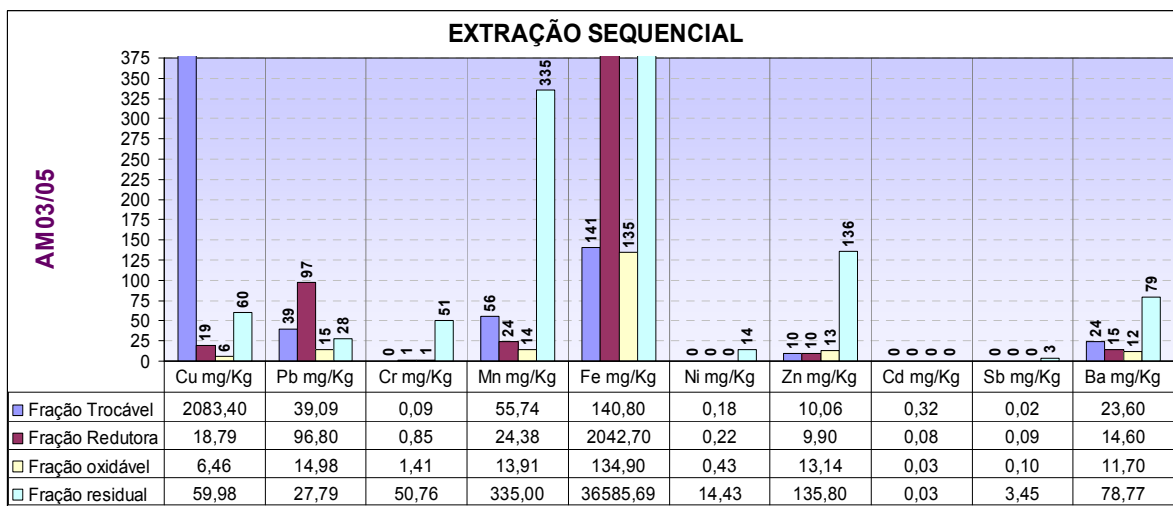
|                 | Amostras              | Cr mg/Kg | Mn mg/Kg | Fe mg/Kg | Ni mg/Kg | Cu mg/Kg | Zn mg/Kg | Cd mg/Kg | Sb mg/Kg | Ba mg/Kg | Pb mg/Kg |
|-----------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Fração Trocável | AM01(0.7-1.0 m)       | 0,05     | 22,47    | 2,83     | 0,08     | 1028,50  | 5,47     | 0,09     | 0,01     | 27,03    | 9,55     |
|                 | AM03/05               | 0,09     | 55,74    | 140,80   | 0,18     | 2083,40  | 10,06    | 0,32     | 0,02     | 23,60    | 39,09    |
|                 | AM04- A/B(0.2-0.3m)   | 0,08     | 3,21     | 4,30     | 0,10     | 31,00    | 1,90     | 0,00     | nd       | 6,99     | 0,41     |
|                 | AM04- C/D(0.45-0.55m) | 0,07     | 0,70     | 4,08     | 0,08     | 3,11     | 0,89     | 0,01     | nd       | 6,56     | 0,54     |
|                 | AM04-E (0.55-0.6m)    | 0,07     | 0,92     | 3,95     | 0,08     | 1,91     | 0,57     | nd       | nd       | 6,49     | 0,56     |
| Fração Redutora | AM01(0.7-1.0 m)       | 0,42     | 45,51    | 561,80   | 0,16     | 10,71    | 4,44     | 0,04     | 0,03     | 24,04    | 29,64    |
|                 | AM03/05               | 0,85     | 24,38    | 2042,70  | 0,22     | 18,79    | 9,90     | 0,08     | 0,09     | 14,60    | 96,80    |
|                 | AM04- A/B(0.2-0.3m)   | 0,40     | 3,63     | 229,10   | 0,08     | 0,75     | 0,80     | nd       | nd       | nd       | 2,69     |
|                 | AM04- C/D(0.45-0.55m) | 0,36     | 1,26     | 189,00   | 0,08     | 0,16     | 0,63     | nd       | nd       | nd       | 3,73     |
|                 | AM04-E(0.55-0.6m)     | 0,37     | 2,17     | 191,00   | 0,08     | 0,12     | 0,35     | nd       | nd       | nd       | 3,55     |
| Fração oxidável | AM01(0.7-1.0 m)       | 0,73     | 5,50     | 69,70    | 0,31     | 2,97     | 5,08     | 0,01     | 0,03     | 6,43     | 6,25     |
|                 | AM03/05               | 1,41     | 13,91    | 134,90   | 0,43     | 6,46     | 13,14    | 0,03     | 0,10     | 11,70    | 14,98    |
|                 | AM04- A/B(0.2-0.3m)   | 2,44     | 2,16     | 51,59    | 0,17     | 0,22     | 1,08     | nd       | nd       | 1,72     | 1,45     |
|                 | AM04- C/D(0.45-0.55m) | 2,82     | 1,67     | 63,23    | 0,22     | 0,23     | 3,06     | nd       | nd       | 2,28     | 2,91     |
|                 | AM04-E(0.55-0.6m)     | 2,45     | 1,60     | 48,02    | 0,21     | 0,15     | 1,33     | nd       | nd       | 2,15     | 1,92     |
| Fração residual | AM01(0.7-1.0 m)       | 47,16    | 384,30   | 4240,190 | 14,21    | 53,58    | 110,50   | 0,04     | nd       | 78,85    | 15,16    |
|                 | AM03/05               | 50,76    | 335,00   | 36585,69 | 14,43    | 59,98    | 135,80   | 0,03     | 3,45     | 78,77    | 27,79    |
|                 | AM04- A/B(0.2-0.3m)   | 52,44    | 137,00   | 43583,80 | 7,97     | 6,23     | 28,00    | 0,01     | nd       | 15,89    | 6,00     |
|                 | AM04- C/D(0.45-0.55m) | 70,82    | 154,50   | 54755,30 | 11,97    | 7,32     | 33,90    | 0,01     | nd       | 17,11    | 8,34     |
|                 | AM04-E(0.55-0.6m)     | 0,65     | 4,98     | 383,10   | 0,11     | 0,72     | 1,55     | nd       | nd       | 1,17     | 0,41     |
| TOTAL           | AM03/05               | 53,11    | 429,03   | 38904,09 | 15,26    | 2168,63  | 168,90   | 0,46     | 3,66     | 128,67   | 178,66   |
|                 | AM04- A/B(0.2-0.3m)   | 55,36    | 146,00   | 43868,79 | 8,32     | 38,20    | 31,78    | 0,01     |          | 24,60    | 10,55    |
|                 | AM04- C/D(0.45-0.55m) | 74,07    | 158,13   | 55011,61 | 12,35    | 10,82    | 38,48    | 0,01     |          | 25,95    | 15,52    |
|                 | AM04-E(0.55-0.6m)     | 3,54     | 9,67     | 626,07   | 0,48     | 2,90     | 3,80     |          |          | 9,81     | 6,44     |

Gráficos: Amostras x Metais

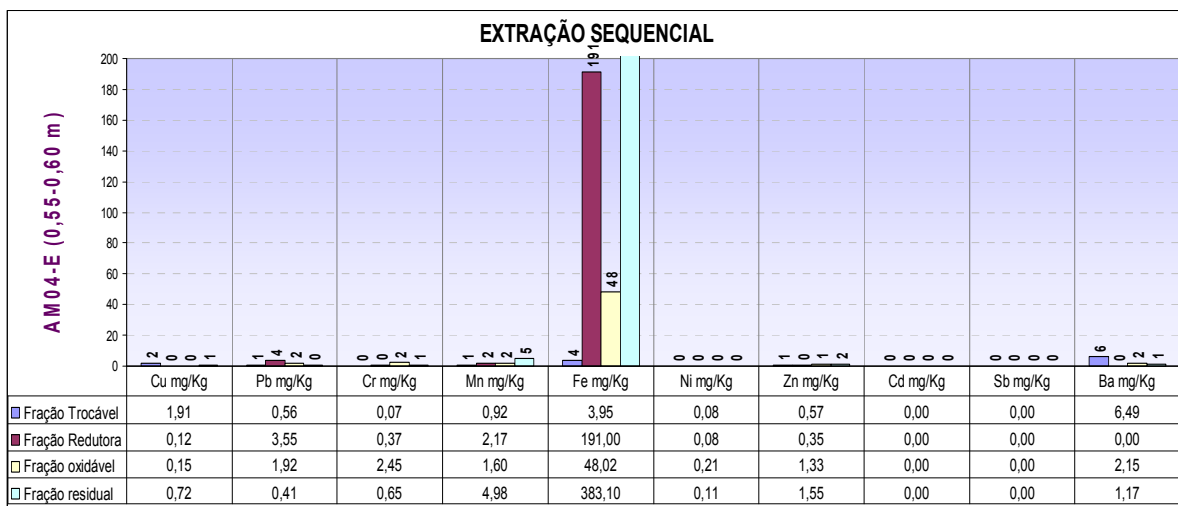
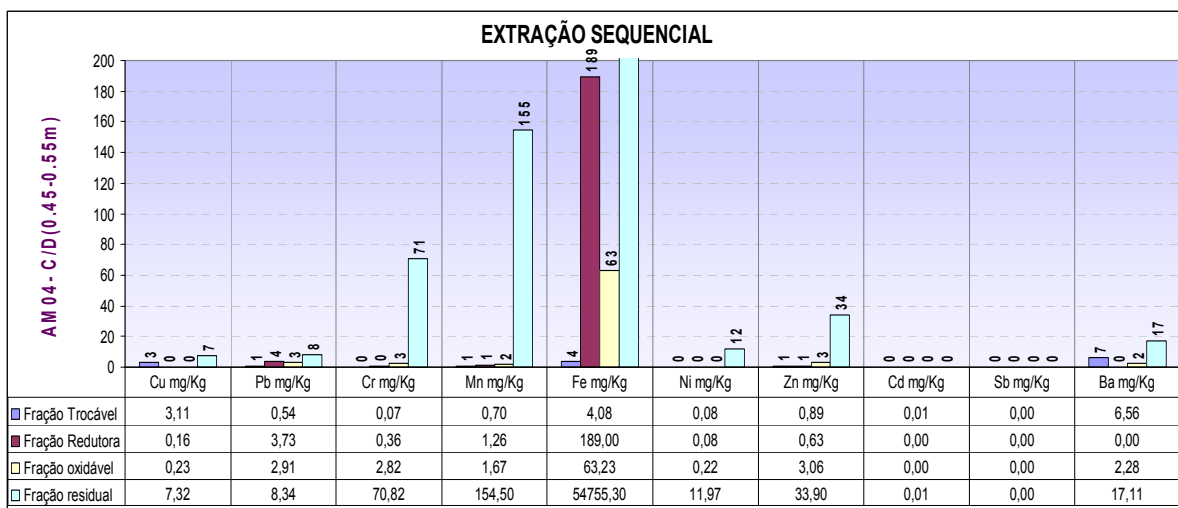
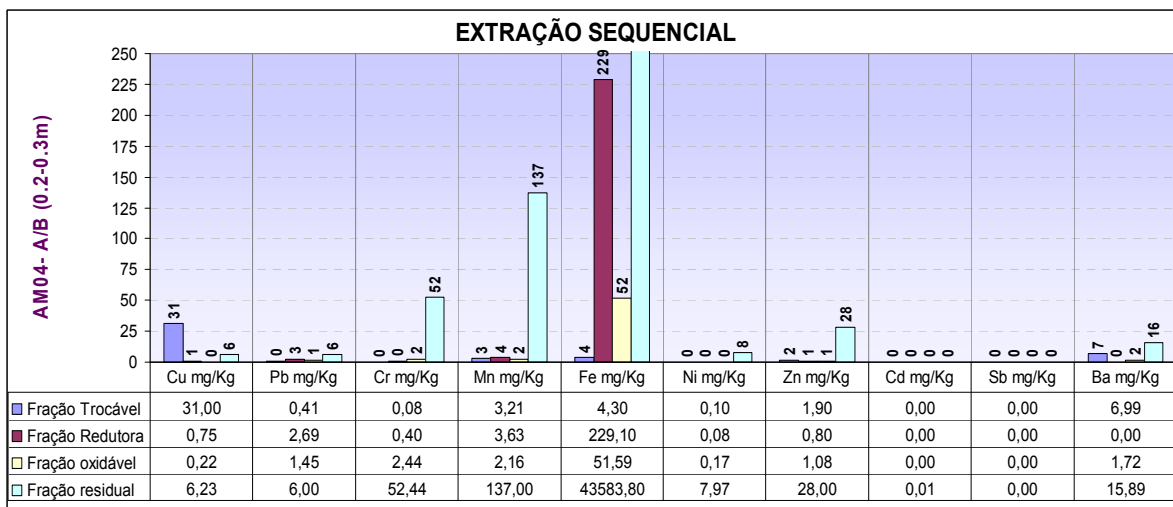
Solo 1



Solo 3



Solo 2



## ANEXO 5: Análise Mineralógica



### ANÁLISE MINERALÓGICA DA FRAÇÃO ARGILA

#### POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

#### DADOS DO SOLICITANTE DA ANÁLISE:

Nome: Alessandra A. D. Silva

Subprojeto: ? ? ?

#### Artigo I. DADOS DA AMOSTRA

Procedência: Paracambi, RJ.

N<sup>o</sup> de Amostras: 02

#### Artigo II. ESPECIFICAÇÕES DO APARELHO

Difratômetro: RIGAKU

Modelo: Miniflex II

Radiação: **Cu K $\alpha$**  ..... $\lambda = 0,154$  nm

#### Artigo III. CONFIGURAÇÃO

Sem filtro com monocromador de grafite

Fendas: 1,25° DS; 0,3mm RS; 1,25° SS

#### Artigo IV. CONDIÇÕES DE PROGRAMAÇÃO

Energia de Irradiação: 30 kV e 15 mA

Intervalo de varredura: 2° a 45° (2 $\theta$ )

Unidade de contagem: cps

Constante de tempo: 1 seg.

Passo: 0,050°

#### Artigo V. METODOLOGIA

As amostras foram analisadas em condição “ao natural” e sob os seguintes tratamentos: retirada da matéria orgânica (somente amostra 05), desferrificação por CBD (citrato-bicarbonato-ditionito de sódio), de acordo com Mehra e Jackson (1960); saturação com K e aquecimento por duas horas, após montagem da lâmina, nas temperaturas: 110°, 350° e 550° C; saturação com Mg e solvatação com etileno glicol conforme Embrapa (1997) e Calderano et. al, (2009). As lâminas foram preparadas de forma orientada, pelo método do esfregaço.

Os difratogramas foram confeccionados usando o programa Microcal Origin 6.0. São apresentados na seguinte ordem: amostra não tratada

(Am.total); amostra desferrificada e saturada com magnésio (Mg) e posteriormente solvatada com etileno glicol (MgEG); amostra desferrificada e saturada com K com varreduras executadas à temperatura ambiente (K25) e, após aquecimento, nas temperaturas assinaladas (K110, K350 e K550).

Os difratogramas foram interpretados segundo as tabelas e critérios de Thorez (1976), Brindley e Brown (1984) e Moore e Reynolds (1997). A grafia dos nomes dos minerais está de acordo com Branco (1987).

## *Seção 5.01      RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES*

**Amostra 04** - constituída por caulinita, mica, vermiculita, interestratificado mica-vermiculita, goethita e gibbsita.

**Amostra 05** - constituída por caulinita, mica, vermiculita, interestratificado mica-vermiculita e gibbsita.

Como pode ser observado nos difratogramas, a constituição mineralógica de ambas as amostras é igual, com exceção da goethita, que não é observada na amostra 05.

A Caulinita, aparentemente, é predominante nas duas amostras. Sua presença é evidenciada pelas reflexões mais bem formadas e de elevada intensidade, que desaparecem após o aquecimento da amostra a 550° C.

A mica ocorre de forma mais expressiva na amostra 05. Pelas características do alargamento da base das reflexões, em ambas as amostras, a mica se acha em estágio de degradação. O aquecimento a 550° C da amostra saturada com potássio, melhora a expressão das reflexões. O aumento da intensidade se deve também ao colapso dos outros argilominerais (vermiculita e interestratificado mica-vermiculita) presentes nas amostras.

Pequenas reflexões indicam a presença de vermiculita e interestratificado mica-vermiculita. Na amostra 05, a presença destes minerais é melhor evidenciada.

A gibbsita ocorre nas duas amostras. Sua presença é evidenciada por uma pequena reflexão, na região de 18,30° (2θ), que desaparece após o aquecimento a 350°C.

A presença de goethita na amostra 04, também é evidenciada por uma pequena reflexão, observada apenas na amostra total na região de ~21,40° (2θ), que desaparece após o tratamento da amostra por CBD.

## **BIBLIOGRAFIA**

BRANCO, P. M. **Dicionário de Mineralogia**. 3. ed. Porto Alegre: Sagra, 1987. 362 p.

BRINDLEY, G. W.; BROWN, G. **Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification**. London: Mineralogical Society, 1984. 495 p.

CALDERANO, S. B.; DUARTE, M. N.; GREGORIS, G. **Análise mineralógica das frações finas do solo por difratometria de raios-X**: revisão e atualização da metodologia e critérios usados na Embrapa Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2009. (Embrapa Solos, Comunicado Técnico, 53).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).

MERHA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE ON CLAYS AND CLAY MINERALS, 7. **Proceedings**. New York: Pergamon Press, 1960. p. 317-327.

MOORE, D. M.; REINOLDS JR., R. C. **X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1997. 1 v. 378 p.

THOREZ, J. **Practical identification of clay minerals**. Liege: Liege State University, 1976. 1 v. 90 p.

## **RESPONSÁVEIS PELA ANÁLISE**

As etapas de montagem de lâminas orientadas, tratamentos para retirada de matéria orgânica, desferrificação e saturação com Mg e K, aquecimentos nas diferentes temperaturas, glicolagem e execução de varredura em todas as amostras, foram executadas pelo Assistente de Pesquisa Gilson Gregoris. Supervisão e acompanhamento, interpretação dos resultados com emissão do laudo técnico, sob a responsabilidade do Pesquisador Sebastião Barreiros Calderano.

**(a) Rio de Janeiro, 30 de Setembro de 2010.**

---

Pesq. Sebastião Barreiros Calderano  
Laboratório de Solos

## ANEXO 6: Permeabilidade

Solo 2

| ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL |                                 |          |                 |              |                 |          |                                   |                 |  |
|---|---------------------------------|----------|-----------------|--------------|-----------------|----------|-----------------------------------|-----------------|--|
| Amostra:                                  | 4B                              | Prof.:   | 0,20-0,30       | Operador     |                 |          |                                   |                 |  |
| Referência :                              | DCMUM - Paracambi - IME         |          |                 | data:        | 18/12/2009      |          |                                   |                 |  |
| <b>DETERMINAÇÃO DE UMIDADE</b>            |                                 |          |                 |              |                 |          |                                   |                 |  |
|   | INICIAL                         |          | FINAL           |              |                 |          |                                   |                 |  |
| CÁPSULA (n)                               | 1                               | 3A       | 18T             | 22A          |                 |          |                                   |                 |  |
| TARA (g)                                  | 14,14                           | 14,21    | 16,98           | 13,67        |                 |          |                                   |                 |  |
| PESO T. ÚMIDO (g)                         | 75,62                           | 57,34    | 68,05           | 58,57        |                 |          |                                   |                 |  |
| PESO T. SECO (g)                          | 61,53                           | 47,64    | 55,82           | 47,76        |                 |          |                                   |                 |  |
| PESO DE ÁGUA (g)                          | 14,09                           | 9,70     | 12,23           | 10,81        |                 |          |                                   |                 |  |
| PESO SOLO SECO (g)                        | 47,39                           | 33,43    | 38,84           | 34,09        |                 |          |                                   |                 |  |
| UMIDADE (%)                               | 29,73                           | 29,02    | 31,49           | 31,71        |                 |          |                                   |                 |  |
| UMIDADE MÉDIA (%)                         | 29,37                           |          | 31,60           |              |                 |          |                                   |                 |  |
| <b>CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO</b>          |                                 |          |                 |              |                 |          |                                   |                 |  |
|   |                                 |          |                 |              |                 |          | DIÂMETRO DO C.P (cm)              | 4,90            |  |
|   |                                 |          |                 |              |                 |          | ÁREA DO C.P (cm <sup>2</sup> )    | 18,86           |  |
|   |                                 |          |                 |              |                 |          | ALTURA C.P (cm)                   | 5,33            |  |
|   |                                 |          |                 |              |                 |          | VOLUME C.P (cm <sup>3</sup> )     | 100,51          |  |
|   |                                 |          |                 |              |                 |          | TARA CILINDRO (g)                 | 65,02           |  |
|   |                                 |          |                 |              |                 |          | PESO T. ÚMIDO (g)                 | 245,15          |  |
|   |                                 |          |                 |              |                 |          | PESO SOLO SECO (g)                | 139,23          |  |
|   |                                 |          |                 |              |                 |          | DENS. REAL GRÃOS                  | 2,66            |  |
|   |                                 |          |                 |              |                 |          | PESO E.A SECO(g/cm <sup>3</sup> ) | 1,385           |  |
|   |                                 |          |                 |              |                 |          | Índice de vazios                  | 0,920           |  |
| <b>LEITURA</b>                            |                                 |          |                 |              |                 |          |                                   |                 |  |
|   |                                 | 1        | 2               | 3            | 4               | 5        |                                   |                 |  |
| CARGA INICIAL (cm)                        |                                 | 133,90   | 133,90          | 133,90       | 133,90          | 133,90   |                                   |                 |  |
| CARGA FINAL (cm)                          |                                 | 128,90   | 123,90          | 118,90       | 105,90          | 102,60   |                                   |                 |  |
| TEMPO (s)                                 |                                 | 608,00   | 1292,00         | 2190,00      | 4980,00         | 6360,00  |                                   |                 |  |
| TEMPERATURA (°C)                          |                                 | 25,30    | 25,30           | 25,30        | 25,30           | 25,30    |                                   |                 |  |
| FATOR DE CORREÇÃO (R <sub>t</sub> )       |                                 | 0,88     | 0,88            | 0,88         | 0,88            | 0,88     |                                   |                 |  |
| AREA TUBO (cm2)                           |                                 | 0,14     | 0,14            | 0,14         | 0,14            | 0,14     |                                   |                 |  |
| PERMEABILIDADE ( cm/s )                   |                                 | 2,17E-06 | 2,08E-06        | 1,88E-06     | 1,63E-06        | 1,45E-06 |                                   |                 |  |
| <b>PERMEABILIDADE MÉDIA ( cm/s )</b>      |                                 |          |                 |              |                 |          |                                   | <b>1,84E-06</b> |  |
| <b>obs.:</b>                              | Cilindro - 18                   |          |                 |              |                 |          |                                   |                 |  |
| Permeabilidade total média                |                                 |          |                 |              |                 |          |                                   |                 |  |
|   |                                 | K1       | 1,84E-06        |              |                 |          |                                   |                 |  |
|   |                                 | K2       | 1,14E-06        |              |                 |          |                                   |                 |  |
|   |                                 | K3       | 1,08E-06        |              |                 |          |                                   |                 |  |
|   |                                 |          | <b>1,36E-06</b> |              |                 |          |                                   |                 |  |
| <b>COPPE / UFRJ</b>                       | <b>LABORATÓRIO DE GEOTECNIA</b> |          |                 |              |                 |          |                                   |                 |  |
| Projeto :                                 |                                 |          |                 | Interessado: | Tese Alessandra |          |                                   |                 |  |
| Local :                                   | Rio de Janeiro                  |          |                 | data :       | 18/12/2009      | figura : | 1                                 |                 |  |



Solo 3

| <b>ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL</b> |                                   |          |              |              |                                      |                                  |   |        |  |  |
|--|-----------------------------------|----------|--------------|--------------|--------------------------------------|----------------------------------|---|--------|--|--|
| Amostra:   | Ponto 5                           |          |              |              |                                      | Operador                         | Sergio                                  |        |  |  |
| Referência :                                     |                                   |          |              |              | Prof. : 0,35 m                       | data:                            | 30/9/2010                               |        |  |  |
| <b>DETERMINAÇÃO DE UMIDADE</b>                   |                                   |          |              |              |                                      |                                  |   |        |  |  |
|  | <b>INICIAL</b>                    |          | <b>FINAL</b> |              | <b>Cil: 7</b>                        | <b>CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO</b> | <b>DIÂMETRO DO C.P (cm)</b>             | 4,90   |  |  |
|  |                                   |          |              |              |                                      |                                  | <b>ÁREA DO C.P (cm<sup>2</sup>)</b>     | 18,86  |  |  |
| <b>CÁPSULA (n)</b>                               | 21                                | 13       |              | 80           |                                      |                                  | <b>ALTURA C.P (cm)</b>                  | 5,30   |  |  |
| <b>TARA (g)</b>                                  | 14,38                             | 14,12    |              | 37,83        |                                      |                                  | <b>VOLUME C.P (cm<sup>3</sup>)</b>      | 99,94  |  |  |
| <b>PESO T. ÚMIDO (g)</b>                         | 34,90                             | 35,22    |              | 160,22       |                                      |                                  | <b>TARA CILINDRO (g)</b>                | 68,08  |  |  |
| <b>PESO T. SECO (g)</b>                          | 22,40                             | 21,71    |              | 89,53        |                                      |                                  | <b>PESO T. ÚMIDO (g)</b>                | 188,98 |  |  |
| <b>PESO DE ÁGUA (g)</b>                          | 12,50                             | 13,51    |              | 70,69        |                                      |                                  | <b>PESO SOLO SECO (g)</b>               | 45,29  |  |  |
| <b>PESO SOLO SECO (g)</b>                        | 8,02                              | 7,59     |              | 51,70        |                                      |                                  | <b>PESO E.A ÚMIDO(kN/m<sup>3</sup>)</b> | 11,87  |  |  |
| <b>UMIDADE (%)</b>                               | 155,86                            | 178,00   |              | 136,73       |                                      |                                  | <b>PESO E.A SECO(kN/m<sup>3</sup>)</b>  | 4,45   |  |  |
| <b>UMIDADE MÉDIA (%)</b>                         | 166,93                            |          |              |              |                                      |                                  | <b>Índice de vazios</b>                 | -      |  |  |
| <b>LEITURA</b>                                   |                                   |          |              |              |                                      |                                  |   |        |  |  |
|  |                                   | 1        | 2            | 3            | 4                                    | 5                                |   |        |  |  |
| <b>CARGA INICIAL (cm)</b>                        |                                   | 133,90   | 133,90       | 133,90       | 133,90                               | 133,90                           |   |        |  |  |
| <b>CARGA FINAL (cm)</b>                          |                                   | 125,60   | 105,20       | 107,70       | 110,00                               | 90,20                            |   |        |  |  |
| <b>TEMPO (s)</b>                                 |                                   | 180,0    | 720,0        | 600,0        | 600,0                                | 1200,0                           |   |        |  |  |
| <b>TEMPERATURA (°C)</b>                          |                                   | 25,0     | 25,0         | 25,0         | 25,0                                 | 25,0                             |   |        |  |  |
| <b>FATOR DE CORREÇÃO (R<sub>i</sub>)</b>         |                                   | 0,890    | 0,890        | 0,890        | 0,890                                | 0,890                            |   |        |  |  |
| <b>AREA TUBO (cm<sup>2</sup>)</b>                |                                   | 0,307    | 0,307        | 0,307        | 0,307                                | 0,307                            |   |        |  |  |
| <b>PERMEABILIDADE ( cm/s )</b>                   |                                   | 2,73E-05 | 2,57E-05     | 2,78E-05     | 2,51E-05                             | 2,53E-05                         |   |        |  |  |
|  |                                   |          |              |              | <b>PERMEABILIDADE MÉDIA ( cm/s )</b> | <b>2,62E-05</b>                  |   |        |  |  |
| <b>obs.:</b>                                     | <b>Argila organica com raizes</b> |          |              |              |                                      |                                  |   |        |  |  |
| <b>COPPE / UFRJ</b>                              | <b>LABORATÓRIO DE GEOTECNIA</b>   |          |              |              |                                      |                                  |   |        |  |  |
| Projeto :  |                                   |          |              | Interessado: | Tese Alessandra                      |                                  |   |        |  |  |
| Local :  |                                   |          |              | data :       | 30/9/2010                            | figura :                         | 1                                       |        |  |  |

## ANEXO 7: Ensaio de batelada

Resultados obtidos no ensaio

### Ensaio Batelada - Cobre

| concc.<br>(ppm) | concc.<br>inicial<br>(mg/L) | Amostra 4 |                                      |       |      |                                      |       |
|-----------------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|-------|------|--------------------------------------|-------|
|                 |                             | 4         |                                      |       | 4'   |                                      |       |
|                 |                             | pH        | CEE<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) | mg/L  | pH   | CEE<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) | mg/L  |
| 5               | 4,68                        | 4,78      | 63,9                                 | <0,01 | 4,82 | 59,1                                 | <0,01 |
| 20              | 20,2                        | 4,58      | 110                                  | 1,43  | 4,56 | 110                                  | 1,09  |
| 50              | 50,3                        | 4,39      | 271                                  | 13,1  | 4,39 | 273                                  | 13,3  |
| 200             | 200                         | 4,15      | 797                                  | 129   | 4,15 | 798                                  | 129   |
| 400             | 392                         | 4,04      | 1.410                                | 308   | 4,05 | 1.414                                | 304   |
| 600             | 594                         | 3,97      | 2.040                                | 573   | 3,99 | 2.100                                | 577   |
| 800             | 789                         | 3,94      | 2.770                                | 708   | 3,95 | 2.800                                | 707   |
| 1000            | 989                         | 3,91      | 3.340                                | 882   | 3,91 | 3.360                                | 886   |

| concc.<br>(ppm) | concc.<br>inicial<br>(mg/L) | Amostra 5 |                                      |      |      |                                      |      |
|-----------------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|------|------|--------------------------------------|------|
|                 |                             | 5         |                                      |      | 5'   |                                      |      |
|                 |                             | pH        | CEE<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) | mg/L | pH   | CEE<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) | mg/L |
| 5               | 4,68                        | 4,49      | 108                                  | 1,85 | 4,50 | 100                                  | 1,00 |
| 20              | 20,2                        | 4,25      | 150                                  | 1,43 | 4,26 | 150                                  | 1,36 |
| 50              | 50,3                        | 3,97      | 333                                  | 5,42 | 3,97 | 337                                  | 5,42 |
| 200             | 200                         | 3,60      | 911                                  | 104  | 3,61 | 913                                  | 107  |
| 400             | 392                         | 3,51      | 1.613                                | 295  | 3,53 | 1.624                                | 291  |
| 600             | 594                         | 3,45      | 2.370                                | 484  | 3,45 | 2.400                                | 484  |
| 800             | 789                         | 3,41      | 3.040                                | 680  | 3,42 | 3.050                                | 682  |
| 1000            | 989                         | 3,39      | 3.650                                | 864  | 3,39 | 3.670                                | 860  |

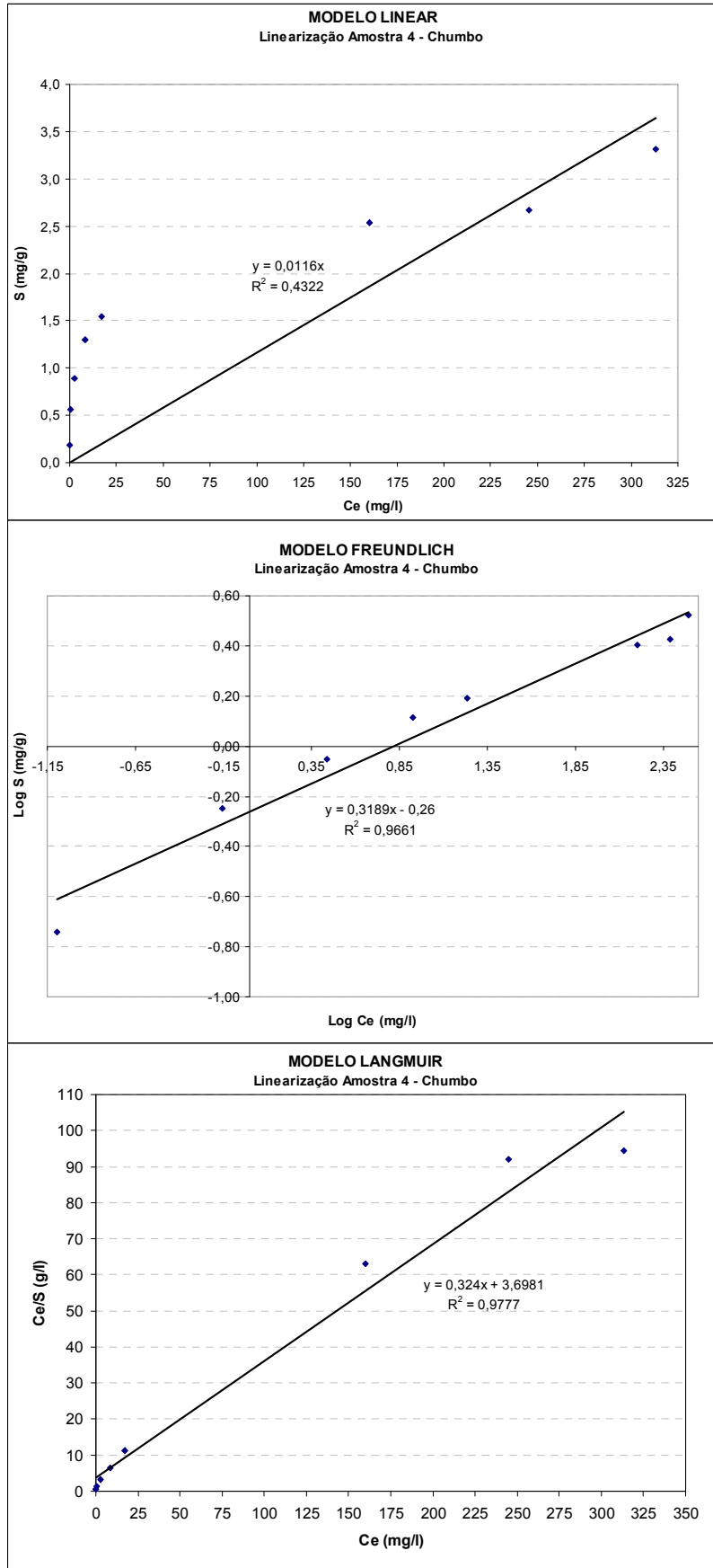
### Ensaio Batelada - Chumbo

| concc.<br>(ppm) | concc.<br>inicial<br>(mg/L) | Amostra 4 |                                      |       |      |                                      |       |
|-----------------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|-------|------|--------------------------------------|-------|
|                 |                             | 4         |                                      |       | 4'   |                                      |       |
|                 |                             | pH        | CEE<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) | mg/L  | pH   | CEE<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) | mg/L  |
| 10              | 9,01                        | 4,79      | 48,6                                 | 0,084 | 4,70 | 52,5                                 | 0,076 |
| 30              | 28,4                        | 4,44      | 74,1                                 | 0,625 | 4,47 | 67,8                                 | 0,770 |
| 50              | 46,3                        | 4,43      | 91,1                                 | 2,48  | 4,49 | 91,0                                 | 3,02  |
| 80              | 72,3                        | 4,35      | 130                                  | 7,77  | 4,37 | 124                                  | 9,25  |
| 100             | 93,3                        | 4,31      | 149                                  | 16,2  | 4,33 | 149                                  | 18,4  |
| 300             | 285                         | 4,17      | 455                                  | 158   | 4,21 | 458                                  | 163   |
| 400             | 376                         | 4,17      | 582                                  | 243   | 4,19 | 587                                  | 248   |
| 500             | 476                         | 4,18      | 707                                  | 324   | 4,19 | 714                                  | 302   |

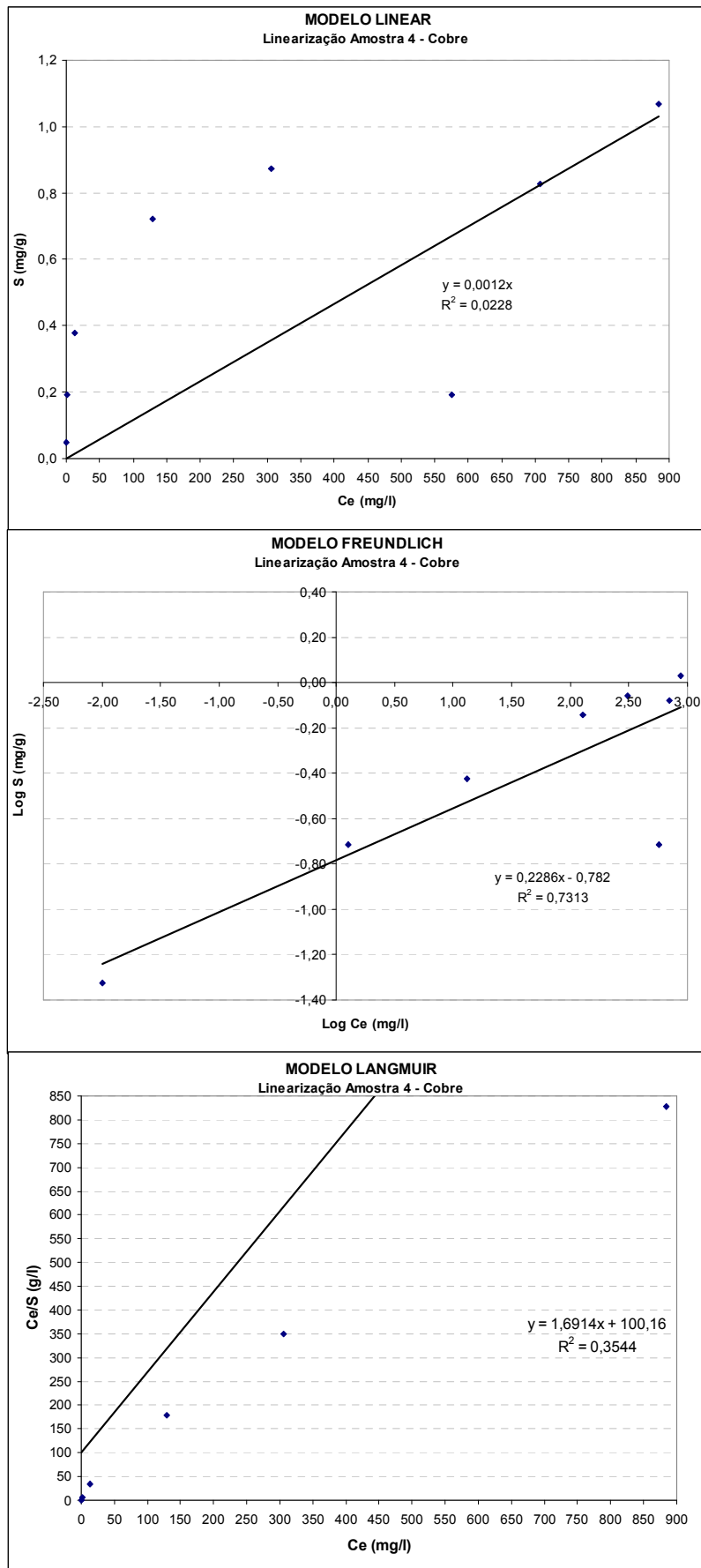
| concc.<br>(ppm) | concc.<br>inicial<br>(mg/L) | Amostra 5 |                                      |       |      |                                      |       |
|-----------------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|-------|------|--------------------------------------|-------|
|                 |                             | 5         |                                      |       | 5'   |                                      |       |
|                 |                             | pH        | CEE<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) | mg/L  | pH   | CEE<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) | mg/L  |
| 10              | 9,01                        | 4,67      | 54,1                                 | 0,757 | 4,69 | 57,5                                 | 0,361 |
| 30              | 28,4                        | 4,44      | 82,4                                 | 0,386 | 4,46 | 83,9                                 | 0,349 |
| 50              | 46,3                        | 4,34      | 99,3                                 | 0,379 | 4,33 | 95,5                                 | 1,02  |
| 80              | 72,3                        | 4,15      | 132                                  | 2,49  | 4,13 | 132                                  | 3,36  |
| 100             | 93,3                        | 4,02      | 158                                  | 10,7  | 4,05 | 157                                  | 9,77  |
| 300             | 285                         | 3,70      | 476                                  | 149   | 3,71 | 480                                  | 151   |
| 400             | 376                         | 3,70      | 607                                  | 242   | 3,72 | 614                                  | 252   |
| 500             | 476                         | 3,66      | 741                                  | 345   | 3,67 | 743                                  | 359   |

# LINEARIZAÇÃO DOS MODELOS DE ISOTERMA

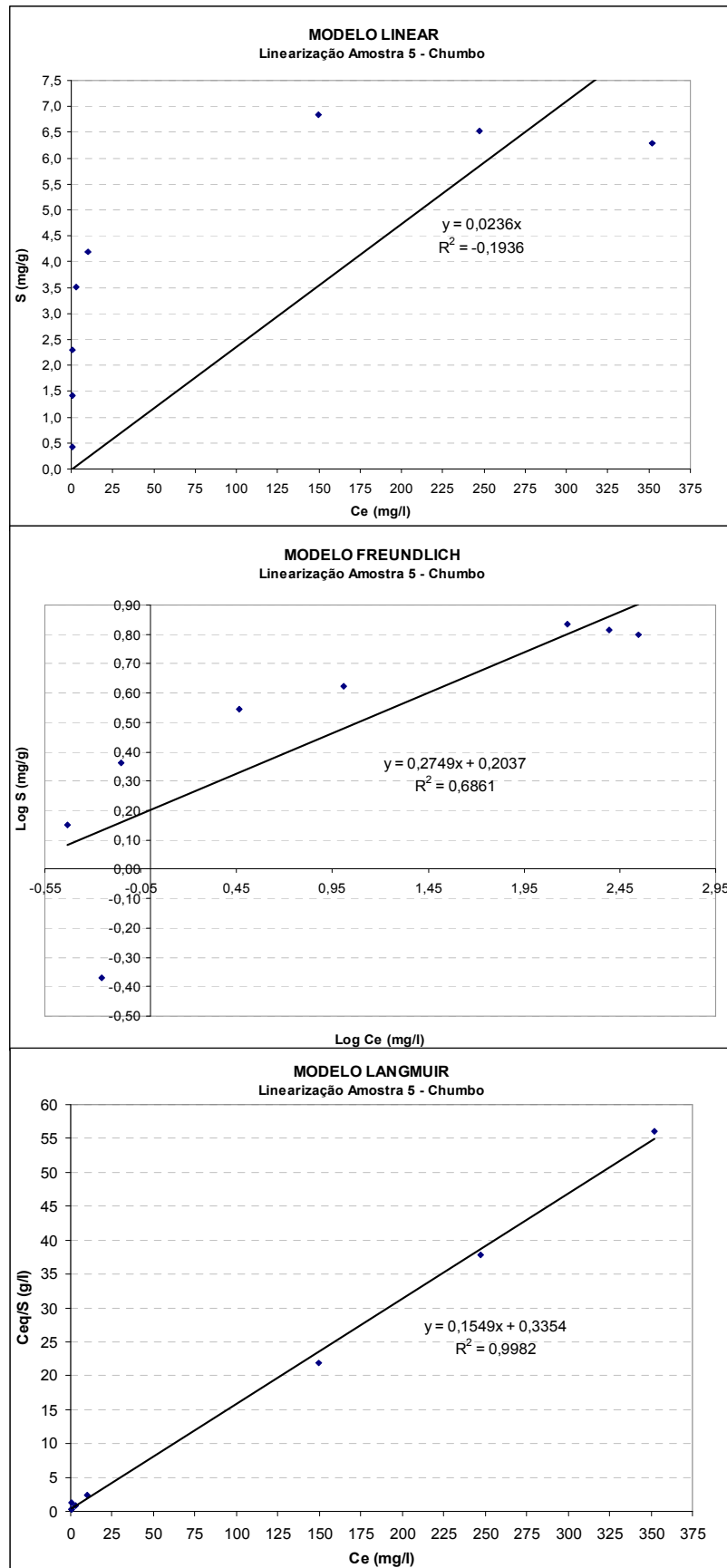
## Amostra 4 – análise do CHUMBO



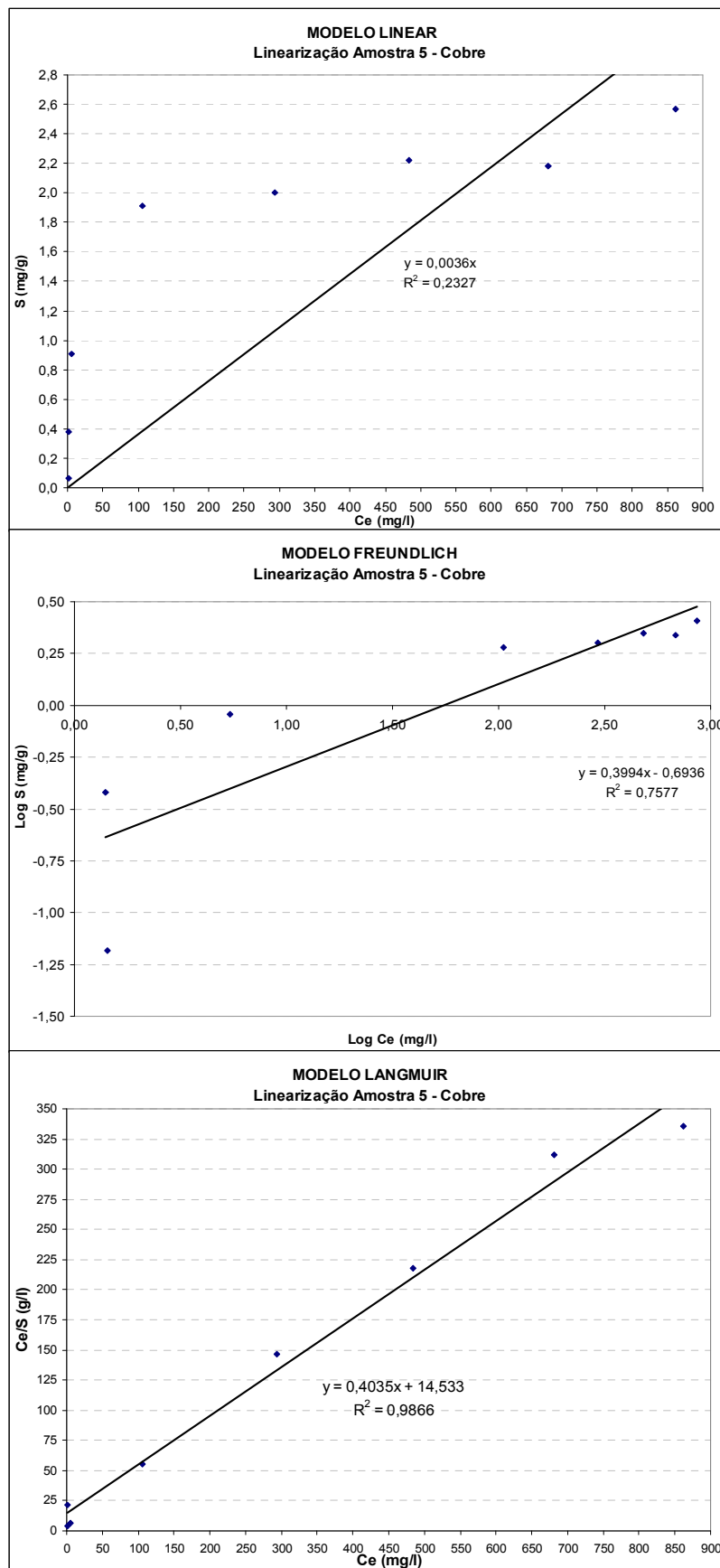
## Amostra 4 – análise do COBRE



## Amostra 5 – análise do CUMBO



## Amostra 5 – análise do COBRE



## ANEXO 8: Adensamento

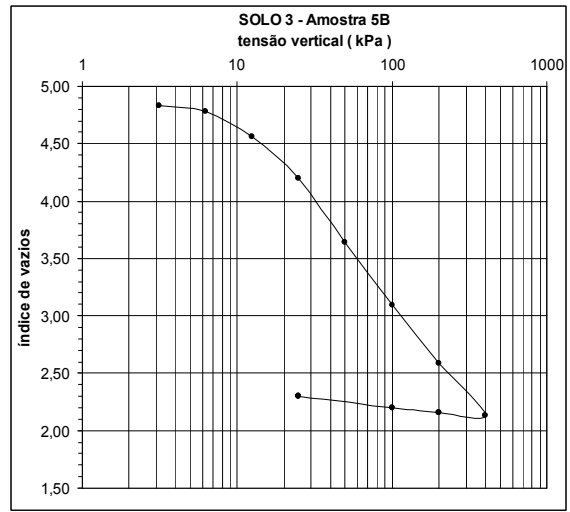
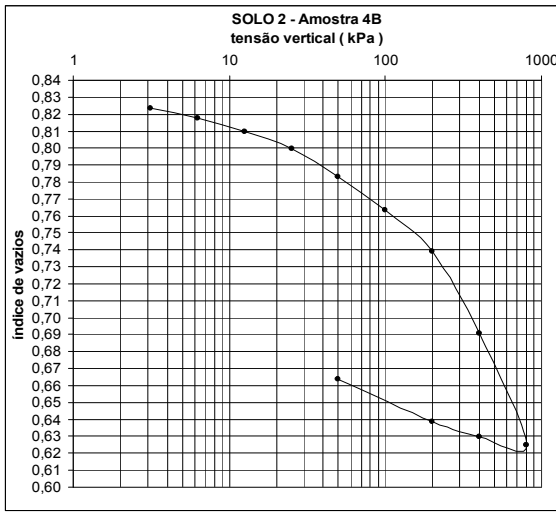
| ENSAIO DE ADENSAMENTO |                 |                          |         |         |                            |               |         |                                 |                      |                       |
|-----------------------|-----------------|--------------------------|---------|---------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------|----------------------|-----------------------|
| DCMUN - Paracambi     |                 |                          |         |         |                            |               |         |                                 |                      |                       |
| Amostra :             | 4B              |                          |         |         | Prof.:                     | 0,20 à 0,30 m |         |                                 |                      |                       |
|                       | Antes do Ensaio |                          |         | Após    | Condições iniciais do CP   |               |         |                                 |                      |                       |
|                       | CP              | Solo Moldagem            |         | CP      | $\phi$ ( cm )              | 7,15          |         | hs ( cm )                       | 1,095                |                       |
| Cápsula               |                 | 22a                      | 18t     | 15      | h ( cm )                   | 2,00          |         | $\gamma_s$ (kn/m <sup>3</sup> ) | 14,59                |                       |
| Tara+S. úmido (g)     | 191,50          | 78,46                    | 75,54   | 54,95   | Gs                         | 2,666         |         | S <sub>o</sub> ( % )            | 84                   |                       |
| Tara+S. Seco(g)       |                 | 65,03                    | 63,56   | 34,96   | Área ( cm <sup>2</sup> )   | 40,15         |         | e <sub>o</sub>                  | 0,827                |                       |
| Tara (g)              | 43,90           | 13,71                    | 17,05   | 19,63   |                            |               |         |                                 |                      |                       |
| Solo seco (g)         | 117,18          | 51,32                    | 46,51   | 15,33   | Volume ( cm <sup>3</sup> ) | 80,30         |         |                                 |                      |                       |
| Umidade ( % )         | 25,96           | 26,17                    | 25,76   | 130,40  |                            |               |         |                                 |                      |                       |
| Pressão               | def.24          | def. 50                  | t. 50   | t. 90   | h. 24                      | h. 50         | E       | Índice de                       | Cv.50                | Cv.90                 |
| ( kPa )               | ( cm )          | ( cm )                   | ( min ) | ( min ) | ( cm )                     | ( cm )        | ( % )   | Vazios                          | (m <sup>2</sup> /s)  | ( m <sup>2</sup> /s ) |
| *                     | *               | *                        | *       | *       | *                          | *             | *       | *                               | (x10 <sup>-8</sup> ) | (x10 <sup>-8</sup> )  |
| 3,125                 | 0,004           | *                        | *       | *       | 1,996                      |               | 0,20    | 0,823                           |                      |                       |
| 6,25                  | 0,010           | *                        | *       | *       | 1,990                      |               | 0,50    | 0,818                           |                      |                       |
| 12,5                  | 0,019           | 0,014                    | *       | 0,75    | 1,981                      | 1,986         | 0,95    | 0,810                           |                      | 185,82                |
| 25                    | 0,030           | 0,026                    | *       | 0,85    | 1,970                      | 1,974         | 1,51    | 0,799                           |                      | 162,01                |
| 50                    | 0,048           | 0,043                    | *       | 0,90    | 1,952                      | 1,957         | 2,41    | 0,783                           |                      | 150,29                |
| 100                   | 0,070           | 0,063                    | *       | 1,09    | 1,931                      | 1,937         | 3,48    | 0,764                           |                      | 121,60                |
| 200                   | 0,096           | 0,089                    | *       | 1,10    | 1,904                      | 1,911         | 4,81    | 0,739                           |                      | 117,32                |
| 400                   | 0,149           | 0,128                    | *       | 0,79    | 1,851                      | 1,872         | 7,45    | 0,691                           |                      | 156,77                |
| 800                   | 0,221           | 0,204                    | *       | 0,93    | 1,779                      | 1,796         | 11,05   | 0,625                           |                      | 122,54                |
| 400                   | 0,216           | *                        | *       | *       | 1,784                      |               | 10,80   | 0,630                           |                      |                       |
| 200                   | 0,206           | *                        | *       | *       | 1,794                      |               | 10,30   | 0,639                           |                      |                       |
| 50                    | 0,179           | *                        | *       | *       | 1,821                      |               | 8,95    | 0,664                           |                      |                       |
|                       |                 |                          |         |         |                            |               |         |                                 |                      |                       |
| <b>COPPE/UFRJ</b>     |                 | LABORATÓRIO DE GEOTECNIA |         |         |                            |               |         |                                 |                      |                       |
| Projeto :             |                 | Interessado:             |         |         |                            |               |         |                                 |                      |                       |
| Local:                | Paracambi       |                          |         |         | data:                      |               | figura: | 1                               |                      |                       |

## ENSAIO DE ADENSAMENTO

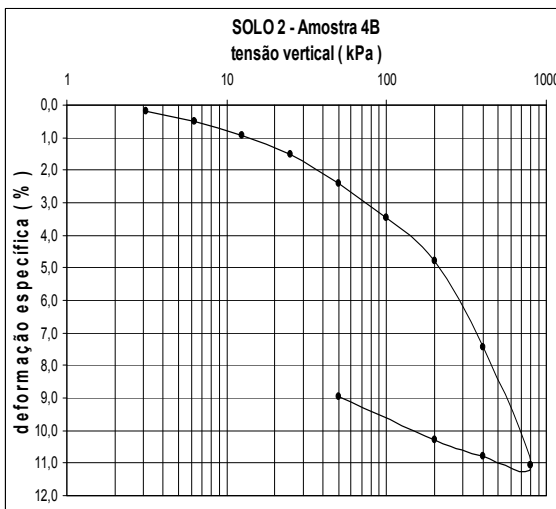
|   |                 |                          |               |               |                            |              |         |                                 |  |  |
|---|-----------------|--------------------------|---------------|---------------|----------------------------|--------------|---------|---------------------------------|--|--|
|   |                 |                          |               |               |                            |              |         |                                 |  |  |
| Amostra :   |                 | Ponto - 5                |               |               |                            | Prof.:       |         | 0.35 m                          |  |  |
|   |                 |                          |               |               |                            |              |         |                                 |  |  |
|   | Antes do Ensaio |                          |               | Após          | Condições iniciais do CP   |              |         |                                 |  |  |
|   | CP              | Solo Moldagem            |               | CP            | $\phi$ ( cm )              | 7,15         |         | hs ( cm )                       | 0,523  |  |
| Cápsula   | 2,00            | 43                       | 7             | 8A            | h ( cm )                   | 3,05         |         | $\gamma_s$ (kn/m <sup>3</sup> ) | 4,16   |  |
| Tara+S. úmido (g)   | 306,04          | 24,40                    | 23,68         | 147,22        | Gs                         | 2,473        |         | $S_o$ ( % )                     | 101  |  |
| Tara+S. Seco(g)   |                 | 13,30                    | 14,28         | 102,91        | Área ( cm <sup>2</sup> )   | 40,15        |         | $e_o$                           | 4,836  |  |
| Tara (g)  | 151,69          | 8,02                     | 9,19          | 36,92         | Volume ( cm <sup>3</sup> ) | 122,46       |         |                                 |  |  |
| Solo seco (g)   | 51,89           | 5,28                     | 5,09          | 65,99         |                            |              |         |                                 |  |  |
| Umidade ( % )   | 197,45          | 210,23                   | 184,68        | 67,15         |                            |              |         |                                 |  |  |
|   |                 |                          |               |               |                            |              |         |                                 |  |  |
| Pressão ( kPa )   | def.24 ( cm )   | def. 50 ( cm )           | t. 50 ( min ) | t. 90 ( min ) | h. 24 ( cm )               | h. 50 ( cm ) | E ( % ) | Índice de Vazios                | Cv.50 (m <sup>2</sup> /s) (x10 <sup>-8</sup> ) | Cv.90 (m <sup>2</sup> /s) (x10 <sup>-8</sup> ) |
| *   | *               | *                        | *             | *             | *                          | *            | *       | *                               |  |  |
| 3,125   | 0,002           |                          | *             |               | 3,048                      | 3,050        | 0,07    | 4,832                           |  | 9,70   |
| 6,25  | 0,031           |                          | *             |               | 3,019                      | 3,050        | 1,02    | 4,777                           |  | 20,70  |
| 12,5  | 0,142           |                          | *             |               | 2,908                      | 3,050        | 4,66    | 4,565                           |  | 21,60  |
| 25  | 0,332           |                          | *             |               | 2,718                      | 3,050        | 10,89   | 4,201                           |  | 23,60  |
| 50  | 0,625           |                          | *             |               | 2,425                      | 3,050        | 20,49   | 3,640                           |  | 15,90  |
| 100   | 0,911           |                          | *             |               | 2,139                      | 3,050        | 29,87   | 3,093                           |  | 11,30  |
| 200   | 1,176           |                          | *             |               | 1,874                      | 3,050        | 38,56   | 2,586                           |  | 8,96   |
| 400   | 1,415           |                          | *             |               | 1,635                      | 3,050        | 46,39   | 2,129                           |  | 6,83   |
| 200   | 1,399           | *                        | *             | *             | 1,651                      | *            | 45,87   | 2,159                           | *  | *  |
| 100   | 1,378           | *                        | *             | *             | 1,672                      | *            | 45,18   | 2,199                           | *  | *  |
| 25  | 1,323           | *                        | *             | *             | 1,727                      | *            | 43,38   | 2,305                           | *  | *  |
|   |                 |                          |               |               |                            |              |         |                                 |  |  |
| <b>obs.:</b> argila organica com fragmentos de materia organica em decomposição |                 |                          |               |               |                            |              |         |                                 |  |  |
|   |                 |                          |               |               |                            |              |         |                                 |  |  |
| <b>COPPE/UFRJ</b>   |                 | LABORATÓRIO DE GEOTECNIA |               |               |                            |              |         |                                 |  |  |
| Projeto :   |                 | Interessado:             |               |               |                            | Alessandra   |         |                                 |  |  |
| Local:  |                 |                          |               |               | data:                      | 1/10/2010    | figura: | 1                               |  |  |



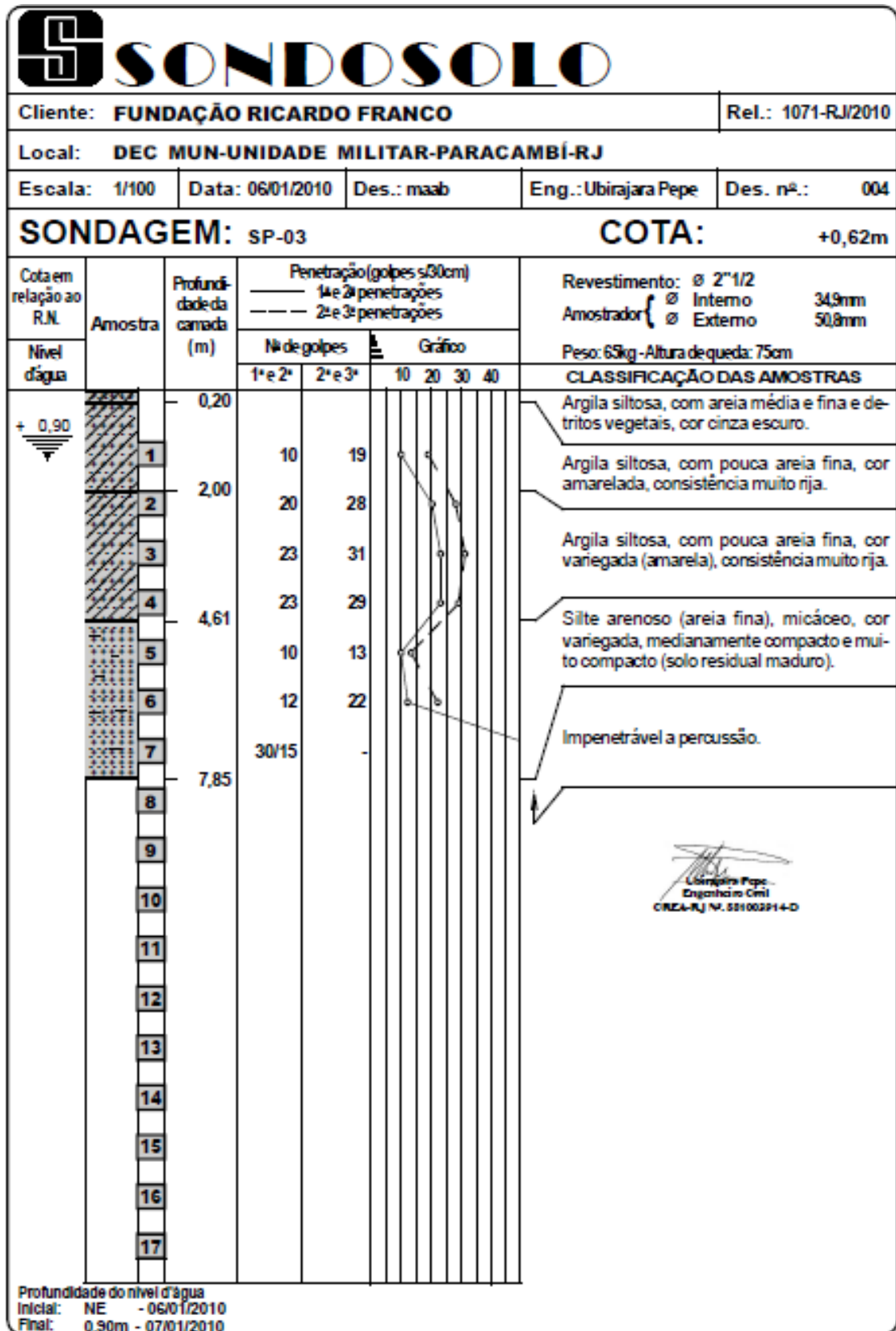
( $e \times \log \sigma'_v$ )



( $\epsilon_v \times \log \sigma'_v$ )



# ANEXO 9: Boletins de Sondagem



Cliente: **FUNDAÇÃO RICARDO FRANCO** Rel.: 1071-RJ/2010

 Local: **DEC MUN-UNIDADE MILITAR-PARACAMBÍ-RJ**

Escala: 1/100 Data: 30/12/2009 Des.: maab Eng.: Ubirajara Pepe Des. nº.: 005

**SONDAGEM: SP-04**
**COTA:**

| Cota em relação ao R.N. | Amostra | Profundidade da camada (m) | Penetração (golpes s/30cm) |         | Gráfico |    |    |    | Revestimento: Ø 2"1/2<br>Amostrador {<br>Ø Interno 34,9mm<br>Ø Externo 50,8mm<br>Peso: 65kg - Altura de queda: 75cm |
|-------------------------|---------|----------------------------|----------------------------|---------|---------|----|----|----|---|
|                         |         |                            | Nº de golpes               |         |         |    |    |    |   |
| Nível d'água            |         |                            | 1ª e 2ª                    | 2ª e 3ª | 10      | 20 | 30 | 40 | CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS  |
|                         |         | 0,20                       |                            |         |         |    |    |    | Argila siltosa, com areia média e fina e detritos vegetais, cor marrom escuro.                                      |
|                         | 1       | 1,23                       | 12                         | 15      |         |    |    |    | Argila siltosa, com areia média e fina, cm pedregulhos, cor amarelada.  |
|                         | 2       | 1,80                       | 22                         | 25      |         |    |    |    | Silte arenoso (areia fina), pouco argiloso, cor amarelada.  |
|                         | 3       |                            | 48                         | 30/15   |         |    |    |    | Silte arenoso (areia fina), micáceo, cor variegada, compacto e muito compacto (solo residual maduro).               |
|                         | 4       |                            | 30/15                      | -       |         |    |    |    |   |
|                         | 5       | 5,45                       | 30/06                      | -       |         |    |    |    |   |
|                         | 6       |                            |                            |         |         |    |    |    | Impenetrável a percussão.   |
|                         | 7       |                            |                            |         |         |    |    |    |   |
|                         | 8       |                            |                            |         |         |    |    |    |   |
|                         | 9       |                            |                            |         |         |    |    |    |   |
|                         | 10      |                            |                            |         |         |    |    |    |   |
|                         | 11      |                            |                            |         |         |    |    |    |   |
|                         | 12      |                            |                            |         |         |    |    |    |   |
|                         | 13      |                            |                            |         |         |    |    |    |   |
|                         | 14      |                            |                            |         |         |    |    |    |   |
|                         | 15      |                            |                            |         |         |    |    |    |   |
|                         | 16      |                            |                            |         |         |    |    |    |   |
|                         | 17      |                            |                            |         |         |    |    |    |   |

  
 Ubirajara Pepe  
 Engenheiro Civil  
 CRETA-RJ Nº. 581002914-D

 Profundidade do nível d'água  
 Inicial: NE - 30/12/2009  
 Final: NE - 31/12/2009

Cliente: **FUNDAÇÃO RICARDO FRANCO** Rel.: 1071-RJ/2010

Local: **DEC MUN-UNIDADE MILITAR-PARACAMBÍ-RJ**

Escala: 1/100    Data: 04/01/2010    Des.: maab    Eng.: Ubirajara Pepe    Des. nº.: 006

**SONDAGEM: SP-04A** **COTA:**

| Cota em relação ao R.N. | Amostra | Profundidade da camada (m) | Penetração (golpes s/30cm) |         | Gráfico |    |    |    | Revestimento: Ø 2"1/2<br>Amostrador { Ø Interno 34,9mm<br>Ø Externo 50,8mm<br>Peso: 65kg - Altura de queda: 75cm |
|-------------------------|---------|----------------------------|----------------------------|---------|---------|----|----|----|--|
|                         |         |                            | Nº de golpes               |         |         |    |    |    |  |
| Nível d'água            |         |                            | 1ª e 2ª                    | 2ª e 3ª | 10      | 20 | 30 | 40 | CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS   |
|                         |         | 0,25                       |                            |         |         |    |    |    | Argila siltosa, com areia média e fina e detritos vegetais, cor marrom escuro.                                   |
|                         | 1       | 0,97                       | 13                         | 21      |         |    |    |    | Argila siltosa, com areia média e fina, com pedregulhos, cor amarelada.  |
|                         | 2       | 1,79                       | 27                         | 32      |         |    |    |    | Silte argiloso, com pouca areia fina, micáceo, cor amarelada, consistência muito rija.                           |
|                         | 3       |                            | 53/20                      | 30/05   |         |    |    |    | Silte arenoso (areia fina), micáceo, cor variegada, compacto e muito compacto (solo residual maduro).            |
|                         | 4       |                            | 30/15                      |         |         |    |    |    |  |
|                         | 5       | 5,37                       | 30/08                      |         |         |    |    |    | Impenetrável a percussão.  |
|                         | 6       |                            |                            |         |         |    |    |    |  |
|                         | 7       |                            |                            |         |         |    |    |    |  |
|                         | 8       |                            |                            |         |         |    |    |    |  |
|                         | 9       |                            |                            |         |         |    |    |    |  |
|                         | 10      |                            |                            |         |         |    |    |    |  |
|                         | 11      |                            |                            |         |         |    |    |    |  |
|                         | 12      |                            |                            |         |         |    |    |    |  |
|                         | 13      |                            |                            |         |         |    |    |    |  |
|                         | 14      |                            |                            |         |         |    |    |    |  |
|                         | 15      |                            |                            |         |         |    |    |    |  |
|                         | 16      |                            |                            |         |         |    |    |    |  |
|                         | 17      |                            |                            |         |         |    |    |    |  |

  
 Ubirajara Pepe  
 Engenheiro Civil  
 CREA-RJ Nº. 59100291-4-D

Profundidade do nível d'água  
 Inicial: NE - 04/01/2010  
 Final: NE - 05/01/2010

# SONDOSOLO

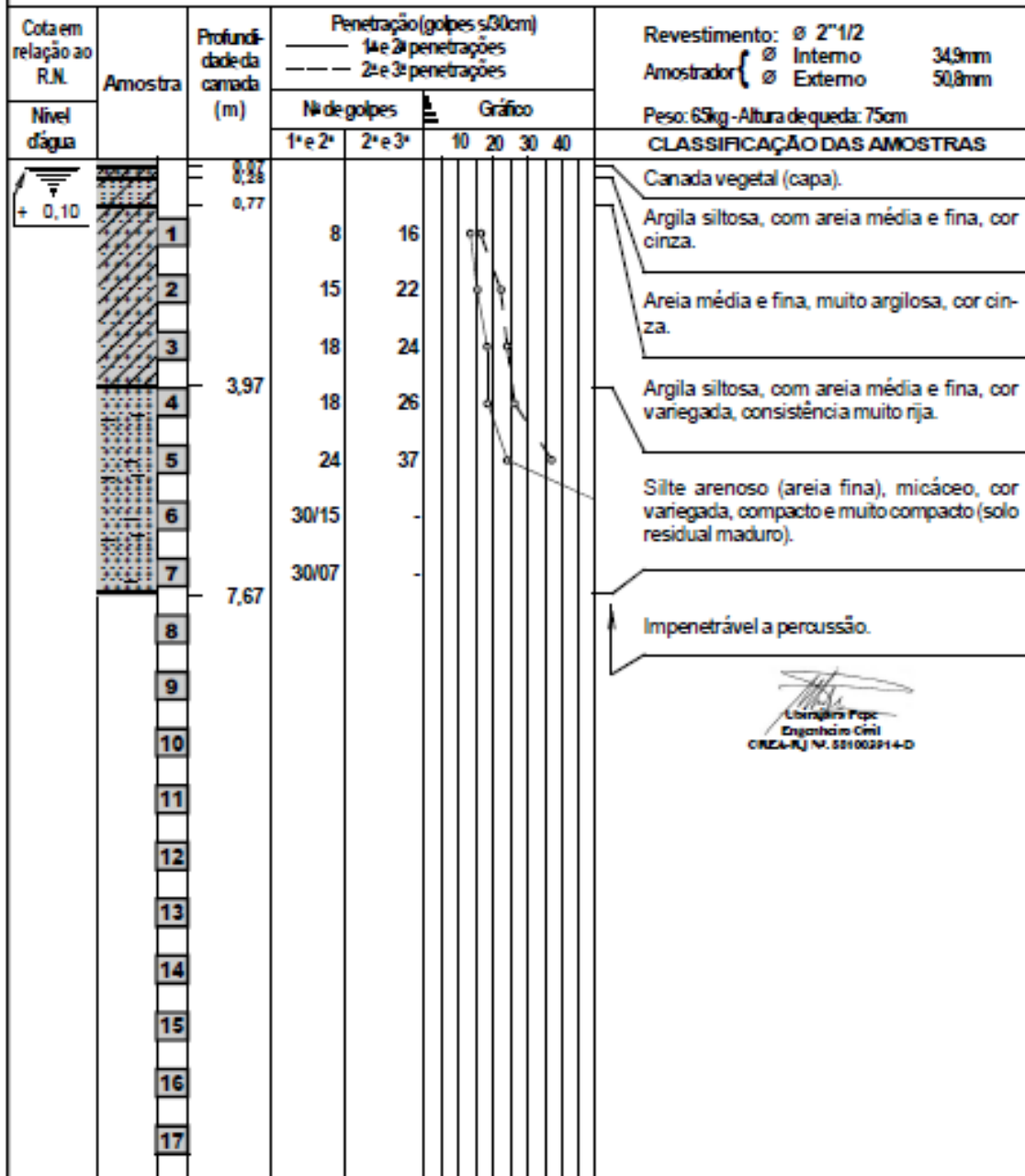
Cliente: **FUNDAÇÃO RICARDO FRANCO** Rel.: 1071-RJ/2010

Local: **DEC MUN-UNIDADE MILITAR-PARACAMBÍ-RJ**

Escala: 1/100    Data: 07/01/2010    Des.: maab    Eng.: Ubirajara Pepe    Des. nº.: 007

**SONDAGEM: SP-05**

**COTA:**



Ubirajara Pepe  
Engenheiro Civil  
CREA-RJ Nº. 281062914-0

Profundidade do nível d'água  
Inicial: 0,30m - 07/01/2010  
Final: 0,10m - 08/01/2010

# SONDOSOLO

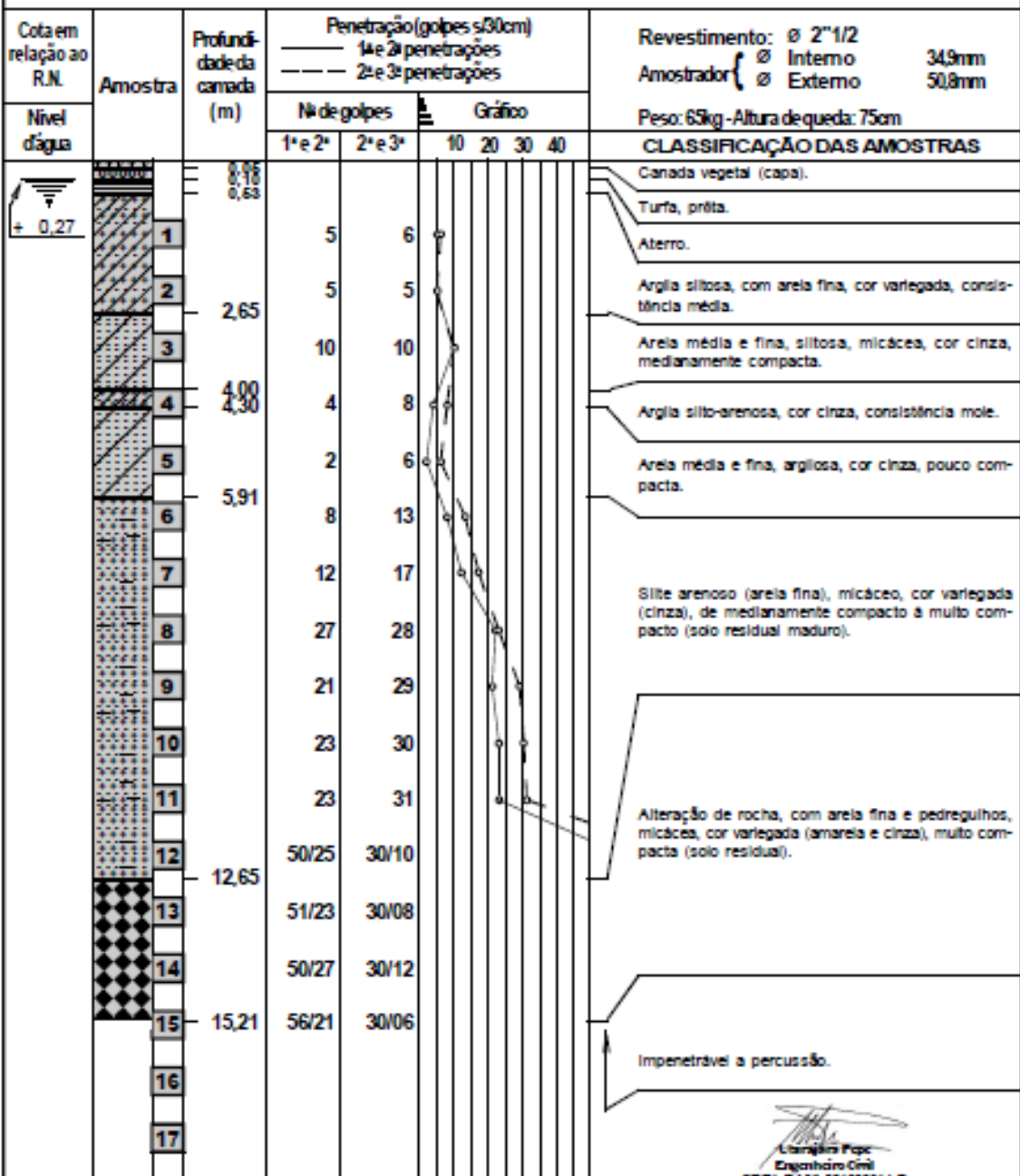
Cliente: **FUNDAÇÃO RICARDO FRANCO** Rel.: 1071-RJ/2010

Local: **DEC MUN-UNIDADE MILITAR-PARACAMBÍ-RJ**

Escala: 1/100 Data: 22/12/2009 Des.: maab Eng.: Ubirajara Pepe Des. nº.: 008

**SONDAGEM: SP-06**

**COTA:**



Profundidade do nível d'água  
Inicial: 1,00m - 22/12/2009  
Final: 0,27m - 24/12/2009

Ubirajara Pepe  
Engenheiro Civil  
CREA-RJ Nº 55100291-0

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)