

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**ESTUDO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO DE DEPÓSITO
ANTROPOGÊNICO DE RESÍDUOS NA CIDADE DE SÃO
CARLOS**

VINICIUS GUSTAVO DE OLIVEIRA

São Carlos-SP

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**ESTUDO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO DE DEPÓSITO
ANTROPOGÊNICO DE RESÍDUOS NA CIDADE DE SÃO
CARLOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof.^a Dr.^a Denise Balestrero Menezes.

São Carlos-SP

2019

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO AOS MEUS PAIS GERALDO MAGELA DE OLIVEIRA E ANCLER ALVES PEDROSA DE OLIVEIRA, QUE SEMPRE ME APOIARAM.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu força e coragem ao longo dessa jornada.

A meus pais, Geraldo e Ancler, e meu irmão, Filipe, por serem essenciais em minha vida, e por entenderem as minhas faltas e momentos de afastamento e reclusão necessários ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A minha namorada Ana Paula, que fez meus dias em São Carlos mais felizes, por todo carinho, paciência e pelas caronas.

A minha orientadora Denise, que me auxiliou em toda a pesquisa, me ajudou nos trabalhos de campo, por todo apoio em todas as etapas desse trabalho.

Aos técnicos de laboratórios da UFSCar Marcão, Bil, Sidnei (in memoriam) e Zé, e ao Oscar da USP, por todo aprendizado. A USP São Carlos, que permitiu a utilização dos laboratórios.

Aos amigos da pós-graduação Caio Gobbo, Claudinei, Camila, Vinicius Renan, Ana Carolina, Giulia, Aline, Lucas, Maria Eugênia, Henrique, Eliana, Jaque, Suise, Moises, Leonel e Cláudio.

Aos amigos do Labgeo Fábio, Natália Costa, Natália Arruda, Ileana, Monique, Gustavo e principalmente Wagner (por toda ajuda com a parte de laboratório) pela troca de conhecimento, por me auxiliarem em dúvidas que surgiram ao longo da pesquisa, e por todas as conversas produtivas.

Aos amigos que tive prazer durante esse período em São Carlos, em especial Michele, Pamila, Carol, Rose, Andrey, Júlio, Jader, Carlo, Helo e Rubens.

A querida família que me acolheu em São Carlos, que tive o grande prazer de conhecer, e que me apoiou, Dr. Aliomar, Dulce e Mari.

Ao Felipe, por toda a amizade.

Aos funcionários do DECIV Fran e Natália, que sempre demonstraram carinho e amizade.

Aos funcionários do programa de pós-graduação em Engenharia Urbana Pepe e Alex, por toda ajuda nos processos Burocráticos, e ao Professor Erich.

Ao Claudemir, morador do bairro Cidade Aracy, que me ajudou nos ensaios de rebaixamento, fornecendo água e materiais para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Paulo Mancini e Paulo Silva Leme, que me auxiliaram com informações importantes para essa pesquisa.

A todos que de forma direta ou indireta, auxiliaram no desenvolvimento desse trabalho e no meu desenvolvimento como pesquisador, em especial os professores do PPGEU Reinaldo Lorandi, José Lollo, Erich, e Edson Melanda. Ao professor da UNESP César Moreira, por me ajudar a fazer a parte de geofísica. Fernanda e Renata, por toda ajuda no campo de geofísica.

A CAPES, pela bolsa de mestrado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Desde os tempos remotos, a humanidade para se desenvolver tem explorado o meio físico, causando diversas mudanças no planeta, alterando taxas de sedimentação, criando depósitos artificiais, ou mesmo gerando vazios em áreas escavadas, chamados de depósitos e feições antropogênicos. Embora esses depósitos tenham se tornado cada vez mais numerosos, suas propriedades geotécnicas e geológicas ainda são desconhecidas. O objetivo desse trabalho é fazer o levantamento das características geológicas e geotécnicas de uma área antropizada, que consiste em aterro de resíduos sólidos de construção civil, além de outros diversos tipos de entulhos. Como metodologia, foram realizadas as seguintes etapas: análise bibliométrica, de forma a compreender a evolução das abordagens referentes a depósitos antropogênicos; levantamento bibliográfico; análise de imagens digitais; mapeamento dos depósitos e terrenos antropogênicos que ocorrem na área de estudo; realização dos ensaios de campo nas áreas de solo natural, resíduos superficiais e aterros de resíduos de construção civil, de resistência à penetração, de permeabilidade, geofísica de eletrorresistividade e caracterização dos materiais. Com isso, foi possível delimitar a área de ocorrência de aterro de resíduos de construção civil, sua profundidade, contextualizar a evolução do aterro, e determinar características dessa área em superfície. Foi possível determinar que a área de aterro de resíduos de construção civil contribui para a formação de plumas de contaminantes. O lançamento de esgoto no Córrego da Água Quente tem gerado uma pluma de contaminantes profunda, capaz de atingir os poços profundos de captação de água subterrânea. Como os solos naturais, e os materiais da área de aterro apresentam características drenantes, conclui-se que o local não é ideal para abrigar um aterro de resíduos de construção civil.

Palavras-chave: Depósitos Antropogênicos, Depósitos Tecnogênicos, Eletrorresistividade, Resíduos de Construção Civil, Ensaios Geotécnicos.

ABSTRACT

Since ancient times, mankind to develop, has explored the physical environment, causing various changes in the planet, changing sedimentation rates, creating artificial grounds, or even generating voids in excavated areas, called deposits and manmade grounds. Among these deposits are the urban soils, formed in urbanized areas and that have their origin linked to the anthropic action. Although these deposits have become increasingly numerous, their geotechnical and geological properties are still unknown.

The objective of this work is to survey the geological and geotechnical characteristics of an anthropogenic area, which consists of an area that was landed with constructional waste, as well other types of waste. As methodological, a bibliometric analysis was first carried out, to understand the evolution of the anthropogenic deposit approaches; bibliographic survey; digital image analysis; mapping of the manmade grounds that occur in the study area; geotechnical field tests in the areas of natural soil, surface residues and landfills of construction waste, with dynamic penetrometer, infiltration tests, electrical resistivity (geophysics), characterization of wastes. It was possible to delimit the area of occurrence of construction and demolition waste landfill, determine its depth, contextualize the evolution, and to determine the characteristics of this surface area. The waste in the landfill area has been contributing to the formation of contaminant plumes. Also, the discharge of sewage into the Água Quente stream has generated a deep plume of contaminants, capable of reaching the deep wells of groundwater captation. As the natural soils, and the materials of the landfill area have draining characteristics, it is concluded that the site is not ideal place to a construction waste landfill.

Key-words: Anthropogenic Deposits, Technogenic Deposits, Anthropocene, Construction Waste, Geotechnical Tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Proposições para a posição do Antropoceno na coluna cronoestratigráfica. (a) A divisão atual, sem considerar o antropoceno (b) O Holoceno se transformaria em um estágio Holoceniano, pertencente ao Pleistoceno. Fonte: Traduzida e modificada de Lewis e Maslin (2015).....	7
Figura 2 Divisão do Holoceno em três idades. Fonte: Modificado e traduzido de ICS (2018)	8
Figura 3 Relação entre os diferentes ambientes de depósitos antropogênicos. (b) Relação entre os diferentes tipos de composição desses depósitos. Modificado e traduzido de Ford et al. (2014).....	10
Figura 4 Evolução do número de publicações ao longo dos anos. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, 2018).	12
Figura 5 Número total de publicações, citações e média de publicações por artigo dos países mais produtivos na área de pesquisa sobre depósitos antropogênicos. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, 2018).	13
Figura 6 Mapeamento das palavras-chave relacionadas com a área de pesquisa em depósitos antropogênicos, divididas em 4 grupos. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, 2018).....	16
Figura 7 Distribuição de densidade das palavras de maior ocorrência. As cores indicam a densidade de termos, sendo que quanto maior o tamanho da letra, e mais próximo do vermelho, maior a ocorrência da palavra dentro dos artigos. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, 2018)	17
Figura 8 Classificação da geomorfologia antropogênica. Modificado e traduzido de McMillan e Powell (1999).....	23
Figura 9 Perfil do desenvolvimento radicular de soja até 0,30 m, em diferentes níveis de resistência do solo à penetração. Fonte: Beulter e Centurion (2004).....	40
Figura 10 Limite da microbacia do Córrego da Água Quente. Fonte: Lima (2017) e Google Earth, 25 de junho de 2017, modificada pelo autor	46
Figura 11 Localização da área de estudo. A) Mapa da área urbana do município de São Carlos. B) Localização da área de estudo no bairro Cidade Aracy. C) Localização do município de São Carlos no estado de São Paulo.....	47
Figura 12 Fluxograma da metodologia.....	48

Figura 13 Fluxograma da metodologia utilizada para a análise bibliométrica. Fonte: Oliveira e Menezes (2018)	50
Figura 14 Disposição das linhas para a geofísica. Modificado de Google Earth, 25 de junho de 2017.	56
Figura 15 Modelo esquemático do arranjo de Schlumberger. 2l é o espaçamento usado no arranjo entre os eletrodos de potencial, que é menor que o espaçamento dos eletrodos de corrente 2L. Fonte: Milson (2003).	56
Figura 16 Aquisição dos dados geofísicos em campo e aparelhos utilizado.....	57
Figura 17 Penetrômetro de impacto utilizado na pesquisa.	58
Figura 18 Malha de pontos utilizados para o ensaio de compacidade.....	59
Figura 19 Modo de utilização do penetrômetro. Fonte: Stolf (1991).....	60
Figura 20 Chuva acumulada mensal x chuva (normal climatológica 61-90), em São Carlos - SP, para o ano de 2017. Modificado de INMET (2019).	62
Figura 21 Ensaio de infiltração.....	64
Figura 22 Modelo esquemático do ensaio de rebaixamento. Fonte: ABGE (2013a)	65
Figura 23 Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios de rebaixamento.	66
Figura 24 Foto do agitador mecânico do Laboratório de Materiais de Construção, com as peneiras, utilizado no ensaio granulométrico para materiais de aterro e com fragmentos grandes.....	68
Figura 25 Proveta contendo amostras dos materiais, para o ensaio de sedimentação....	69
Figura 26 Agitador mecânico com peneiras, do Laboratório de Geociências utilizado para o peneiramento de materiais miúdos	71
Figura 27 Bomba de Vácuo utilizada para a determinação da massa específica	72
Figura 28 Mapa geológico de São Carlos- SP. Fonte: Pons (2006), modificada pelo autor.	74
Figura 29 Mapa de materiais inconsolidados do bairro Cidade Aracy, São Carlos – SP. Fonte: Aguiar (1989), modificada pelo autor.	75
Figura 30 Foto histórica da área de estudo, de 2007, mostrando a área escavada, a "entulheira do Aracy", o Córrego da Água Quente. Foto fornecida pela Silva Leme Engenharia, modificada pelo autor.	76
Figura 31 Imagens históricas, tirada durante o ano de 2007, mostrando na parte superior da imagem uma chácara na área de estudo, e a presença de entulhos. Foto cedida pela Silva e Leme Engenharia.....	77

Figura 32 Fotografias de 2007 mostrando entulhos depositados na área de estudo. Cedida pela Silva Leme Engenharia.....	78
Figura 33 Fotografias de 2007 mostrando os entulhos depositados na área de estudo. Cedida pela Silva Leme Engenharia.....	78
Figura 34 Fotografias de 2007, mostrando os entulhos depositados na área de estudo. Cedida pela Silva Leme Engenharia.....	78
Figura 35 (A) Foto histórica da área de estudo. Local onde estava prevista a instalação da adutora. Fonte: SILVA LEME ENGENHARIA (2010) e(B) a obra para implantação desta adutora, no ano de 2015. Autora: Denise Menezes	80
Figura 36 Foto da entrada do aterro de resíduos de construção civil, no ano de 2015. Autora: Denise Menezes.....	82
Figura 37 Curvas de nível da área de estudo, no ano de 1989, na escala de 1:10.000, com curvas de nível de 5 em 5 metros. Fonte: IGC (1989) e Google Earth, 30 de junho de 2004.	83
Figura 38 Imagem de satélite do local de estudo e áreas antropizadas vizinhas. Ano de 2004. Fonte: Google Earth, 30 de junho de 2004, modificada pelo autor.....	84
Figura 39 Forma do terreno da área de estudo no ano de 2010. Fonte: Google Earth, 18 de out. de 2010, modificada pelo autor.	85
Figura 40 Levantamento topográfico da área escavada no local de estudo. Levantamento realizado durante o ano de 2010, na escala 1:1.500, e curvas de nível de 5 em 5m. Fonte: mapeamento topográfico fornecido pela Empresa Silva Leme Engenharia, realizada em junho de 2010; Google Earth, 18 de out. de 2010, modificada pelo autor.....	86
Figura 41 Área escavada durante o ano de 2011. Fonte: Google Earth, 1 de jun. de 2011, modificada pelo autor.	87
Figura 42 Foto indicando a presença de pilhas de rejeito, durante o ano de 2012. Fonte: Google Earth, 1 de abril de 2012, modificada pelo autor.....	88
Figura 43 Área de estudo durante o ano de 2013. Aumento da área escavada e presença de exploração de areia na região norte do mapa. Fonte: Google Earth, 16 de abril de 2013, modificada pelo autor.	89
Figura 44 Fechamento da cava, com a deposição de resíduos, durante o ano de 2014. Fonte: Google Earth, 9 de maio de 2014, modificada pelo autor.....	90
Figura 45 Forma atual da área de estudo. Fonte: Google Earth, 21 de maio de 2018....	91

Figura 46 Carta de intervenções antrópicas e solos naturais da área de estudo. Curva de nível obtidas pelo satélite Alos Palsar de 2011. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, no Prelo)	92
Figura 47 Área alagada no local minerado RM2 (ponto C26).	93
Figura 48 Área de rejeitos de mineração (ponto C27).	93
Figura 49 Córrego da Água Quente, coloração alterada devido ao lançamento de efluentes.	94
Figura 50 Afloramento da Formação Botucatu Silicificado.	95
Figura 51 Solos residuais da Formação Botucatu.	96
Figura 52 Perfil do poço piezométrico do poço PMA(A) e PMB (B). Fonte: (SILVA LEME ENGENHARIA, 2007).	97
Figura 53 Linha de seixos de quartzo.	97
Figura 54 Perfil, mostrando o contato entre o nível de cascalho e os solos residuais da Formação Botucatu.	98
Figura 55 Resíduos na área de aterro.	99
Figura 56 Resíduos na área de aterro.	99
Figura 57 Presença de artefatos na camada de aterro.	99
Figura 58 Área de resíduos depositados apenas superficialmente.	100
Figura 59 (A) Início de processos erosivos e (B) Margens do Córrego da Água Quente, pouco coesivas, ocasionando processos erosivos.	101
Figura 60 Perfil geofísico de eletrorresistividade e variação topográfica da linha 1.	104
Figura 61 Perfil geofísico de eletrorresistividade e variação topográfica da linha 2.	105
Figura 62 Perfil geofísico de eletrorresistividade e variação topográfica da linha 3.	106
Figura 63 Perfil geofísico de eletrorresistividade e variação topográfica da linha 4.	107
Figura 64 Perfil geofísico de eletrorresistividade e variação topográfica da linha 4.	108
Figura 65 Distribuição espacial dos resultados obtidos em cada linha no levantamento geofísico	109
Figura 66 Modelo do bloco 3D do levantamento de eletrorresistividade.	110
Figura 67 Figura mostrando corte em planta do levantamento geofísico em diferentes profundidades	111
Figura 68 Materiais coletados no ponto I7	113
Figura 69 Materiais coletados no ponto I8	114
Figura 70 Curva granulométrica dos pontos I7 e I8	115
Figura 71 Figura 81 Materiais coletados no ponto I1	116

Figura 72 Materiais coletados no ponto I9	117
Figura 73 Curva granulométrica dos pontos I1 e I9	118
Figura 74 Materiais coletados no ponto I3	119
Figura 75 Materiais coletados no ponto I4.	120
Figura 76 Materiais coletados no ponto I6	121
Figura 77 Materiais coletados no ponto I10	122
Figura 78 Curva granulométrica dos pontos I3, I4, I6 e I10	123
Figura 79 Amostra de materiais coletados no ponto I2	123
Figura 80 Materiais coletados no ponto I5	124
Figura 81 Curva granulométrica dos pontos I2 e I5.	125
Figura 82 Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios com o penetrômetro. Fonte: Google Earth, 25 de maio de 2017, modificada pelo autor.	126
Figura 83 Gráfico com valores da resistência física a penetração dos pontos em área de solo natural, P14, P22 e P29. Fonte: Autor.	127
Figura 84 Valores da resistência física a penetração dos pontos P6a, P6b, P7 e P8, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.	128
Figura 85 Valores da resistência física a penetração dos pontos P9a, P9b, P9c e P10, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.	128
Figura 86 Valores da resistência física a penetração dos pontos P11, P12, P16 e P17a, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.	129
Figura 87 Valores da resistência física a penetração dos pontos P17b, P17c, P17d e P19a, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.	129
Figura 88 Valores da resistência física a penetração dos pontos P19b, P20a, P20b e P20c, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.	130
Figura 89 Valores da resistência física a penetração dos pontos P21, P23, P24a, P24b e P25, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.	130
Figura 90 Valores da resistência física a penetração dos pontos P27 e P28, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor	131
Figura 91 Valores da resistência física a penetração dos pontos P1, P2, P3 e P4, em área de resíduos superficiais. Fonte: autor.	132
Figura 92 Gráfico com valores da resistência física a penetração dos pontos em área resíduos superficiais, P5, P13, P18, P26, P31 e P32. Fonte: autor	132
Figura 93 Localização dos ensaios de rebaixamento, com seus respectivos valores de condutividade hidráulica.	133

Figura 94 Figura 62 Valores médios das taxas de infiltração, de acordo com a faixa granulométrica. Fonte: ABGE (2013)	134
Figura 95 Presença de vazios no ponto II	136
Figura 96 Mapa da área de estudo	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Informações gerais sobre as publicações do campo de estudo. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, 2018).	12
Tabela 2 Principais autores da área de estudo, com o número de publicações e sua origem. Fonte: (OLIVEIRA E MENEZES, 2018).	14
Tabela 3 Principais revistas da área de estudo e o número de publicações. Fonte (OLIVEIRA; MENEZES, 2018)	14
Tabela 4 Comparação das características dos solos naturais e urbanos. Modificado de Craul (1985), Lehmann e Stahr (2007) e Gregory et al. (2006)	20
Tabela 5 Classificação proposta por Peloggia et al. (2014)	53
Tabela 6 Comprimento das linhas e número de eletrodo por linha.	56
Tabela 7 Especificações do penetrômetro de impacto IAA/PLANALSUCAR-STOLF. Fonte: Stolf, Fernandes e Neto (1983).....	58
Tabela 8 Resultados da literatura para a correlação qc/NSPT para areias. Onde qc é valor da resistência física no penetrômetro de impacto em Mpa e NSPT valor da resistência física no ensaio SPT. Fonte: (MORAES, 2008).	61
Tabela 9 Comparação de diferentes valores de resistividades para substratos semelhantes.	103
Tabela 10 Análise granulométrica no ponto I7	113
Tabela 11 Análise granulométrica no ponto I8	114
Tabela 12 Análise granulométrica no ponto I1	116
Tabela 13 Análise granulométrica no ponto I9	117
Tabela 14 Análise granulométrica no ponto I3	119
Tabela 15 Análise granulométrica no ponto I4	120
Tabela 16 Análise granulométrica no ponto I6	121
Tabela 17 Análise granulométrica no ponto I10	122
Tabela 18 Análise granulométrica no ponto I2	124
Tabela 19 Análise granulométrica no ponto I5	125

Tabela 20 Profundidade, tempo do ensaio e valor da condutividade hidráulica (k) em materiais naturais. Fonte o autor.....	134
Tabela 21 Profundidade, tempo do ensaio e valor da condutividade hidráulica (k) em área de aterro. Fonte: autor.....	135
Tabela 22 Tabela 10 Profundidade, tempo do ensaio e valor da condutividade hidráulica (k) em área de resíduos superficiais. Fonte: autor.....	137

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	3
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.2 JUSTIFICATIVA	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 ANTROPOCENO	5
2.2 DEPÓSITOS ANTROPOGÊNICOS/TECNOGÊNICOS.....	8
2.3 DEPÓSITOS ANTROPOGÊNICOS: EVOLUÇÃO DAS ABORDAGENS POR MEIO DE ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	11
2.4 SOLOS URBANOS	18
2.5 PRINCIPAIS CLASSIFICAÇÕES DOS TERRENOS ANTROPOGÊNICOS / TECNOGÊNICOS	20
2.5.1 CLASSIFICAÇÃO DE FANNING E FANNING (1989)	21
2.5.2 CLASSIFICAÇÃO DA BRITISH GEOLOGICAL SURVEY (BGS)	22
2.6 GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	27
2.7 DELIMITAÇÃO E MAPEAMENTO DE TERRENOS ANTROPOGÊNICOS. 31	
2.8 INVESTIGAÇÕES GEOLOGICO-GEOTECNICAS	32
2.8.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO	35
2.8.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO.....	37
2.8.3 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE.....	40
2.8.4 GEOFÍSICA	42
2.9 INVESTIGAÇÕES DE PARÂMETROS FÍSICOS DE ATERRO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	44
3 METODOLOGIA.....	45
3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	45
3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS.....	47

3.2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	48
3.2.2 ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS	50
3.2.3 LEVANTAMENTO DE DADOS DA ÁREA	51
3.2.4 MAPEAMENTO DA ÁREA DO ATERRO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DO ENTORNO	51
3.2.5 INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICA GEOTECNICA.....	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	73
4.1.1 CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	73
4.2 EVOLUÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	75
4.3 EVOLUÇÃO DAS ALTERAÇÕES NA ÁREA COM USO DE ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS.....	83
4.4 FORMAÇÕES NATURAIS, DEPÓSITOS E FEIÇÕES ANTROPOGÊNICOS	91
4.4.1 DESCRIÇÃO DOS DEPÓSITOS NA REGIÃO	93
4.4.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DA ÁREA DE ESTUDO	95
4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS	102
4.5.1 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO	102
4.5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	112
4.5.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO	126
4.5.4 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE.....	133
5 COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	137
6. CONCLUSÕES	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
ANEXOS	155

1. INTRODUÇÃO

O Holoceno, idade da Terra que teve início aproximadamente há 10 mil anos, é marcado pelo crescimento gradual da atividade humana, causando alterações geológicas e morfológicas significativas. Essa força de alteração pode ser comparada com outras grandes forças no planeta, capazes de provocar grandes modificações (CRUTZEN; STOERMER, 2000). A partir desse período, a humanidade passou a produzir alterações na superfície do planeta, que começaram com pequenas escavações para criar ferramentas para caça, chegando à formação de depósitos sedimentares artificiais.

O período do tempo geológico, a partir do qual as ações humanas se tornaram o principal agente geológico e geomorfológico, vem sendo denominado de Antropoceno. O termo começou a ganhar relevância mundial após trabalhos publicado por Crutzen e Stoermer (2000) e Crutzen (2002), no qual ressaltam a importância da capacidade das ações humanas em causar modificações no meio ambiente.

Para estabelecer o Antropoceno como uma unidade cronoestratigráfica, é necessário considerar uma gama de indicadores de mudanças ambientais induzidos pela humanidade e determinar como eles se apresentam como camadas estratigráficas (WATERS et al., 2014). Zalasiewicz et al. (2008) propuseram que o Antropoceno, pode ser discutido através dessas camadas, afirmando que as atividades humanas têm deixado assinaturas na Terra, diferindo do Holoceno, ou mesmo do Pleistoceno, abrangendo mudanças bióticas, sedimentares e geoquímicas.

Tem-se como um dos resultados das ações do homem sobre a natureza a formação de depósitos antropogênicos. Como consequência, esses locais, muitas vezes, podem representar problemas para a engenharia, apresentando riscos como condições imprevisíveis do comportamento do solo, riscos geológicos, contaminações de águas subterrâneas, modificação no regime hidrogeológico e contaminações por poluição (ROSENBAUM et al., 2003).

Solos urbanos, que são um tipo de terreno antropogênico, são gerados devido a uma intervenção antrópica na natureza, em ambientes urbanos. São formados principalmente devido aos processos de urbanização, gerando assim solos mais compactados, áreas aterradas, rios contaminados, entre outro, gerando problemas especiais para a engenharia (CRAUL, 1985). Estes solos apresentam características

completamente diferentes dos solos formados por processos naturais, tanto em composição quanto em estrutura.

O mapeamento e caracterização de materiais formadores de depósitos antropogênicos, principalmente em áreas urbanas, é de extrema importância para o desenvolvimento e crescimento das cidades. A justificativa desse tema se dá principalmente devido à importância do mapeamento desses terrenos para a engenharia, pois esses locais podem ser base para a construção civil, agricultura urbana, áreas verdes, descarte de resíduos e infiltração de águas superficiais (PEDRON et al., 2004), podendo atingir um número grande de pessoas, uma vez que impactam a dinâmica natural dos processos superficiais gerando inclusive riscos ambientais.

O conhecimento das propriedades físicas desses terrenos antropogênicos, tem se tornado extremamente importante, devido ao fato que, projetos de desenvolvimento urbano, têm ocorrido cada vez mais nesses locais. Esse processo permite uma maior densificação e limita a expansão urbana, tornando as cidades mais compactas (GUERN et al., 2016). Portanto, problemas devido à contaminação de solos, estão intimamente ligados ao gerenciamento de riscos associados ao desenvolvimento desses locais, onde geralmente se concentram fontes antropogênicas de contaminantes (MENDONÇA et al., 2015).

Um tipo de depósito antropogênico, que tem se tornado cada vez mais comum em centros urbanos, são os aterros de resíduos de construção civil. De acordo com a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), esses locais deveriam receber apenas resíduos de construção civil classe A, que são classificados como resíduos inertes e com baixo potencial de contaminação. Mas na prática, esses aterros recebem diversos tipos de resíduos, como materiais classificados como perigosos e não inertes, lixo doméstico, gesso, podas de árvores, entre outros. Como esses aterros não possuem, em sua maioria, mantas ou materiais impermeáveis na sua base, o que reduziria o impacto de contaminação de solos e águas subterrâneas, tornam-se áreas ambientalmente mais frágeis, podendo também colocar a população em condições de vulnerabilidade. Segundo Córdoba (2014), o lixiviado desses aterros de resíduos de construção civil pode alterar características físico-químicas de águas subterrâneas, e uma vez que valores de metais pesados contidos nesses resíduos (como Pb, Cd, Fe, Mn e Al) excedem os valores máximos permitidos para o consumo humano, podem gerar riscos à saúde.

Para a utilização dessas áreas para as diversas obras de engenharia, como a instalação de casas populares ou mesmo instalação de prédios públicos, por exemplo, faz-

se necessário um estudo mais aprofundado, de forma a se conhecer suas características geotécnicas. Uma vez que as condições ambientais, geológicas e geotécnicas são parâmetros muito importantes em relação à utilização dessas áreas para a engenharia, é necessária uma cuidadosa investigação do local antes do planejamento de reocupação de tal área (VARGEMEZIS et al., 2015).

A NBR 8044 (ABNT, 2018), norma brasileira mais recente para avaliação geológica e geotécnica, não apresenta procedimentos para a caracterização de áreas de depósitos antropogênicos; mas a norma europeia ISO 14688 (ISO, 2018), já apresenta diretrizes para a descrição dos materiais contidos nesses depósitos.

A partir dessas características, surgiu o interesse nesse tema de mestrado. Uma vez que esses depósitos podem representar diversos impactos ambientais, levantar características geotécnicas, principalmente referentes às taxas de infiltração e composição desses depósitos, se torna uma tarefa muito importante, principalmente para o planejamento urbano.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Essa pesquisa tem por objetivo determinar características geológicas e geotécnicas de um aterro formado por resíduo de construção civil.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Configuram-se como objetivos específicos dessa pesquisa:

- Quantificar as principais características físicas do depósito antropogênico e dos materiais naturais.
- Determinar a área de ocorrência de depósito antropogênico, sua espessura, e possíveis plumas de contaminantes.

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, trabalhos voltados para a área de mapeamentos geológicos e geotécnicos quantitativos de depósitos antropogênicos são ainda incipientes, e as diversas propriedades destes tipos de terrenos, como condutividade hidráulica, compacidade, presença de estratificação, textura, entre outros, são pouco conhecidas. De uma forma geral, em projetos de mapeamentos geológicos ou geotécnicos, depósitos antropogênicos não são considerados nos mapas. Já os mapeamentos que levam em consideração esse tipo de depósito, em sua maioria não realizam um estudo aprofundado, delimitando apenas como área de aterro ou qualquer outro tipo de depósito antropogênico.

De acordo com dados da ONU (2016), aproximadamente 54% da população mundial reside em cidades, e a projeção para 2030 é de 60%. Com isso, o número de áreas afetadas devido à ação humana tenderá a se tornar maior, gerando uma maior exploração do meio ambiente para atender esse aumento considerável da população nos centros urbanos. Portanto, o conhecimento das características desses tipos de depósitos é essencial para o planejamento das cidades. Considerando os aterros, uma das alterações por ser área de descarte de materiais, a ocorrência de diversos tipos de contaminantes, que podem estar infiltrando, e posteriormente contaminando aquíferos subjacentes.

De acordo com A Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002) aterros de resíduos de construção civil e demolição, são áreas que devem receber apenas resíduos do tipo classe A (que são resíduos recicláveis ou reutilizáveis como agregados) de resíduos de construção civil, de forma a apenas reservar esses materiais para uma utilização futura. Mas na prática, nesses aterros, têm sido depositados além de materiais classe A diversos tipos de resíduos, muitos deles que não são inertes (gesso), materiais com metais pesados (resíduos de tintas), óleos de motor, podas de jardim, lixo doméstico, entre outros. Portanto, o potencial contaminante pode ser maior do que é considerado.

Existe ainda um agravante maior, devido ao fato do bairro Cidade Aracy, onde se localiza o aterro de resíduos de construção civil, ser uma área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (MARTINS; FIGUEIREDO, 2010). Com isso, o conhecimento das características geológicas e geotécnicas da área de estudo é extremamente importante.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ANTROPOCENO

O termo Antropoceno foi proposto inicialmente em trabalhos publicados por Crutzen e Storm (2000) e Crutzen (2002), onde uma nova época geológica teria se iniciado. Segundo os autores, o Holoceno, que é o nome dado à época geológica que se iniciou após a última era glacial, há 11.700 anos (ICS, 2018), teria terminado. Com isso, a intensidade das ações humanas, no último século, tem provocado alterações significativas na superfície do planeta (OLIVEIRA; PELOGGIA; OLIVEIRA, 2018)

Esse assunto de pesquisa começou a ganhar popularidade após trabalho publicado por TER-STEPANIAN (1988). Esse autor aponta o crescimento das induções humanas no meio ambiente durante o Holoceno.

Anteriormente a esta época, as ações humanas capazes de promover modificações são comparadas a de qualquer outra forma de vida sobre a superfície terrestre. No Brasil, esse período onde as ações humanas são reconhecidas como um agente geológico é também denominado de Tecnógeno (PELOGGIA, 1997; OLIVEIRA, 2005) ou Antropoceno (PELOGGIA 2016).

De acordo com CRUTZEN (2002), o homem vem provocando diversas alterações na natureza, entre elas destacam-se: crescimento na utilização de combustíveis fósseis; grande desmatamento devido à agricultura; aumento da pecuária; aumento considerável na emissão de gases causadores do efeito estufa na atmosfera; grande crescimento da população mundial, aumentando o espaço urbanizado; entre outros. O homem passou a ser o principal agente geológico capaz de provocar significativas mudanças na superfície da terra. Algumas dessas mudanças parecem ser permanentes, mesmo considerando a escala de tempo geológica (ZALASIEWICZ et al., 2010).

Além disso, a humanidade tem modificado consideravelmente diversos ciclos biogeoquímicos como nitrogênio, fósforo e enxofre, que são fundamentais para vida na terra (STEFFEN et al., 2011). Esse autor afirma também que a humanidade tem provocado fortes modificações nos ciclos hidrológicos das águas superficiais, devido a alterações no uso da terra, e principalmente, tem provocado o que seria um dos maiores eventos de extinção em massa da história do planeta. Devido a esses fatos, e o importante papel que o homem tem exercido como um agente capaz de promover mudanças na superfície da terra, se justifica a criação de uma nova época geológica.

Apesar de ainda não existir um consenso, diversos pesquisadores têm defendido que o Antropoceno se iniciou após a revolução industrial (CRUTZEN; STOERMER, 2000; CRUTZEN, 2002; STEFFEN; CRUTZEN; MCNEILL, 2007; ZALASIEWICZ et al., 2008, 2011; ZALASIEWICZ; WILLIAMS, 2010) . Esse período se configura como entre os três ou quatro momentos mais importantes de transição na história da Terra (Steffen et al., 2007). A população mundial saltou de 1 bilhão de pessoas, no início dos anos 1800, para um total de aproximadamente 6,5 bilhões nos dias atuais, o que provocou um grande aumento na utilização dos combustíveis fósseis (ZALASIEWICZ et al., 2008).

Algumas das evidências que apontam para o início do Antropoceno durante o período da revolução industrial seriam as concentrações na atmosfera de dois grandes gases causadores do efeito estufa, CO₂ e CH₄ (RUDDIMAN, 2013). Zalasiewicz et al. (2008) apontam evidências para o início dessa época através de critérios estratigráficos. O tempo geológico pode ser reconhecido por eventos distintos que se encontram registrados nos diversos estratos. O impacto das transformações antropogênicas na superfície, juntamente com a transferência de solos e rochas, e o legado que deixou acima e abaixo do solo, pode ser usado como um indicador da atividade humana (PRICE et al., 2011).

Em contrapartida, Zalasiewicz et al. (2008) afirmam também que, apesar dessas mudanças possam parecer abruptas em centenas ou milhares de anos, são marcadores graduais quando se trata em uma escala de tempo em meses ou anos. Portanto, sugere como bons marcadores para o início do Antropoceno os testes realizados com a bomba atômica, durante a década de 60, ou mesmo um marcador natural, a erupção do Monte Tambora em abril de 1815, que produziu o “ano sem verão” no Hemisfério Norte.

Lewis e Maslin (2015) propuseram duas alternativas para delimitar o Antropoceno como uma nova época geológica na coluna cronoestratigráfica Figura 1. Na opção 1, o Antropoceno é posterior ao Holoceno, sendo ambas épocas do período geológico Quaternário. Na opção 2, o Antropoceno é uma época, mas o Holoceno se configura como um Estágio Holoceniano, sendo uma idade pertencente à Época Pleistoceno. A maior dúvida sobre a posição estratigráfica se dá justamente em decidir quando o Holoceno passa a ser distinto do Antropoceno e do Pleistoceno.

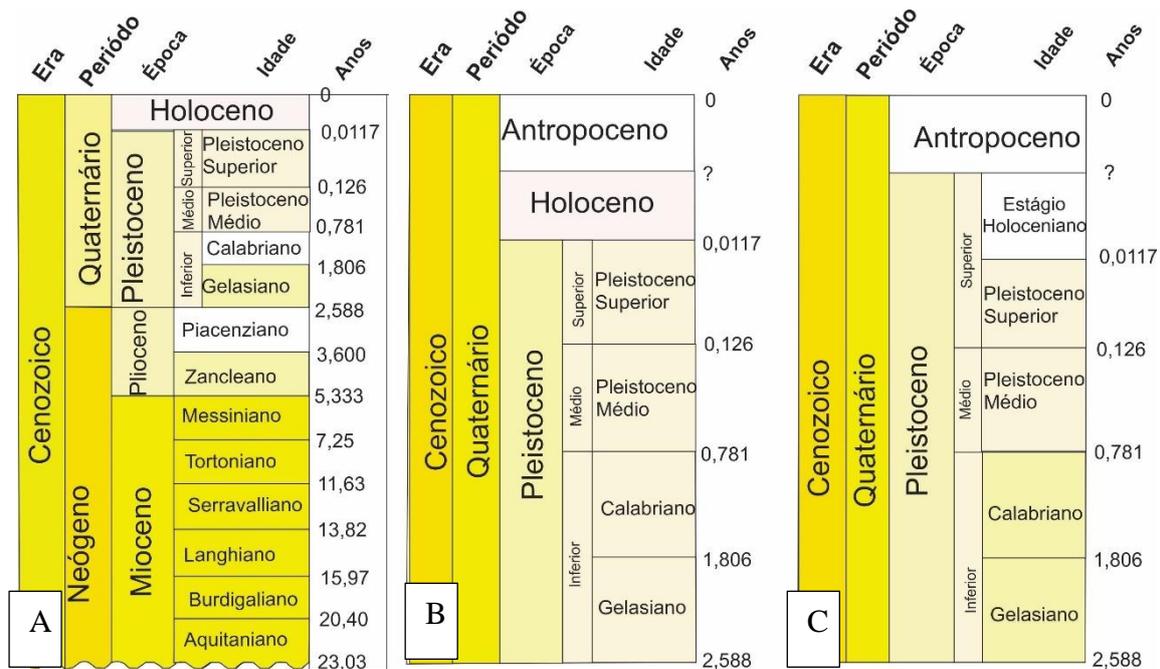


Figura 1 Proposições para a posição do Antropoceno na coluna cronoestratigráfica. (a) A divisão atual, sem considerar o antropoceno (b) O Holoceno se transformaria em um estágio Holoceniano, pertencente ao Pleistoceno. Fonte: Traduzida e modificada de Lewis e Maslin (2015).

No ano de 2018, a Comissão Internacional de Estratigrafia – ICS (2018) definiu que o planeta terra encontra-se em nova idade geológica, denominada de Meghalayan. Segundo essa definição, o Holoceno foi dividido (Figura 2) nas idades: Greenlandian (11700 até 8200 anos atrás), Northgrippian (de 8200 até 4200 anos atrás) e Meghalayan (iniciada em 4200 anos atrás até o presente).

Éon	Éra	Período	Época	Anos				
Cenozoico	Quaternário	Holoceno	Meghalayan	Presente				
			Northgrippian	0,0042				
			Greenlandian	0,0082				
		Pleistoceno	Superior	Pleistoceno Superior	0,0117			
				Médio	Pleistoceno Médio	0,126		
					Inferior	Calabriano	0,781	
			Gelasiano	Gelasiano		1,806		
						Gelasiano	Gelasiano	2,588
								Gelasiano

Figura 2 Divisão do Holoceno em três idades. Fonte: Modificado e traduzido de ICS (2018)

Segundo Voosen (2018) essa proposta de divisão tem causado divergência entre os pesquisadores pelo seguinte motivo: o início da idade Meghalayan foi definido baseado em sinais de uma grande seca, ocorrida há 4.200 anos atrás. Entretanto, pesquisadores têm defendido que esse período de seca não foi global e não foi fixa nesse período específico do tempo. Com isso, a criação de uma idade denominada Antropoceno continua em debate.

Independente da definição da nova idade, as alterações na superfície do planeta, causadas devido a população humana, são inegáveis, gerando alterações nas formas de relevo, formas e depósitos que estão sendo estudados pelas geociências.

2.2 DEPÓSITOS ANTROPOGÊNICOS/TECNOGÊNICOS

Esse capítulo apresenta reprodução de partes do artigo publicado pelo autor no Congresso Nacional de Geotecnia (16CNG, Ponta Delgada, Açores, Portugal) (OLIVEIRA; MENEZES, 2018).

Devido à intervenção humana no meio ambiente, de forma direta, são gerados os depósitos antropogênicos. Suas características são diversas, podendo ser derivadas de antigas atividades de mineração, que podem gerar subsidência do terreno e modificações no ciclo hidrogeológico; processos industriais, que geram restos que precisam ser depositados em algum terreno, gerando condições imprevisíveis do solo; movimentações do terreno, caracterizados por solos mal compactados; e contaminações de águas e solos (ROSENBAUM et al., 2003). Esses tipos de depósitos não são formados apenas pela deposição de materiais.

Esses depósitos podem ser gerados devido a uma ação direta da humanidade sobre o meio, sendo as consequências claramente reconhecidas. Representam uma ação deliberada do homem sobre o meio ambiente, extraindo, transferindo, descartando solos e materiais antropogênicos. São exemplos de atividades antropogênicas diretas: deposição de solos e materiais em aterros, interferência na disposição natural de materiais através de barragens (interferências nos ciclos hidrológicos), áreas de descarte (ex. pilhas de rejeito de mineração), escavações (minas e pedreiras), fazendas (incluindo cultivo, pastagem e horticultura) e atividades militares (crateras) (SZABÓ, 2010; PRICE et al., 2011; FORD et al., 2014).

Há também áreas que são afetadas por ações antropogênicas, mas de forma indireta. Pode ser a remoção de materiais naturais, seja por escavação ou qualquer outra alteração na superfície terrestre gerando vazios, que as tornam mais difíceis de serem reconhecidas que as ações diretas (SZABÓ, 2010). São gerados por ações antropogênicas de forma não intencional, onde a movimentação, transporte, deposição ou remoção do material não é a ação principal. São formados por uma combinação de processos eólico, hidrológico e erosional, relacionados com perda ou transporte de solos através de modificações no uso da terra, aumentando taxas de erosão, causando enchentes (devido a impermeabilização do solo causado pela urbanização), subsidência de terrenos (quando ocorre extração de águas subterrâneas de forma inadequada) entre outros (SZABÓ, 2010; PRICE et al., 2011).

Segundo Ford et al. (2014), os depósitos antropogênicos se diferenciam: por sua natureza, pois muitas unidades antropogênicas são estritamente alostratigráficas, podendo ser definidas e identificadas com base em descontinuidades limitantes; muitos desses depósitos não possuem estratos sobrepostos e a forma de relevo associada pode mostrar características que podem ajudar a definição de uma unidade; são litologicamente heterogêneos, com composições caracterizadas por quantidades consideráveis de

materiais fabricados por seres humanos, rochas, solos entre outros. Além do mais, solos de depósitos antropogênicos apresentam um valor mais elevado de argilas e matérias orgânicas, quando comparados com solos naturais, apresentando uma maior condutividade elétrica, principalmente devido a presença dos artefatos presentes no solo (HOWARD, 2014).

Depósitos antropogênicos podem ser formados por uma mistura de materiais geológicos naturais modificados (areia, cascalho, rochas calcárias, folhelhos, carvão, resíduos minerais entre outros), com materiais que são fabricados pelo homem (plásticos, metais, vidros e outros) (ZALASIEWICZ et al., 2011). Apesar disso, esses depósitos podem coexistir com depósitos sedimentares ou ambientes naturais, devido a uma modificação nos ambientes naturais (FORD et al., 2014).

A Figura 3 mostra a relação entre ambientes formados naturalmente (ambientes sedimentares naturais), os ambientes antropogênicos (gerados devido a uma ação direta do homem) e os indiretamente modificados (formados devido a uma ação indireta do homem). Apresenta também a relação dos materiais predominantes que os compõem, partindo-se de materiais naturais (solos formados de forma natural, devido a ação de agentes naturais), materiais antropogênicos (materiais que são gerados pelo homem) e materiais antropogênicamente redepositados ou materiais retrabalhados (que são materiais naturais, mas que foram redepositados devido a ação humana).

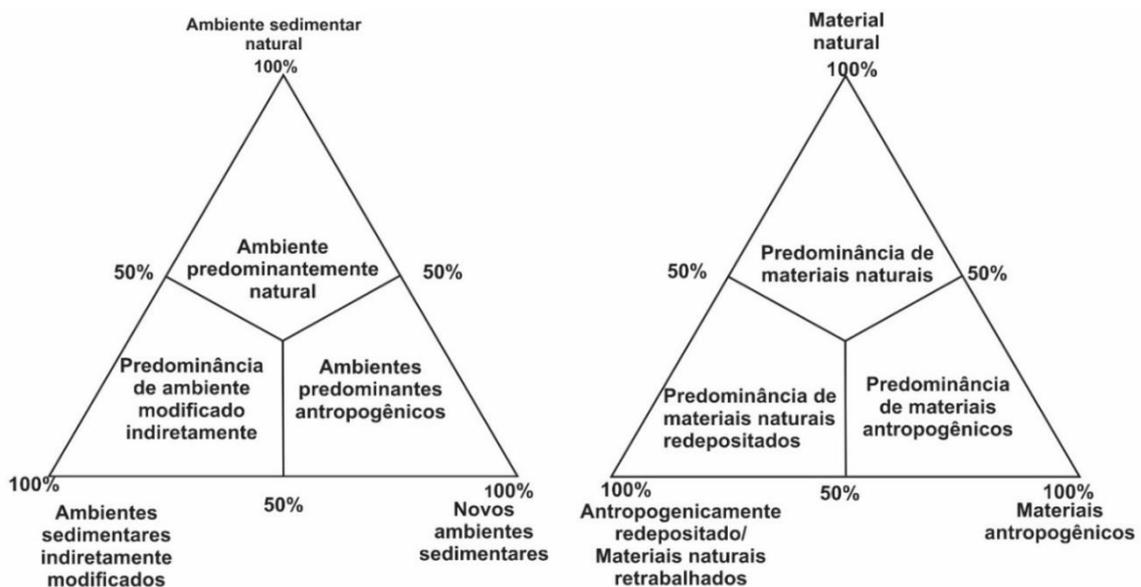


Figura 3 Relação entre os diferentes ambientes de depósitos antropogênicos. (b) Relação entre os diferentes tipos de composição desses depósitos. Modificado e traduzido de Ford et al. (2014).

2.3 DEPÓSITOS ANTROPOGÊNICOS: EVOLUÇÃO DAS ABORDAGENS POR MEIO DE ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Esse capítulo apresenta reprodução de partes de artigo publicado pelo autor na revista anuário de Geociências da UFRJ (OLIVEIRA; MENEZES, 2018).

Uma das formas de compreender a evolução dos enfoques e abordagens sobre esses depósitos é através de análises bibliométricas de publicações que foram feitas desde o aparecimento do termo até os dias atuais. A bibliometria é a análise estatística de livros, artigos e outras publicações. Os métodos bibliométricos podem ser utilizados para fornecer uma análise da literatura científica em um campo específico, para avaliar a popularidade e o impacto de publicações específicas de autores e instituições (DABI et al., 2016). Estes permitem aos pesquisadores basear seus estudos em dados bibliográficos produzidos por outros cientistas que trabalham em áreas similares (ZUPIC; ČARTER, 2015). Esta análise auxiliou no direcionamento da pesquisa, com a escolha das revistas e artigos, e as diferentes áreas dentro do tema de pesquisa.

As publicações desse campo de estudo, das áreas delimitadas pelas palavras-chave “anthropogenic deposit” ou “technogenic deposit” se iniciaram no ano de 1974 e apresentaram até o momento da pesquisa, um total de 118 trabalhos de 84 meios diferentes (revistas, livros, periódicos;

Tabela 1). Como mostrado na Figura 4, o número de publicações tem aumentado ao longo dos anos, apresentando uma taxa de crescimento médio anual de 4,68% por ano. Percebe-se que essa área de estudo se encontra em ascensão, com um aumento considerável no número de trabalhos publicados a partir do ano de 2006, apresentando um grande crescimento até os dias de hoje. Estes resultados representam uma análise prévia do tema estudado, sendo importante para auxiliar na busca de artigos e compreender melhor o tema. Nesse contexto, o gráfico apresenta uma queda no número de publicações no ano de 2018 pois a pesquisa foi realizada em janeiro deste ano, não representando uma queda de interesse no tema.

Tabela 1 Informações gerais sobre as publicações do campo de estudo. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, 2018).

Número de publicações	118
Período das publicações	1974 - 2018
Fontes (Revistas, livros, anais de congresso e outros)	84
Média de citações por artigo	8,017
Número de autores	445
Artigos por autor	0,265
Autores por artigo	3,77

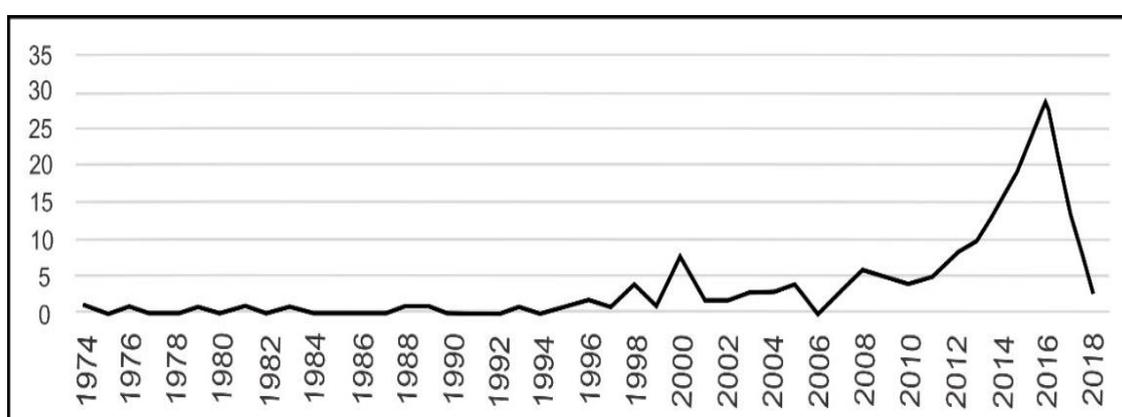


Figura 4 Evolução do número de publicações ao longo dos anos. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, 2018).

A partir dos dados analisados, pode-se concluir que a maior parte das publicações nesse campo de estudo são originadas da Rússia e do Reino Unido, como mostrado na Figura 5. Apesar disso, os Estados Unidos apresentam uma maior média de citações por artigo, o que evidencia um maior número de publicações relevantes ou em veículos conceituados. Da República Tcheca, embora haja apenas duas publicações, estas apresentam uma elevada média de citação por artigo, mostrando também que possuem trabalhos bem-conceituados.

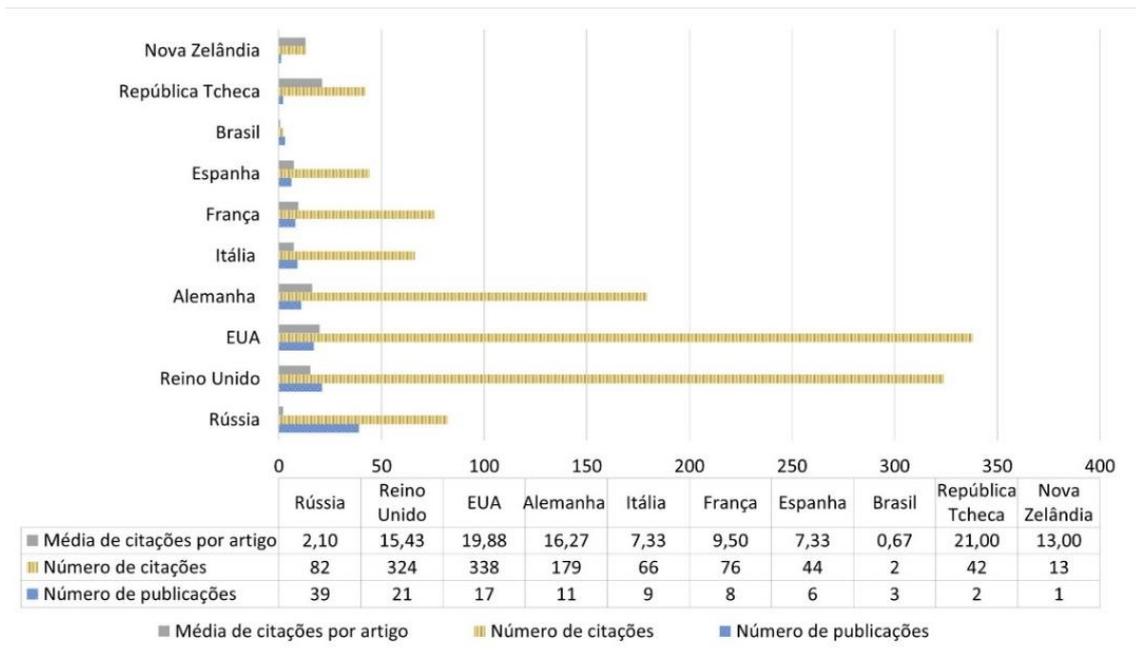


Figura 5 Número total de publicações, citações e média de publicações por artigo dos países mais produtivos na área de pesquisa sobre depósitos antropogênicos. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, 2018).

Entre os 445 autores, foram listados os 15 mais produtivos, indicando seu país de origem, como mostrado na Tabela 2. Entre eles, existe uma predominância de autores que publicam trabalhos na Rússia e Reino Unido, evidenciando a importância da contribuição destes países para o estudo de depósitos antropogênicos, em especial a instituição *British Geological Survey* (Reino Unido). Na Tabela 3 estão as revistas que mais publicam trabalhos relacionados a depósitos antropogênicos, sendo que a revista *International Multidisciplinary Scientific GeoConference* é a que possui mais trabalhos publicados, com um total de sete artigos. As publicações estão bastante dispersas em revistas de áreas distintas, embora sejam geralmente da área de geociências ou ciências do solo.

Tabela 2 Principais autores da área de estudo, com o número de publicações e sua origem. Fonte: (OLIVEIRA E MENEZES, 2018).

Autor	Número de publicações	País	Instituição
Makarov, D.	6	Rússia	Russian Academy of Sciences
Price, S. J.	4	Reino Unido	British Geological Survey
Taskin, A. V.	4	Rússia	Far Eastern Federal University
Gutiérrez, F.	3	Espanha	Universidad de Zaragoza
Makarov, V. N.	3	Rússia	Kola Science Center
Svetlov, A.	3	Rússia	Kola Science Center
Argimbaev, K.R.	3	Rússia	National Mineral Resource
Bezuglova, O. S.	2	Rússia	Southern Federal University
Blume, H. P.	2	Alemanha	Christian-Albrechts- Universität
Carbonel, D.	2	Espanha	Universidad de Zaragoza,
Cooper, A. H.	2	Reino Unido	British Geological Survey
Edgeworth, M.	2	Reino Unido	Universit of Leicester
Ford, J. R.	2	Reino Unido	British Geological Survey
Galve, J. P.	2	Espanha	Universidad de Granada
Rapp, G. G.	2	Estados Unidos	University of Minessota

Tabela 3 Principais revistas da área de estudo e o número de publicações. Fonte (OLIVEIRA; MENEZES, 2018)

Revista	Número de publicações
<i>International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying</i>	7
<i>Quaternary International</i>	5
<i>Enviromental Earth Science</i>	4
<i>Geological Society Special Publication</i>	3
<i>Journal of Archaeological Science</i>	3
<i>Journal of Soils and Sediments</i>	3
<i>Archaeological and Anthropological Sciences</i>	2
<i>Catena</i>	2
<i>Eurasian Soil Science</i>	2
<i>Geoarchaeology</i>	2
<i>Geomorphology</i>	2

Através da utilização do software *Vosviewer*, foi encontrado um total de 1.182 palavras nos resumos e títulos dos artigos relacionados a depósitos antropogênicos. Foram classificadas as palavras que se repetiram pelo menos 3 vezes. Posteriormente, essas

palavras foram separadas em quatro grupos (Figura 6), que são: (1) *Arqueologia*, representado pelos círculos azuis, cujo objetivo é relacionar as evidências para a formação de depósitos antropogênicos; (2) *Geologia e solos*, representado pelos círculos verdes, relacionado a estudos das principais características físicas desse tipo de depósito; (3) *Depósitos urbanos*, representado pelos círculos amarelos, relacionado a trabalhos nos diversos tipos de depósitos; e (4) *Mineração*, representado pelos círculos vermelhos, com estudos os depósitos antropogênicos relacionados a mineração.

Na Figura 6, observa-se que, quanto maior for o tamanho da fonte e do círculo, maior é o número de repetições dessa palavra nos resumos e títulos dos artigos. Desta forma, as palavras “deposits”, “archaeology” e “anthropogenic deposit” são as que possuem um maior número de ocorrências.

No grupo 1 (Arqueologia), as palavras mais encontradas foram: “radiocarbon dating” (datação de radiocarbono), “holocene” (holoceno), “human settlement” (assentamento humano), “archeology” (arqueologia), “geomorphology” (geomorfologia), “urbanization” (urbanização). Essas palavras, demonstram uma maior relação desses artigos com temas mais próximos da arqueologia, procurando através de artefatos gerados devido a atividade humana, explicar a formação de depósitos antropogênicos.

No grupo 2 (Geologia e solos) foram encontradas as seguintes palavras chaves: “stratigraphy” (estratigrafia), “three-dimensional modeling” (modelamento tri-dimensional), “anthropogenic deposit” (depósito antropogênico), “anthropocene” (antropoceno), “soils” (solos), “urban areas” (áreas urbanas) e “geology” (geologia). A palavra “urban area” (área urbana) se justifica devido à preocupação desses depósitos em áreas urbanas, trazer riscos para a população. No grupo 3 (Depósitos urbanos): “gold” (ouro), “technogenic deposit” (depósito tecnogênico), “waste disposal” (disposição de resíduos). E no grupo 4 (Mineração): “environmental monitoring” (monitoramento ambiental), “weathering” (intemperismo), “lead” (chumbo), “deposit” (depósito), “geochemistry” (geoquímica), “lead” (cobre), “iron” (ferro), “flotation” (flotação), “technogenic deposits” (depósitos tecnogênicos), “extraction” (extração) e “slags” (escória).

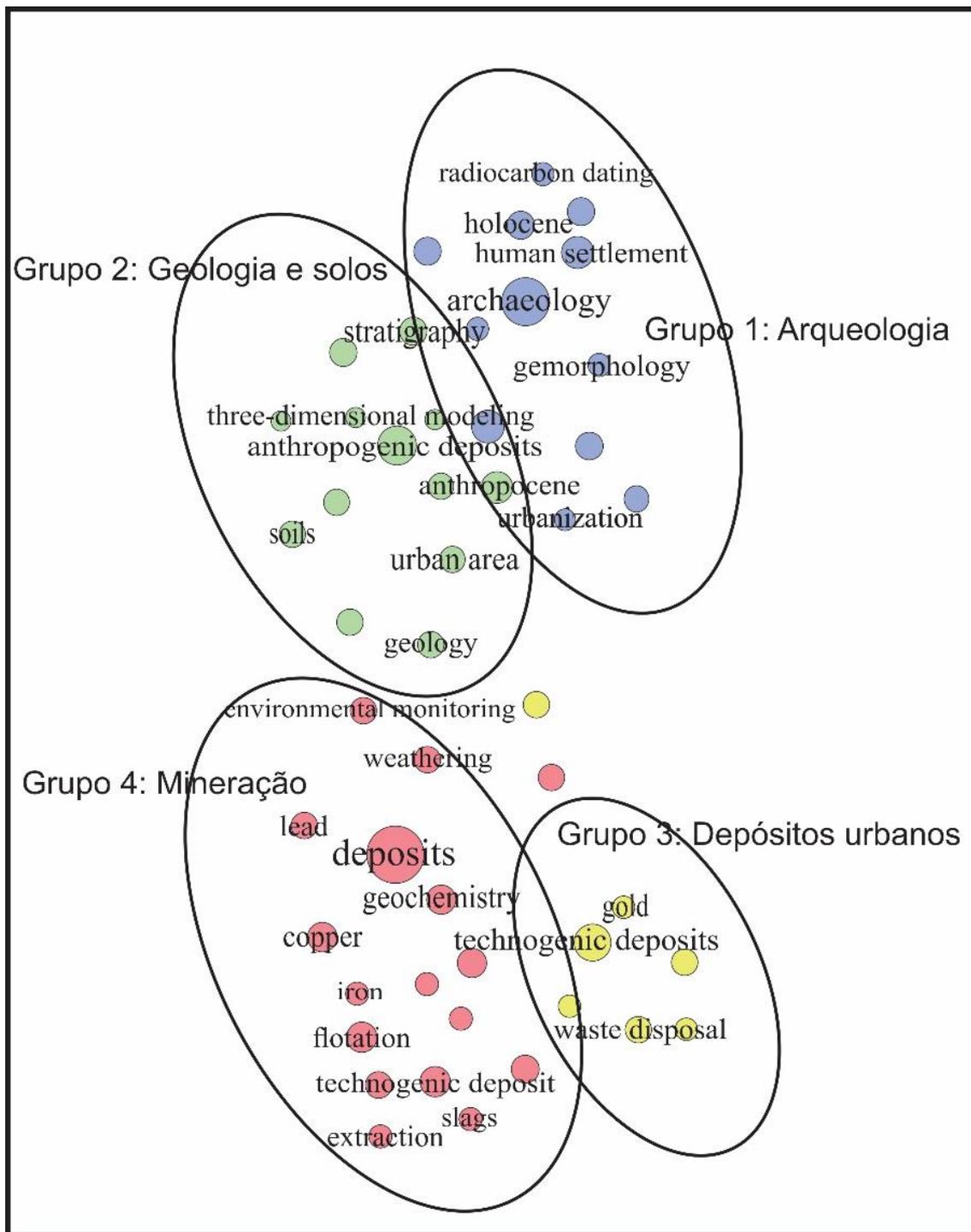


Figura 6 Mapeamento das palavras-chave relacionadas com a área de pesquisa em depósitos antropogênicos, divididas em 4 grupos. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, 2018).

Analisando a Figura 7, observa-se que os termos “deposits” (depósitos), “technogenic deposits” (depósitos tecnogênicos), “anthropogenic deposits” (depósitos antropogênicos), “waste disposal” (disposição de resíduos), “stratigraphy” (estratigrafia), “geology” (geologia), “soil” (solos) e “soil pollution” (poluição de solos), têm uma alta frequência de aparecimento nos artigos. Um dos artigos em destaque é o de Rosebaum

et al. (2003), no qual é apresentada uma classificação para terrenos formados devido à ação humana. De uma forma geral, esses artigos procuram caracterizar estes tipos de depósitos através de esquemas morfogenéticos, uma vez que a classificação semelhante às litoestratigráficas, que são usadas para classificar rochas e solos formados naturalmente, não são muitas vezes aplicáveis para esses depósitos.

Os termos “human activity” (atividade humana), “anthropocene” (antropoceno), “urban” área (área urbana), “Quaternary” (Quaternário), e “anthropogenic effect” (efeito antropogênico), aparecem em diversos artigos referentes a depósitos antropogênicos, uma vez que esse período é marcado por um aumento gradual da atividade humana, gerando assim esse tipo de depósito. A alguns desses depósitos são atribuídas idades do Antropoceno, outros estenderiam o limite com o Holoceno, e muitos seriam totalmente formados durante o Holoceno (FORD et al., 2014). Isso explica a alta frequência dessas palavras nos artigos. Muitos desses procuram definir uma nova época do tempo geológico denominada de Antropoceno (CRUTZEN; STOERMER, 2000; CRUTZEN, 2002; STEFFEN et al., 2007; ZALASIEWICZ et al., 2010). Já as palavras relacionadas a mineração, como “copper”, “mining”, “ores”, “coal”, “ash”, “flotation”, são referentes aos depósitos antropogênicos/tecnogênicos gerados devido ao processo de mineração e seus resíduos.

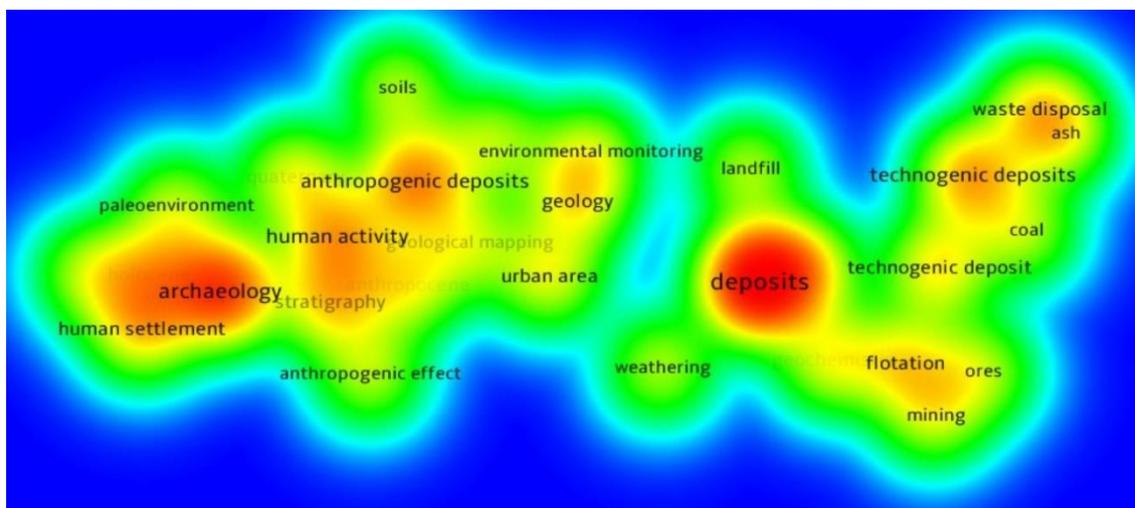


Figura 7 Distribuição de densidade das palavras de maior ocorrência. As cores indicam a densidade de termos, sendo que quanto maior o tamanho da letra, e mais próximo do vermelho, maior a ocorrência da palavra dentro dos artigos. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, 2018)

2.4 SOLOS URBANOS

Solos são materiais naturais formados devido à decomposição de rochas, que sofrem modificações ao longo dos anos, devido a processos naturais de intemperismo. Diversos fatores controlam o grau de degradação de uma rocha e a profundidade da camada de solos formada, como clima, relevo, tipo de rocha geradora, presença ou não de organismos vivos, e principalmente, o tempo de exposição dessa rocha as condições atmosféricas.

Em contrapartida, os solos urbanos são formados devido à urbanização, sendo resultado de uma atividade direta do homem sobre o meio ambiente. Com isso, são geradas áreas aterradas; solos compactados em superfície, ocasionando enchentes, rios contaminados entre outros. Segundo Craul (1985) solos urbanos são materiais que foram manipulados, perturbados ou transportados pela atividade humana em um ambiente urbano, podendo conter vidros, madeira, metal, resto de asfalto, alvenarias, plásticos, entre outros. Uma das principais características desses solos é a grande heterogeneidade em sua composição, consequência do transporte e deposição de solos, para suportar as diversas obras de engenharia em meio urbano (BURGHARDT, 1994).

Como solos urbanos são resultados da urbanização, essas áreas tendem a aumentar com o crescimento populacional em áreas urbanas. Atualmente, de acordo com dados da ONU (2016), aproximadamente 54% da população mundial reside em cidades, e a projeção para 2030 é que esse valor seja de 60%. Esse valor, representa que atualmente, mais da metade da população mundial reside nas cidades, e com o aumento populacional, forçará um crescimento da urbanização sem planejamento, podendo levar diversos riscos geológicos à população. Em alguns casos, locais que apresentam fragilidades para a ocupação urbana são transformados em áreas ocupadas, sem observar características intrínsecas desse solo que compõe essas áreas, podendo ocasionar deslizamentos, erosões, enchentes entre outros (PEDRON et al., 2004; PEDRON et al., 2007).

Solos urbanos, ainda que sejam de muita importância para o planejamento das cidades, têm sido pouco estudados, e suas características ainda são pouco conhecidas. A Tabela 4 mostra uma comparação entre solos urbanos e naturais.

De acordo com Lehmann e Stahr (2007), o termo solo urbano foi mencionado pela primeira em 1847, por Ferdinand Senft, em um livro didático de ciência do solo, sobre solos em ambientes urbanos, industriais e de mineração com pouca fertilidade devido aos resíduos tóxicos depositados. Esse tema começou a ganhar relevância a partir dos anos

80, com publicações de diversos autores (CRAUL, 1985; BLUME, 1989; STROGANOVA; AGARKOVA, 1993; JIM, 1998; CRAUL, 1999; GE et al., 2000; DE KIMPE & MOREL, 2000; MADRID; DÍAZ-BARRIENTOS; MADRID, 2002). De uma forma geral, grande parte dos trabalhos publicados sobre esse tema, aborda contaminação desses solos por metais pesados, ou outros tipos de contaminantes, devido a esse tipo de contaminação ser comum em solos urbanos.

Uma forma particular de solos urbanos são as áreas aterradas, que representam uma das mais importantes fontes de contaminação em áreas urbanas, sendo compostos por rejeitos de construção civil e demolição (concreto, tijolos, aço), escórias cinzas de carvão, resíduos de mineração entre outros (MEUSER, 2010).

Vale ressaltar que solos antrópicos e solos urbanos não são equivalentes, sendo o primeiro uma categoria mais genérica, resultado de uma modificação constante provocada pelo homem, como a exploração agrícola, mineral, urbana entre outras, e solos urbanos têm sido discutidos como uma subdivisão dos solos antrópicos, sendo solos gerados em áreas urbanas (PEDRON et al., 2007), podendo ou não conter materiais antrópicos. Nem todo solo urbano pode ser considerado contaminado. Alguns são formados por acúmulo de camadas de outros solos, que receberam grandes quantidades de matéria orgânica.

Tabela 4 Comparação das características dos solos naturais e urbanos. Modificado de Craul (1985), Lehmann e Stahr (2007) e Gregory et al. (2006)

CARACTERÍSTICAS	SOLOS NATURAIS	SOLOS URBANOS
Variabilidade vertical e espacial	Variam de um horizonte para o outro sem apresentar, em geral, grandes mudanças abruptas em suas características.	Apresentam mudanças abruptas em profundidades, em textura, estrutura, matéria orgânica, PH, densidade, entre outras.
Modificação na estrutura e compactação	Agregação de argila e areia aumentam o volume do solo, tendendo a criar poros entre as partículas. Isso é favorável para a penetração de raízes das plantas, e aumenta a permeabilidade para infiltração de água.	Destruição da estrutura primária, ocasionando a redução da porosidade do solo, tornando-o mais impermeável a infiltração de água subterrânea. Baixa presença de matéria orgânica.
Crosta superficial	Normalmente não apresentam, devido à presença de vegetação e uma menor compactação das camadas superficiais.	Solos urbanos, sem presença de vegetação, possuem a tendência de apresentar uma crosta com alguns centímetros na superfície. Dificultando infiltração de água e troca de gases. Essa crosta é formada devido a diversos fatores, como compactação das camadas superficiais, ausência de vegetação, entre outros.
Presença de materiais antropogênicos	Sem presença de materiais antropogênicos.	Grande porcentagem de materiais antropogênicos (resíduos sólidos), madeira, papel, vidro, metal, asfalto, lixo orgânico. Concentração de metais pesados.
Capacidade do solo em armazenar água para ser absorvida por raízes de plantas	A capacidade é boa para solos bem estruturados, textura média, e alguns com textura fina. Texturas grosseiras, têm baixa capacidade de retenção de água.	Devido à baixa porosidade nas camadas mais superficiais, e devido à grande variabilidade de materiais que provoca uma mudança abrupta de textura, esses solos apresentam uma baixa capacidade de armazenar águas para serem absorvidas pelas raízes das plantas.

2.5 PRINCIPAIS CLASSIFICAÇÕES DOS TERRENOS ANTROPOGÊNICOS / TECNOGÊNICOS

Esse capítulo apresenta reprodução de parte do artigo publicado no 16º Congresso Nacional de Geotecnia de Portugal (OLIVEIRA; MENEZES, 2018).

Classificar terrenos antropogênicos é uma tarefa bastante complexa, devido à grande heterogeneidade dos materiais que os compõem, e por serem extremamente dinâmicos, podendo sofrer grandes alterações em curtos períodos. Mas a classificá-los é muito importante para o planejamento urbano, podendo mensurar a magnitude da ação antropogênica. Pesquisadores de diversas partes do mundo tem proposto metodologias para classificação desses terrenos, sendo apresentadas a seguir as classificações mais utilizadas.

2.5.1 CLASSIFICAÇÃO DE FANNING E FANNING (1989)

Uma das classificações mais antigas para depósitos antropogênicos, e que influenciou outras classificações posteriores, foi a proposta por Fanning e Fanning (1989, apud Peloggia, 1999; Mirandola e Macedo, 2014), para depósitos tecnogênicos, consistindo das seguintes categorias:

- Materiais úrbicos (do Inglês “Urbic”): Referem-se a detritos urbanos, materiais com presença de ferro, que possam conter artefatos manufaturados. Frequentemente, são encontrados restos de tijolos, vidro, concreto, asfalto, pregos, plástico, metais diversos, restos de materiais de construção civil em geral e outros.
- Materiais gárbicos (do Inglês “Garbage”): São depósitos com materiais compostos por lixo rico em matéria orgânica. Possuem a capacidade de gerar gás metano em condições anaeróbicas.
- Materiais espólicos (do Inglês “Spoil”): São materiais geológicos que são escavados ou redepositados. Comum em operações de terraplanagem em minas a céu aberto, rodovias e outras obras civis. Ocorrem também em depósitos de assoreamento induzidos pela erosão acelerada.
- Materiais dragados: Materiais que são dragados de canais de rios ou cursos d’água, e posteriormente depositados em diques.

Essa classificação é bem simples e não compreende os diversos tipos de depósitos antropogênicos, já que a quantidade e a diversidade de depósitos estão em crescimento. Mas foi importante, devido ao fato de ter embasado outras propostas de classificação.

2.5.2 CLASSIFICAÇÃO DA BRITISH GEOLOGICAL SURVEY (BGS)

O Reino Unido é um dos países com um número relevante de publicações sobre terrenos antropogênicos, em especial a British Geological Survey (BGS), que é um órgão parcialmente público, e tem por objetivo propagar o conhecimento geológico. Diversos pesquisadores têm trabalhado em um método de classificação, baseado em grupos hierárquicos (MCMILLAN; POWELL, 1999; ROSENBAUM et al., 2003; FORD et al., 2010; PRICE et al., 2011; EDGEWORTH, 2014). Essa classificação é dividida em 4 grupos, aumentando o grau de detalhamento da informação à medida que se passa de um grupo para outro, como mostrado na Figura 8.

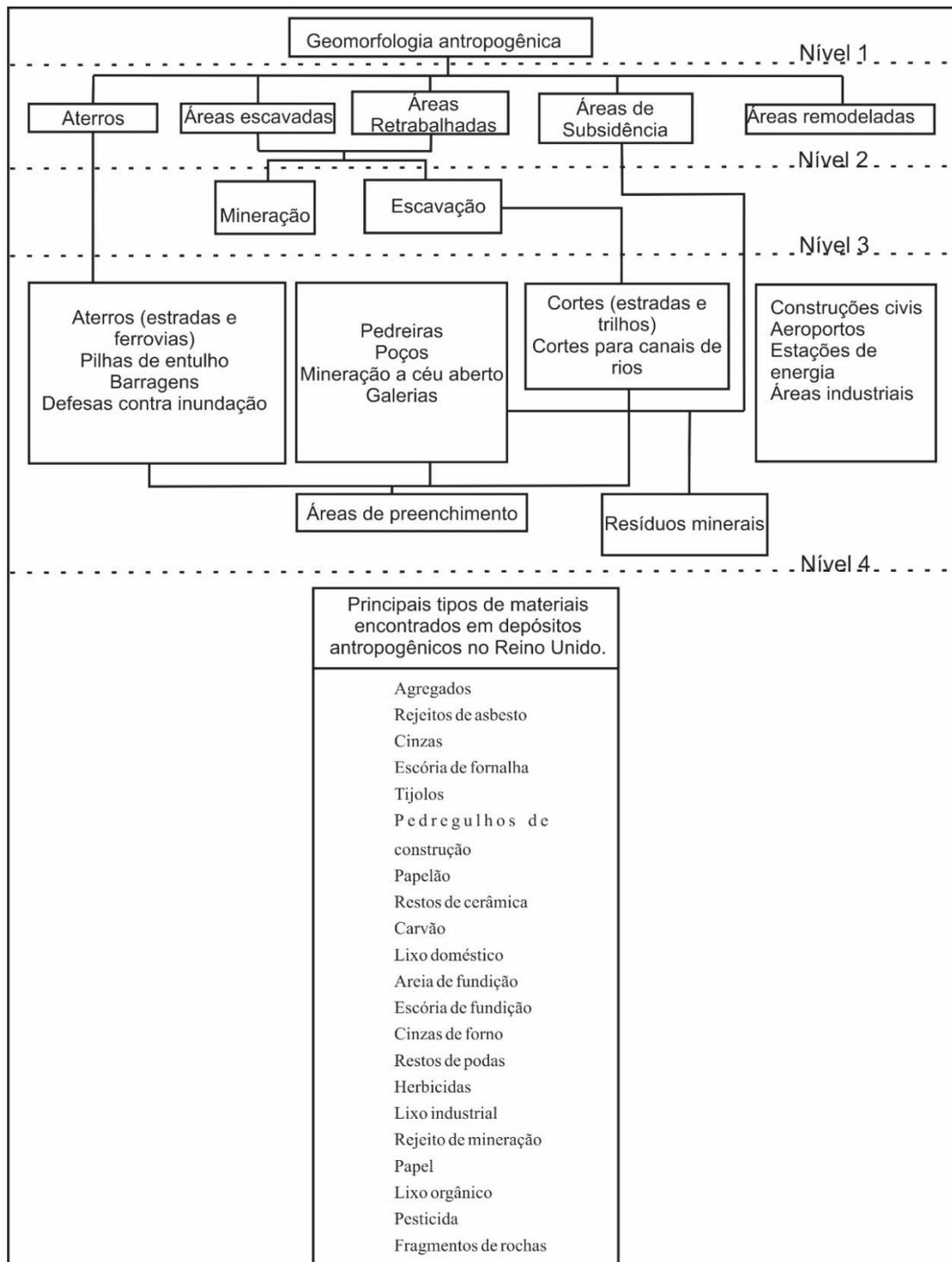


Figura 8 Classificação da geomorfologia antropogênica. Modificado e traduzido de McMillan e Powell (1999)

O nível 1 é uma classificação genética, e refere-se a todos os terrenos antropogênicos. O fato de um terreno ser formado devido à ação humana corresponde ao critério primário para sua classificação.

O nível 2 corresponde a uma subdivisão do nível 1, e inclui áreas que foram escavadas (pedreiras, minas e outros), depositadas, ou escavadas e posteriormente depositadas. É subdividida da seguinte forma:

- Aterros (“made ground”): Áreas que são conhecidas por terem sido artificialmente modificadas, tendo sido depositadas sobre locais naturais. São utilizados de forma a preparar o solo de uma região para suportar as diversas cargas a que será submetido devido a obras de engenharia. São utilizados para estradas, trilhos de trem, reservatórios, barragens, defesas contra inundações, pilhas de rejeito, despejo de materiais em alto mar e aterros para a construção civil.
- Áreas escavadas (“worked ground”): Áreas que são conhecidas por terem sido escavadas, devido a ação antrópica. São comuns em pedreiras, poços, escavação para ferrovias e rodovias, e cortes nos canais de rios.
- Áreas retrabalhadas (“infilled ground”): Esse tipo de depósito é uma combinação dos dois primeiros (áreas depositadas e escavadas). São áreas que foram escavadas, e posteriormente, depositadas, pela ação humana.
- Áreas remodeladas (“landscaped ground”): Áreas em que o solo natural, foi extensivamente remodelado, e praticamente impossível de separar de áreas que foram escavadas (“worked ground”) e depositadas (“made ground”).
- Áreas de subsidência: Áreas de superfície ou subsuperfície, que sofreram subsidência devido a ação humana. São comuns em áreas onde há a ocorrência de minas subterrâneas, que se encontram atualmente abandonadas; regiões onde ocorre bombeamento excessivo de águas subterrâneas entre outros. Devido ao vazio que é gerado na rocha ou solo em decorrência a essas atividades, ocorre subsidência do terreno.

O nível 3 é uma categoria geográfica/topográfica. É onde existem bons registros, tipos de solo e preenchimento são categorizados, como por exemplo, rejeitos de mineração, escórias de ferro, resíduos de cerâmicas. Subdivide o nível 2.

Já o nível 4, apresenta os tipos de materiais que compõem os depósitos antropogênicos. Os termos comuns utilizados para resíduos no Reino Unido se encontram na Figura 8.

Com um modelo em quatro etapas, esse método permite classificar de forma mais fácil esses depósitos devido ao fato de ser, em parte, similar às classificações litológicas (subdivididas em Supergrupo, grupo, formações e unidades). Além do mais, ela pode ser

incrementada, adicionando outros tipos de depósitos antropogênicos, à medida que esses depósitos passem a se tornar mais relevantes. Apresenta também, uma lista com os materiais mais comuns encontrados em depósitos antropogênicos. Como desvantagem, não é possível classificar terrenos antropogênicos formados pela ação humana no meio ambiente de forma indireta, ou mesmo ações que não geram a formação de depósitos, como por exemplo, formação de nascentes antropogênicas, fossas em ambientes urbano ou rural, cicatrizes de erosão entre outros.

Alguns autores preferem utilizar o termo depósitos tecnogênicos, para referenciar a esses depósitos formados pela ação humana (PELOGGIA, 1999). Peloggia et al. (2014), propõem uma nova metodologia para a classificação desses depósitos, definindo primeiramente alguns conceitos básicos:

- Terreno tecnogênico (“Technogenic ground”), representando um novo tipo de substrato geológico ou uma modificação na geomorfologia, devido a ação humana direta no meio ambiente, através de acumulação ou remoção de materiais.
- Camada tecnogênica (“Technogenic layers”): Termo geral utilizado para indicar qualquer unidade de um depósito tecnogênico, horizonte ou uma camada de solo. É também especificamente utilizado para descrever terrenos em que ocorreram uma superposição de materiais antropogênicos.
- Depósito tecnogênico (“Technogenic deposit”): Depósitos superficiais, criados devido a uma ação humana direta, ou por um processo de deposição gerado de forma induzida.
- Horizonte de solos tecnogênicos (“Technogenic soil horizon”): Uma camada de solo *in situ*, formado devido à ação humana.

Com isso, esse autor classifica esses depósitos através dos seguintes critérios, dividindo-os em quatro classes principais. Cada uma dessas classes pode ser associada a uma ou mais categoria de mapeamento, por camadas específicas ou características geomorfológicas para identificação, descrição e mapeamento das unidades tecnogênicas. As quatro classes principais são divididas da seguinte forma:

- Terreno tecnogênico de agradação (“Aggraded Technogenic Ground”), que é formado devido à acumulação de materiais antropogênicos. São terrenos naturais ou que foram escavados, que posteriormente sofreram deposição de materiais antropogênicos.

- Terreno tecnogênico de degradação (“Degraded Technogenic Ground”), criado devido à remoção de material geológico. Pode ser formado devido à escavação ou erosão induzida.
- Terreno tecnogênico modificado (“Modified Technogenic Ground”), criados devido à transformação de materiais geológicos.
- Terreno tecnogênico misto (“Mixed Technogenic Ground”), formados devido à superposição de diferentes tipos de materiais geológicos em um mesmo lugar.

Esta classificação apresenta a vantagem de, através dela, é possível classificar terrenos antropogênicos que são gerados devido a uma ação humana indireta sobre o meio ambiente, como por exemplo, erosão e cicatriz de erosão, além de classificar solos que são quimicamente alterados. É possível diferenciar mais facilmente os terrenos formados apenas por materiais antropogênicos dos formados por materiais mistos (materiais antropogênicos e naturais), sendo dessa forma, uma classificação mais completa que as demais.

Mirandola e Macedo (2014) propõem uma classificação para terrenos tecnogênicos a serem utilizados em áreas de assentamentos urbanos precários. É uma classificação mais simples, tendo por objetivo, identificar e mapear esses terrenos em áreas urbanas, de forma a evitar acidentes geológicos, não englobando outros tipos de depósitos antropogênicos. Essa classificação se baseia em 3 grupos, que são:

- Feições tecnogênicas: Compreendem as modificações resultantes das ações humanas que não geram depósitos de forma direta, mas sim a geração de uma feição geométrica, como corte em talude. Sua classificação se divide em pequena altura, média altura e grande altura para esses cortes. Essa classificação não propõe um intervalo numérico, sendo esses dados obtidos de forma observacional, uma vez que a altura desse corte está ligada ao relevo e as características geológicas do local.
- Depósitos tecnogênicos: Ações diretas da humanidade na natureza que geram depósitos. A classificação é dividida segundo os grupos mais comuns e presentes nos assentamentos precários urbanos, sendo depósito de solo, depósito de lixo e depósito de entulho. Esses grupos são subdivididos em pequena altura, média altura e grande altura.
- Vetores tecnogênicos: Esse grupo tem a intenção de enfatizar outras ações tecnogênicas que não geram depósitos. Essa classificação é baseada na

identificação de quatro ações principais que ocorrem em diversos assentamentos urbanos precários, que influencia em diversos acidentes geológicos, que são eles: concentração de água pluvial e/ou servida em superfície, induzida pela ocupação; lançamento de água servida em superfície; vazamentos de tubulações; e presença de fossa.

Como desvantagem, esse método de classificação não apresenta valores dos intervalos de altura que são considerados pequena altura, média altura e grande altura. Com isso, esses valores podem ser subjetivos, não tendo uma padronização, sendo difícil diferenciar o que seria um talude de altura alta, média ou baixa. É uma classificação que deve ser utilizada apenas para mapear terrenos em áreas urbanas, como por exemplo, assentamentos precários, não sendo aplicada em outros tipos de terrenos antropogênicas.

Devido a um intenso aumento das taxas de urbanização, os depósitos antropogênicos tenderão a aumentar consideravelmente nos próximos anos, o que pode causar grande impacto no meio ambiente e colocar diversas vidas em risco. Devido a isso, classificar esses depósitos se torna uma tarefa de grande importância, para prevenir ou remediar possíveis acidentes geológicos. Depósitos antropogênicos são extremamente complexos para serem classificados, principalmente devido à grande heterogeneidade que os compõem. O método de classificação proposto por Peloggia et al. (2014) é mais completo que os demais, pois através dele é possível classificar uma maior variedade de depósitos antropogênicos, além de classificar aqueles formados por apenas materiais antropogênicos, e aqueles formados parcialmente por materiais antropogênicos, além de terrenos antropogênicos formados de forma indireta.

2.6 GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Resíduos de construção civil representam, nas cidades brasileiras, uma grande fração dos resíduos sólidos municipais, podendo representar problemas urbanos, pois são difíceis de serem reciclados, apresentam diversos tipos de contaminantes, e devido à grande heterogeneidade dos materiais, geram instabilidades geotécnicas nas áreas de descarte (BROOKS, ADAMS; DEMSETZ, 1994).

De acordo com NBR 15116 (ABNT, 2004c, p.2) são definidos como:

resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solo, rocha, madeira, forros,

argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

A Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002, p. 1) define aterro de resíduos de construção civil como:

a área onde serão empregadas técnicas de destinação de resíduos da construção civil Classe “A” no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente.

Essa mesma resolução classifica os resíduos de construção civil da seguinte forma, (BRASIL, 2002, p. 3):

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos

(tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio e etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

IV - Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

A Lei 12.305 (BRASIL, 2010, p. 2) institui a política nacional de resíduos sólidos e define área contaminada como local onde há contaminação por disposição, regular ou irregular, de quaisquer substâncias ou resíduos. Essa lei define resíduo sólido como:

material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como

gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Nessa lei, os resíduos sólidos são classificados da seguinte forma (BRASIL, 2010, p.16-17):

I - Quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

II - Quanto à periculosidade:

- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a”.

Essa lei, também discorre sobre a forma de destinação ou disposição final desses resíduos, sendo proibido:

lançamento em praias, no mar ou em quaisquer corpos hídricos; lançamento in natura a céu aberto, excetuados os resíduos de mineração; queima a céu aberto ou em recipientes, instalações e equipamentos não licenciados para essa finalidade; outras formas vedadas pelo poder público.

A NBR 10.004 da ABNT (2004b) classifica os resíduos em perigosos (classe I) e não perigosos (classe II). Os resíduos sólidos considerados perigosos, são aqueles que, devido às suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem apresentar riscos à saúde pública, riscos ao meio ambiente (quando gerenciado de forma inadequada). Apresentam uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade. Os resíduos classe II – não perigosos, são subdivididos em duas classes: resíduos classe II A – Não inertes, e resíduos classe II B – Inertes. Os resíduos classe II A (não inertes) podem ter as seguintes propriedades: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água e são definidos da seguinte forma (ABNT, 2004b, p.5):

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Observa-se que existe uma grande quantidade de materiais encontrados em aterros de resíduos de construção civil que não estão em conformidade com a legislação. De acordo com a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), são permitidos nesses aterros apenas resíduos classe A, de construção civil, não perigosos (classe I), e inertes. Mas na prática, grande parte desses depósitos se encontra de forma irregular perante a legislação, sendo depositados resíduos perigosos, resíduos sólidos não inertes, materiais orgânicos entre outros. Portanto, o potencial contaminante desses depósitos, é muitas vezes desconhecido.

Portanto, não deveria ocorrer a deposição de materiais como plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros (classe B); restos de gesso (classe C); ou mesmo resíduos perigosos, como restos de tintas e outros (classe D). Por isso, conclui-se

que uma grande quantidade de aterros de construção civil no Brasil, encontra-se irregular, no que diz respeito à composição dos materiais.

Para a implantação de aterros de resíduos de construção civil em uma área, a norma NBR 15113 (ABNT, 2004b) afirma que os seguintes parâmetros físicos devem ser observados: geologia e tipos de solos existentes; hidrologia; passivo ambiental; vegetação; vias de acesso; área e volume disponíveis e vida útil; distância de núcleos populacionais. Esta mesma norma, afirma também que os aterros devem possuir as seguintes infraestruturas: acessos internos e externos protegidos; cercamento no perímetro da área em operação, impedindo o acesso de pessoas não ligadas à operação e animais; portão na entrada, estabelecendo um controle de acesso ao local; sinalizações que indiquem o empreendimento; anteparo para a proteção dos aspectos relativos vizinhança; iluminação interna; e proteção das águas subterrâneas.

2.7 DELIMITAÇÃO E MAPEAMENTO DE TERRENOS ANTROPOGÊNICOS

Depósitos antropogênicos, por serem bastante heterogêneos, apresentam características geológicas e geotécnicas muitas vezes instáveis. O mapeamento dessas áreas é importante para o planejamento urbano, reduzindo riscos e incertezas para os gestores. Recentemente, as melhorias na capacidade de processamento dos computadores, associados com uma maior disponibilidade de dados geológicos, têm permitindo que pesquisadores criem modelos tridimensionais de subsuperfície rasas, cada vez mais precisos (TAME et al., 2013). Esses modelos têm sido também utilizados para gerenciamento de áreas em superfície e em subsuperfície, podendo, em locais com presença de patrimônios históricos enterrados, avaliar o potencial de preservação desses patrimônios (DE BEER; PRICE; FORD, 2012).

Entretanto, Tame et al. (2013) afirmam que ainda não está claro e quão útil é essa abordagem em escalas urbanas menores, com locais que: tem uma história relativamente complexa, no que tange ao uso antropogênico; em locais que materiais antropogênicos são mal caracterizados; locais onde há pouca disponibilidade de dados geológicos.

Nesse contexto, a geofísica se destaca como um importante método de levantamento de dados, devido ao fato de ser um método indireto, não destrutivo, e por apresentar um custo relativamente mais baixo quando se comparado com outros métodos (VARGEMEZIS et al., 2015).

Mapas geológicos brasileiros mais recentes já apresentam delimitação destes depósitos antropogênicos, como o realizado pela CPRM (2012) para a Bacia de Guanabara, onde são reconhecidos três tipos de depósitos sedimentares devido à ação humana: os sambaquis, os aterros urbanísticos e os aterros sanitários, sendo que apenas os dois últimos apresentam uma área mapeável na escala de representação cartográfica de 1:100.000, objeto do referido mapeamento. No Reino Unido diversos estudos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, como Terrington et al. (2018), que quantificou a modificação antropogênica em superfície na cidade de Londres, ou Jordan et al. (2016), que apresentou um estudo de caso na cidade de Great Yarmouth, condado de Norfolk. Nesse último trabalho foi apresentada metodologia para a determinação volumétrica de depósitos antropogênicos através dos registros geológicos e geomorfológicos.

Machado et al. (2018) propuseram um mapa geológico, para a cidade de Vitória - ES, retratando as principais evoluções das áreas urbanas, delimitando os depósitos antropogênicos. Como resultado, concluiu-se que Vitória possui aproximadamente 10km² da superfície composta por depósitos antropogênicos, correspondendo a 12% da cobertura geológica, e 61% da região costeira superficial sofreram alterações devido a intervenção humana.

Silva e Horn Filho (2014) aplicaram técnicas de mapeamento geológico e de sedimentologia, para estudos de depósitos antropogênicos, de forma a construir um mapa geológico, que incluem os depósitos antropogênicos construídos da Ilha de Santa Catarina, em Santa Catarina. Para isso, além da revisão cartográfica, foram feitas análises de imagens aéreas, coletas e análises de materiais.

2.8 INVESTIGAÇÕES GEOLOGICO-GEOTECNICAS

A NBR 8.044 (ABNT, 2018), estabelece as seguintes etapas que devem ser observadas em projetos geotécnicos:

- Estudos preliminares, que consistem no levantamento de informações de forma a se ter um nível de detalhamento para uma tomada de decisão;
- Reconhecimento, de forma a se ter um contato direto com as condições físicas do local;
- Estudo de alternativas, onde se deve ter um grau de detalhamento suficiente sobre a área, de forma a se estudar alternativas de soluções;

- Anteprojeto, que apresenta e justificam as soluções para a área, comparando-as com estudos anteriores.

Na etapa de reconhecimento da área e seu subsolo, deve-se determinar os parâmetros físicos e geomecânicos, que compreendem um ou mais dos seguintes serviços:

- a- Levantamento de dados gerais existentes: Que compreendem dados cartográficos, geológicos, hidrológicos e geotécnicos.
- b- Mapeamento geológico: Complementação dos dados cartográficos e topográficos existentes, com um grau de detalhamento compatível com o projeto.
- c- Investigações geológicas e geotécnicas: Os dados preliminares podem ser completados com visita ao local; programação de investigações, prospecção geofísica, sondagens e amostragem, ensaios in situ, ensaios de laboratório, seções geotécnicas, classificação petrográfica dos materiais, classificação geotécnicas dos materiais, caracterização de ocorrências de materiais de empréstimo, identificação de áreas de bota-fora, e levantamento de aspectos geotécnicos ambientais.

A NBR 8.044 (ABNT, 2018) não contempla normas para a investigação geológica e geotécnica de áreas antropogênicas. Já a ISO 14.688 (ISO, 2017), apresenta a definição de solos antropogênicos, e formas de se caracterizar esses solos, descrevendo tamanho, condições, tipos de materiais presentes e presença ou não de matéria orgânica. Mas ainda não apresenta normas para uma investigação mais detalhada dessas áreas. Esta norma, afirma que, para solos naturais que foram escavados, e posteriormente depositados, segue-se a classificação utilizada para solos naturais. Quando esses solos contém materiais antropogênicos, deve-se determinar a origem do material; se possui ou não presença de materiais de grande diâmetro; presença de vazios e regiões ocas; resíduos químicos e substâncias perigosas; presença ou não de matéria orgânica, observando o grau de decomposição; presença de cheiro ou odor; quaisquer datas legíveis em documentos enterrados; sinais de calor subterrâneo ou combustão; estrutura, variabilidade e método de colocação.

Ensaio geotécnicos são realizados de forma a se obter dados dos parâmetros físicos e características dos solos e rochas. Esses dados são essenciais para projetos de engenharia, reduzindo os diversos riscos que essas obras podem causar à população e ao meio ambiente ou prevendo os melhores métodos de ocupação a partir da caracterização básica. A ausência de dados, ou a má interpretação dos mesmos, pode gerar problemas ambientais, obras inadequadas, atrasos nos projetos entre outros.

Dependendo da finalidade do estudo geológico-geotécnico definem-se os parâmetros a serem estudados e os ensaios a serem realizados.

Referente a áreas contaminadas, Giacheti, Elis e Riyis (2015) afirmam que, para uma adequada revitalização, deve-se iniciar com um diagnóstico preciso, de forma a se decidir pelo método de remediação mais indicado. Para isso, existem diversos métodos de investigação geotécnica, com finalidades diferentes, e com características distintas. Souza, Silva e Iyomasa (1996) afirmam que os métodos diretos compreendem as escavações, as sondagens mecânicas e os ensaios *in situ*, que são utilizados para a caracterização da permeabilidade e resistência das estruturas geológicas. Para solos muito heterogêneos, o mais indicado é a obtenção desses dados através de ensaios *in situ*, uma vez que, em ensaios de laboratório, é muito difícil conseguir amostras e posteriormente modelos que sejam representativos.

Um dos principais parâmetros para determinar quão vulnerável é um aquífero é a condutividade hidráulica, uma vez que aquíferos em rochas ou solos mais permeáveis são mais susceptíveis à contaminação. Com relação aos solos, quanto mais compactados se encontram, menor tende a ser a taxa de infiltração, devido ao fato que a compactação reduz a porosidade, dificultando a percolação do líquido por esse meio.

A condutividade hidráulica de um meio se correlaciona também com o tamanho das partículas que o compõe. Cabral (2008) afirma que partículas com diâmetros maiores apresentam valores maiores de permeabilidade, devido ao fato que os poros entre as partículas, gerados devido a uma porosidade primária, apresentam um maior volume; em contrapartida, quanto menor o tamanho da partícula, menores serão os espaços entre as mesmas, fazendo com que o meio se torne mais impermeável; quanto maior o desvio padrão do diâmetro das partículas, menor a permeabilidade, uma vez que um aumento do desvio padrão indica uma maior variação do tamanho dos grãos, com grãos pequenos ocupando espaços vazios entre grãos maiores.

Já a geofísica, que é um método de investigação geológica e geotécnica indireto, consiste na determinação de propriedades em subsuperfície, através de respostas de um determinado parâmetro físico desse material. As principais vantagens desse método são: não invasivo, ou seja, não é necessária a destruição de camadas, o que é muito importante em estudos em áreas urbanas; baixo custo, fácil execução e rapidez operacional, quando comparados com os métodos diretos; fornecem dados contínuos sobre a área de estudo, diferentemente dos métodos diretos que são pontuais; permitem uma análise espacial e temporal mais detalhada; importante para delimitar áreas com potencial contaminante

(SOUZA; SILVA; IYOMASA, 1996; GIACHETI; ELIS; RIYIS, 2015). Vale ressaltar que, apesar de os métodos indiretos serem eficientes, não tornam os diretos indispensáveis, sendo essencial que um dado complemente o outro.

2.8.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

De acordo com a NBR 8.044 (ABNT, 2018), os ensaios de laboratório visam classificar os solos, determinar parâmetros de resistência, de deformabilidade e de permeabilidade. Esses ensaios compreendem: ensaios de caracterização, ensaio de cisalhamento direto, ensaio triaxial, ensaio de adensamento, ensaios para caracterização de expansibilidade, ensaio de colapsibilidade e pin-hole, ensaio de permeabilidade e ensaios químicos.

Quando se trabalha com depósitos antropogênicos, devido esses depósitos serem compostos por materiais que apresentam uma grande heterogeneidade, é muito difícil reproduzir em laboratório as condições que esses materiais se encontram no campo. Devido a esse fato, o levantamento de dados nessas áreas deve ser realizado em situ.

No caso de materiais predominantemente terrosos, seguindo o que determina a ISO 14.688 (ISO, 2017), nestes casos podem ser feitos ensaios tradicionais para solos, como os de caracterização granulométrica e índices físicos.

2.8.1.1 Caracterização de solos

Através da caracterização de solos, é possível determinar os principais parâmetros que identificam a natureza desse solo, levantando suas propriedades mecânicas. Com isso, pode-se realizar ensaios de análise granulométrica, determinação da massa específica, ensaios de compactação e determinação dos limites de consistência e do teor em água (MASSAD, 2016). O primeiro passo para a caracterização de materiais, é se fazer a amostragem. Uma forma prática para isso é através da utilização de um trado mecânico acordo com a NBR 10007 (ANBT, 2004).

O tamanho das partículas granulométricas pode ser dividido das seguintes formas de acordo com o diâmetro de cada grão que compões o solo:

- Argila: partícula com diâmetro inferior a 0,002mm
- Silte: partícula com diâmetro entre 0,005mm e 0,05mm;

- Areia fina: partícula com diâmetro entre 0,06mm e 0,2mm;
- Areia média: partícula com diâmetro entre 0,2mm e 0,6mm;
- Areia grossa: partícula com diâmetro entre 0,6 mm e 2mm;
- Pedregulho: partícula com diâmetro entre 2mm e 60mm;
- Matacão: partícula com diâmetro entre 200mm e 1m;
- Pedra-de-mão: partícula com diâmetro entre 60mm e 200mm;
- Bloco de rocha: partícula com diâmetro superior a 1m

Baseando-se nessa divisão, para ensaios de solos contendo grandes quantidades de materiais grosseiros, com diâmetro superior a areia grossa (superior a 2mm), utiliza-se a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para materiais com predomínio de materiais de granulação inferior a pedregulho (menor que 2mm), utiliza-se a NBR 7.181 (ABNT, 2016). Para a determinação da massa específica de uma amostra de solo, dado que é utilizado para a realização dos ensaios de sedimentação (que determinara a porcentagem dos materiais finos na análise granulométrica) utiliza-se a NBR 6.458 (ABNT, 2016).

Em toda pesquisa bibliográfica, não foi encontrado artigos que tentassem determinar índices físicos de solos contendo resíduos de construção civil. Em geral, os artigos que buscam caracterizar esses materiais, determinam os principais componentes desses depósitos.

Lima e Cabral (2013) realizaram um estudo de forma a avaliar os parâmetros químicos, classificar, e analisar a composição gravimétrica de resíduos de construção civil, na cidade de Fortaleza. Como metodologia, 4 amostras de 280 kg cada foram coletadas em épocas variadas ao longo do ano. Os resíduos foram separados manualmente, e classificados nas classes A, B, C e D, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004b). Foram realizadas análises de solubilidade e toxicidade dos resíduos Classe A. Como resultado, obteve-se que, na composição gravimétrica das amostras coletadas, os resíduos pertencentes a Classe A é o que possui maior participação na composição gravimétrica, com um percentual de 93,4%. A argamassa é o material que mais se encontra nessas amostras, com um total de 22%. Foi encontrada também a presença de gesso, material expansivo com poder de contaminar o aterro, sendo inviável para reciclagem. Foram encontrados, materiais pertencentes a classe D, como tintas, solventes e amianto, que se configuram na classe de resíduos perigosos, que não deveriam estar presentes em aterros de resíduos de construção civil.

Com relação ao potencial contaminante de aterros de resíduos de construção civil e seus impactos causados em águas subterrâneas, Córdoba (2014) realizou experimentos de forma a simular a contaminação por lixiviados nesses aterros, representando as condições reais. Os resultados foram comparados com os valores máximos permitidos pelo consumo humano, que de acordo com a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008), com a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), e valores orientados pela CETESB (2014) para o solo e água subterrânea do Estado de São Paulo. Como resultado, observou-se que as amostras de resíduos de construção civil classe A, ultrapassaram os valores máximos permitidos para os elementos cádmio (0,029 mg/L), ferro (1,235 mg/L) e cromo (0,077 mg/L). Esse autor afirma que, deve-se repensar na classificação desses resíduos como inertes e classe A, e passem a ser classificados como não perigosos e não inertes, prevenindo possíveis danos ambientais.

2.8.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO

Compacidade pode ser definida como a resistência do solo à penetração de um objeto, como por exemplo, um instrumento de sondagem (ALMEIDA, 2005). A compacidade pode também representar a dificuldade que raízes de plantas podem enfrentar para o seu desenvolvimento. Stolf (1987) define compactação como uma alteração que ocorre na estrutura do solo, devido a forças externas, que ocasionam em uma aproximação das partículas, gerando uma redução do volume e dos macroporos.

Um modo de se avaliar qualitativamente a compacidade de camadas superficiais do solo é através do penetrômetro de impacto, que é um aparelho de fácil utilização, permitindo obter de forma rápida e prática o grau de resistência de uma camada de solo. O penetrômetro, por ser um aparelho versátil, fácil de ser utilizado e pela rapidez da obtenção de dados, pode ser aplicado nesse tipo de aterro.

Uma aplicação muito importante para o uso do penetrômetro de impacto tem sido para a calcular a capacidade do solo em suportar fundações. Sanglerat (1972) afirma que os penetrômetros foram inicialmente desenvolvidos essa função. Fundações podem ser divididas em rasas e profundas, sendo a segunda mais utilizadas em obras de pequeno porte. Alguns trabalhos buscam correlacionar, em fundações rasas, os valores da sondagem SPT com o penetrômetro de impacto (MELO FILHO, 2007; COSTA et al., 2018).

Na geotecnia, de uma forma geral, o penetrômetro tem principal finalidade avaliar a compactidade em solos superficiais e subsuperficiais (TSUHA, 2003; COSTA; NISHYAMA, 2007; MOHAMMADI et al., 2007; MOHAMMADI et al., 2008; BECKETT, et al., 2018).

Alguns trabalhos têm buscado correlacionar o aumento da compactidade do solo, com a redução da taxa de infiltração de águas pluviais. Costa e Nishiyama (2007), em estudos na Bacia Hidrográfica do Uberabinha, determinaram a resistência à penetração em solos, fazendo uso do penetrômetro de impacto (atingindo uma profundidade máxima de 40cm), e correlacionaram esses valores com dados do ensaio de permeabilidade, obtidos com permeâmetro de Guelph. Relacionaram também a compactidade do solo com os diferentes tipos de uso e ocupação. Como resultado, constatou-se que áreas de pastagem apresentam os maiores valores de resistência à cravação da haste do penetrômetro, com índices superiores a 80kgf/cm² nos primeiros 10 cm da camada de solo, e 40 kgf/cm² na camada mais profunda. Os menores resultados de resistência à penetração do solo foram obtidos em matas ciliares e de encosta, não compactadas pelo uso, com índices inferiores a 30 kgf/cm². Os ensaios de permeabilidade confirmaram que, quanto maior o índice de compactidade, menor a condutividade hidráulica.

Bahsan et al. (2017), realizaram investigação das principais propriedades geotécnicas de um aterro sanitário, localizado em Bantargebang na Indonésia, utilizando entre outros métodos, o penetrômetro de impacto, de forma a obter a resistência física à penetração desse solo. Nesse trabalho, o penetrômetro se destaca como um importante método, uma vez que a obtenção de amostras indeformadas e que sejam representativas, em depósitos com natureza muito heterogênea para ensaios em laboratório, é uma tarefa difícil, atingindo profundidades variando de 8 a 11 metros. Como conclusão, esse aterro comparado com aterros de outros países, apresenta um menor valor de compactação.

Segundo Stolf (1990) e Stolf (1991), os penetrômetros podem ser subdivididos da seguinte forma:

- Penetrômetros convencionais para usos agrícolas: opera-se pressionando o conjunto contra o solo, e a resistência ao avanço pode ser medida através de um dinamômetro. Recomenda-se uma velocidade constante de 180cm/min, sendo que, quanto mais fácil penetrar um substrato, menor será a resistência. Mede a resistência do solo através de um dinamômetro, à medida que o aparelho é introduzido no solo, medindo a resistência estática ou de ruptura do solo.

- Penetrômetros de impacto: são comumente denominados de penetrômetros dinâmicos. A penetração da haste no solo se dá através do impacto de um peso que cai em queda livre, com uma altura constante. Conta-se o número de impactos necessário para penetrar uma dada espessura, determinando assim a resistência à penetração dessa camada.

Carvalho e Furegatti (2018) utilizaram o penetrômetro de impacto no município de Agudos – SP com o objetivo de levantar a compactação de solos de textura areia média a muito argilosa a partir da resistência física à penetração, de forma a servir de base para que outros pesquisadores possam desenvolver estudos mais aprofundados na área. Com isso, foi gerado um mapa de calor com os valores de resistência à penetração, que pode ser considerado representativo para a área.

Um dos fatores que podem alterar os valores da resistência física à penetração é o teor de umidade que o solo se encontra, juntamente com densidade, textura e teor de matéria orgânica (VAZ et al., 2002).

Segundo Hassan (1966), solos finos são diretamente afetados por umidade em que se encontram, massa específica seca e tensões de confinamento; enquanto que solos de granulometria grossa são afetados pelo coeficiente de uniformidade, tamanho máximo dos agregados e tensões de confinamento. Nesse trabalho, o objetivo foi investigar os fatores que afetam o valor da resistividade física a penetração, com o uso do penetrômetro de impacto dinâmico, em solos com granulometria grossa e fina. Para isso, foi desenvolvido um equipamento especial, um molde cilíndrico (6 polegadas de diâmetro e 12 polegadas de altura), e uma célula triaxial foi modificada para permitir a pressão de confinamento as amostras enquanto o teste com penetrômetro de impacto foi conduzido.

O penetrômetro de impacto é muito utilizado também para fins agrícolas (HERRICK, JONES, 2002; SOLF et al., 2011; LIMA; LEON; SILVA, 2013). Em geral, o conceito é que em solos com altos valores de compactação, há maior dificuldade do crescimento radicular. Taylor, Roberson e Parker (1966), afirmam que, para solos com valores de compactação superiores a 2,5Mpa dificulta a penetração de raízes de plantas no solo. Na Figura 9 é possível ver que a medida que a resistência à penetração se torna maior, menor é a profundidade que raízes de soja atingem para se estabelecer.

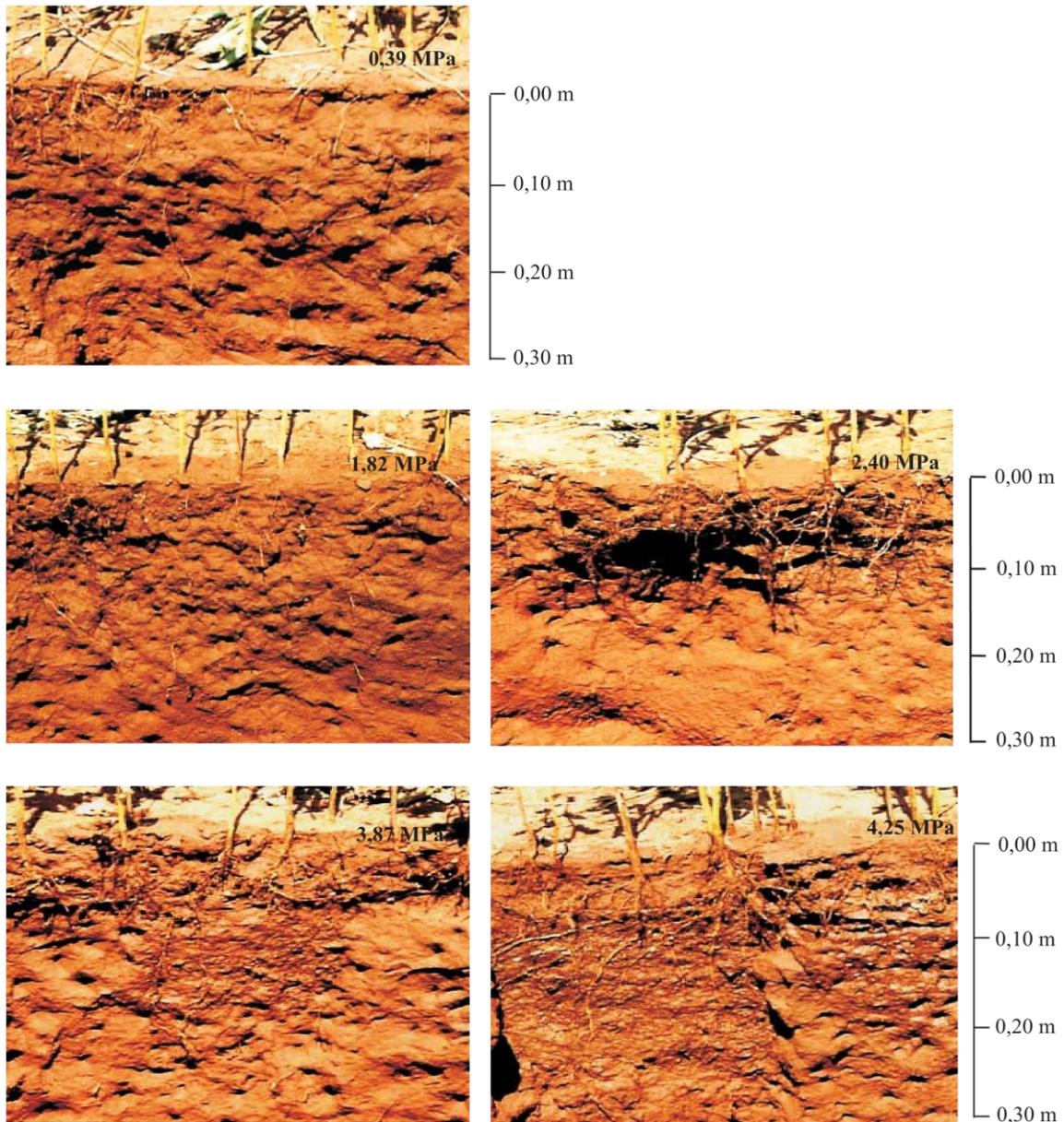


Figura 9 Perfil do desenvolvimento radicular de soja até 0,30 m, em diferentes níveis de resistência do solo à penetração. Fonte: Beulter e Centurion (2004).

2.8.3 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE

A condutividade hidráulica de um determinado substrato é um parâmetro extremamente importante a ser determinado quando se trabalha com geotecnia ambiental. Essa característica reflete a facilidade que um determinado líquido tem para circular em um determinado meio. Quando se trabalha com áreas contaminadas, a determinação das taxas de infiltração em um determinado meio é extremamente importante para avaliação do impacto ambiental, uma vez que com esses dados é possível medir a velocidade com que a água infiltra em um determinado meio.

Esses ensaios podem ser realizados em campo ou em laboratório. As medidas em laboratório são feitas em amostras indeformadas. O grande problema em fazer medições de permeabilidade de substratos muito heterogêneos em laboratórios, é conseguir amostras que sejam representativas, pois caso contrário, o valor da condutividade medida não será compatível com os valores de condutividade real do depósito.

Os ensaios de condutividade podem ser realizados em campo tanto acima como abaixo do nível d'água. Os acima do nível d'água podem ser realizados em superfície (por exemplo com infiltrômetro de duplo anel, Guelf) ou em sondagens. Os ensaios abaixo do nível d'água são feitos em sondagens. Há ensaios realizados com vazão constante e outros realizados com medida de rebaixamento por tempo.

A ABGE (2013) apresenta uma série de métodos para a determinação da condutividade hidráulica, sendo o ensaio realizado através de furos de sondagem com trado manual, em poço ou trincheira. Apesar desses ensaios não ser normatizado, são utilizados por diversos pesquisadores. Para determinar a condutividade hidráulica saturada das Unidades Geotécnicas sedimentares de Santa Maria - RS, Pinheiro, Nummer e Rauber (2017) utilizaram a técnica de piezômetro, sendo realizados ensaios em sondagens executadas com trado manual e mecânico. Essa técnica consiste na abertura de um furo de sonda com diâmetro variando entre 6 a 20 cm, e no interior desse furo é montado um piezômetro, com a presença de uma bureta ou reservatório similar ao que é utilizado para o monitoramento de poro pressão. Dessa forma, é possível medir o volume de água infiltrada de uma forma rápida e de fácil execução.

Um outro método amplamente utilizado é o infiltrômetro de duplo anel. Este método consiste basicamente de dois anéis concêntricos, que são cravados no solo a uma profundidade de alguns centímetros. Possui também um reservatório de água, com uma régua graduada, permitindo assim fazer a leitura e a determinação da quantidade de água infiltrada na área de estudo em questão com vazão constante (ZWIRTES et al., 2013).

Zuquette e Palma (2006), utilizaram infiltrômetro de duplo anel e ensaios de laboratório para determinar as taxas de infiltração nos arenitos da Formação Botucatu em área localizada na Bacia do Córrego Vaçununga, na região de Luís Antônio (nordeste do Estado de São Paulo). A partir dos ensaios de infiltração com duplo anel, obtiveram os valores de condutividade hidráulica saturada, variando de $1,48 \times 10^{-6}$ a $3,65 \times 10^{-5}$ cm/s para os materiais inconsolidados residuais de basalto e entre $2,01 \times 10^{-5}$ a $3,2 \times 10^{-3}$ cm/s para os materiais inconsolidados residuais arenosos do Botucatu.

Gregory et al. (2006) fez uso do infiltrômetro de duplo anel para avaliar o efeito da compactação dos solos em áreas urbanas nas taxas de infiltração. A hipótese inicial dessa pesquisa era que a compactação, provocada devido à preparação do terreno para suportar as diversas obras da engenharia, reduzem o valor da condutividade hidráulica do solo. Para este estudo, utilizou-se o duplo anel, com diâmetro interno de 15 cm, e externo com 30 cm, cravado no solo em uma profundidade de aproximadamente de 10 cm, com o tempo total de ensaio de aproximadamente 40 minutos. Para seleção das áreas para a realização do ensaio, escolheram locais em que o solo foi praticamente inalterado, devido à ação humana e em local altamente compactado. Como resultado, a compactação do solo mostrou efeitos negativos sobre as taxas de infiltração, sendo que, em locais com o maior nível de compactação resultou em taxas de infiltração significativamente menores.

Segundo Costa e Nishiyama (2007), o permeâmetro de Guelph é uma forma fácil de determinar a condutividade hidráulica saturada do solo, por meio de fornecimento de água, com uma carga hidráulica constante e conhecida. Esses mesmos autores, utilizaram esse ensaio para determinar a condutividade hidráulica de camadas compactadas do solo, que foram identificadas pelo uso do penetrômetro de impacto. Como resultado, os ensaios de infiltração confirmaram os resultados obtidos pelo penetrômetro, onde áreas com maior resistência do solo apresentaram menores taxas de infiltração.

2.8.4 GEOFÍSICA

A geofísica tem se mostrado como uma importante ferramenta para os estudos em geociências. Muito utilizada pela indústria do petróleo, tem cada vez mais ganhado espaço em estudos ambientais, geotécnicos e na pesquisa mineral. Pode ser definida como mapeamento em subsuperfície, fazendo medições de forma remota das propriedades físicas de um determinado substrato (Milsom & Eriksen, 2011). Os principais métodos geofísicos são: gravimétrico, magnético, radiométrico, elétricos, eletromagnéticos, radar e sísmicos. O método geofísico a ser utilizado depende principalmente da propriedade do material do subsolo a ser estudado, e para uma maximização dos resultados, a combinação com outras metodologias é extremamente importante. Em geotecnia ambiental, um método que vem recebendo grande importância é o de resistividade elétrica. É utilizado no estudo de descontinuidades horizontais e verticais, através de propriedades elétricas do subsolo, e na determinação de corpos anômalos tridimensionais (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

Os métodos geofísicos, em geotecnia ambiental, têm sido utilizados para a detecção e monitoramento da pluma de contaminantes. Neste contexto, os métodos geoeletricos se configuram dos mais utilizados nesse tipo de estudos, devido ao fato de ser prático e de baixo custo. Um dos ensaios geoeletricos mais utilizados em é o de eletrorresistividade, que consiste na introdução de uma corrente elétrica artificial introduzida no terreno, através de eletrodos. O procedimento é medir o potencial em outros eletrodos colocados na vizinhança do fluxo da corrente, podendo detectar regiões em subsuperfície que apresentam maior ou menor resistividade (MILSON, 2003). Os métodos geoeletricos podem ser utilizados em uma gama de estudos ambientais, como para processos do meio físico para a instalação de áreas para a disposição de resíduos; caracterização de áreas contaminadas; determinação da profundidade do substrato rochoso; variações texturais das camadas de solo; contaminações de solos e água superficiais; e a formação de plumas de contaminação (GIACHETI; ELIS; RIYIS, 2015).

Veloso, Moreira e Côrtes (2015) fizeram utilização dos métodos de resistividade e polarização induzida, de forma a diagnosticar contaminação em subsolo, provocada devido ao vazamento de hidrocarboneto. Os dados foram obtidos através de 11 linhas paralelas para o imageamento elétrico, no arranjo de Werner (2 pares de eletrodos e potencial igualmente espaçados). Como resultado, áreas com baixa resistividade, em profundidade, foram atribuídas como as de maior concentração de contaminantes. Bortolin & Malagutti Filho (2010), utilizaram os métodos de eletrorresistividade e sondagem elétrica vertical para monitorar a pluma de contaminantes em um aterro controlado, localizado na cidade de Rio Claro - SP. Dois fluxos predominantes da pluma de contaminação foram encontrados, sendo que o fluxo principal aparenta ser governado pelo fluxo d'água subterrâneo.

Moreira et al. (2015) utilizaram o método da resistividade elétrica para medir em profundidade, a relação entre o fluxo de biogás, de uma célula de descarte em um aterro. Esse método permitiu a geração de blocos 3D e uma clara distinção entre zonas de alta produção de biogás, quantificadas em drenos de superfície, com áreas de alta resistividade em profundidade.

2.9 INVESTIGAÇÕES DE PARÂMETROS FÍSICOS DE ATERRO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Embora aterros contendo a presença de resíduos de construção civil têm se tornado cada vez mais comuns, são raros os trabalhos acadêmicos que buscam investigar e avaliar as propriedades físicas desses locais. No Brasil, existem trabalhos que buscam investigar o gerenciamento e manejo de resíduos de construção civil (ZANNA, FERNANDES, GASPARINE, 2017; PASCHOALIN FILHO et al., 2017), ou então buscam fazer uma avaliação da tipologia ou uma caracterização desses resíduos (CARMO, MAIA, CÉSAR, 2012; LIMA, CABRAL, 2013). Com relação ao levantamento de propriedades físicas desses aterros, principalmente com relação aos dados geológicos e geotécnicos, avaliando quantitativamente os valores físicos e composicionais, não foram encontrados trabalhos que investigassem essas propriedades.

Cabe ressaltar que os resíduos de construção civil vêm sendo também utilizados para aterros de erosões, muitas vezes em margens de drenagens ou terrenos que serão posteriormente utilizados para construções ou mesmo revegetação. Isto sem haver estudos sobre as características destes materiais em aterros.

Moscatelli et al. (2013) tinham como objetivo caracterizar camadas arqueológicas que se encontram em subsuperfície, na cidade de Roma, Itália. Essa camada da superfície basal se assemelha muito ao que é encontrado em aterros de resíduos de construção civil, uma vez que boa parte é preenchida com restos de alvenaria. Para a obtenção de dados, os autores fizeram uso de sondagens, método de resistividade elétrica e penetração por radar (GPR). De uma forma geral, foi possível modelar a superfície basal antrópica a partir das diferenças de resistividade.

Vargemezis et al. (2015) utilizaram o método de eletrorresistividade de forma a calcular a geometria e a quantidade de materiais depositados em um antigo e irregular aterro de resíduos de construção civil e demolição em Thessaloniki na Grécia. Foi utilizado o método de resistividade elétrica, em 27 linhas paralelas, cada uma com 69 metros de comprimento, com um espaçamento de 3 metros entre as linhas, chegando a uma resolução de 15 metros de profundidade. Foi utilizado um total de 24 eletrodos por linha. Para o levantamento das características de compactação do aterro de forma direta, foi utilizado um ensaio de penetração de cone estático, com uma velocidade de 2 cm/s, atingindo uma profundidade máxima de 9,6 metros. Com isso, a quantidade de volume de resíduos foi mensurada em 32.500 m³. Segundo os autores, os principais problemas

relacionados ao estágio de planejamento para a utilização do método de eletrorresistividade foram:

- Grande heterogeneidade dos materiais, pois restos de portas, materiais domésticos e peças de ferro estavam todos incluídos como detritos de demolição (uma vez que esses objetos possuem uma resistividade menor que restos de concreto, tijolos entre outros)
- O fato de haver restos de cerâmicas (pisos, azulejos), que possuem um valor de resistividade muito próximo ao das argilas, fazendo com que o contraste elétrico com camadas de argila seja muito baixo. Com isso, torna-se uma tarefa muito difícil discriminar esses dois elementos.

Valente, Gomes e Menezes (2017) realizaram primeiramente um levantamento indicando a localização de diversos aterros de resíduos de construção civil no município de São Carlos (incluindo a área de estudo objeto dessa pesquisa), caracterização visual da composição desses materiais e da composição química com teste de lixiviação (que foram submetidos a análises químicas). Como resultado, observa-se que todos os aterros delimitados apresentaram alguns dos valores de sulfato, dureza total, Cádmio, Chumbo, Ferro, Manganês, Alumínio acima dos limites de referência.

3 METODOLOGIA

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de São Carlos está localizado na região central do estado de São Paulo, entre as coordenadas 48°5'27,6" e 47°43'8,4" longitude oeste e 21°35'50,7" e 22°9'39,7", e a 228 km de distância da capital do estado. Sua população estimada para o ano de 2017 foi de 246.088 habitantes. O município possui 1.132 km² de área total, dos quais 6% (67,2 km²) constituem a área urbana. (IBGE, 2017). Possui dois distritos, sendo eles: Água Vermelha, com 3.296 habitantes e Santa Eudóxia com 3.034 habitantes.

O clima no município é Temperado de altitude, apresentando um verão chuvoso e inverno seco. Precipitação média é de 1.512 mm de chuva ao ano, com uma umidade relativa do ar com média de 76% no verão e 54% no inverno (SÃO CARLOS, 2018).

Á área de estudo, o aterro de resíduos de construção civil, localiza-se na microbacia do Córrego da Água Quente (Figura 10), pertencente à Bacia do Córrego do Monjolinho em São Carlos – SP.

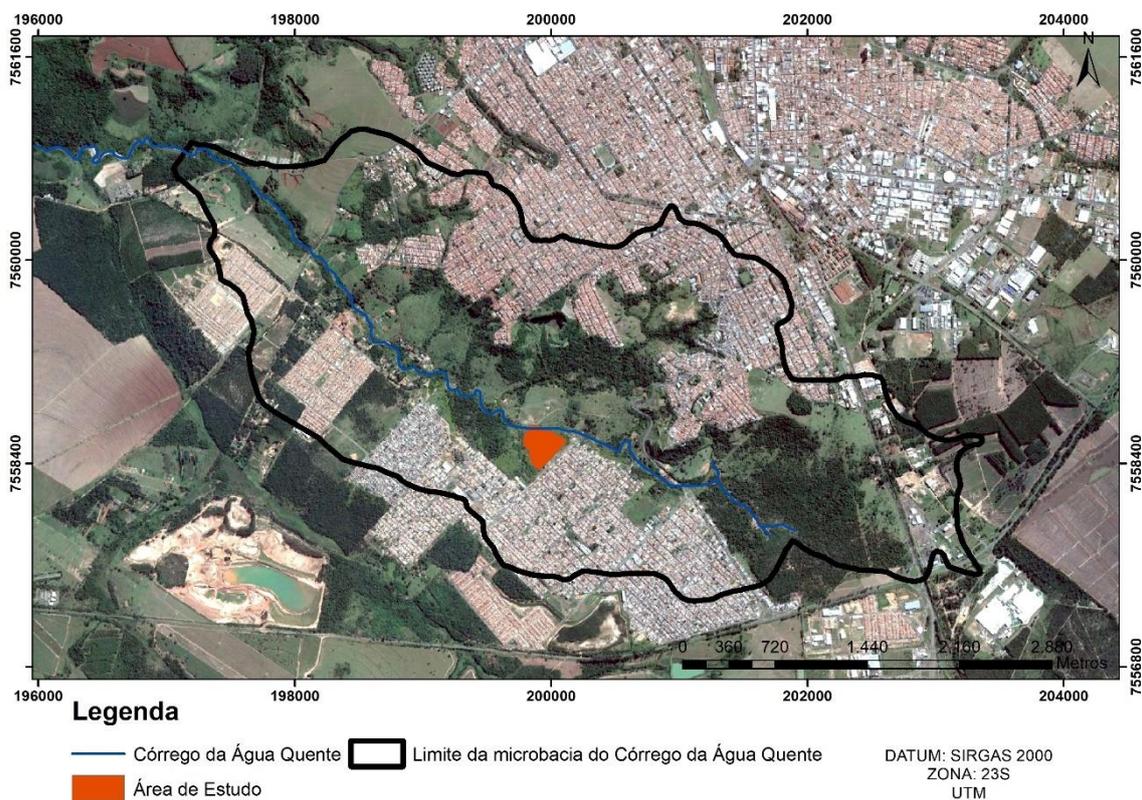


Figura 10 Limite da microbacia do Córrego da Água Quente. Fonte: Lima (2017) e Google Earth, 25 de junho de 2017, modificada pelo autor

Está localizada na Avenida Arnaldo Almeida Pires, entre as ruas Tertulina Maria dos Santos e Américo Gasparotti, no bairro Cidade Aracy, como indicado na Figura 11. A área é conhecida localmente como aterro de resíduos do Sítio dos Cocais, ao lado da “antiga entulheira do Aracy”, e é um local onde ocorreu oficialmente, e continua ocorrendo clandestinamente, a deposição de resíduos de construção civil (inertes e não inertes), lixo doméstico, podas de árvores e outros. O bairro Cidade Aracy se localiza na periferia da cidade de São Carlos, a sul do município, e em sua maioria, possui habitações de segmentos populacionais de baixa renda.

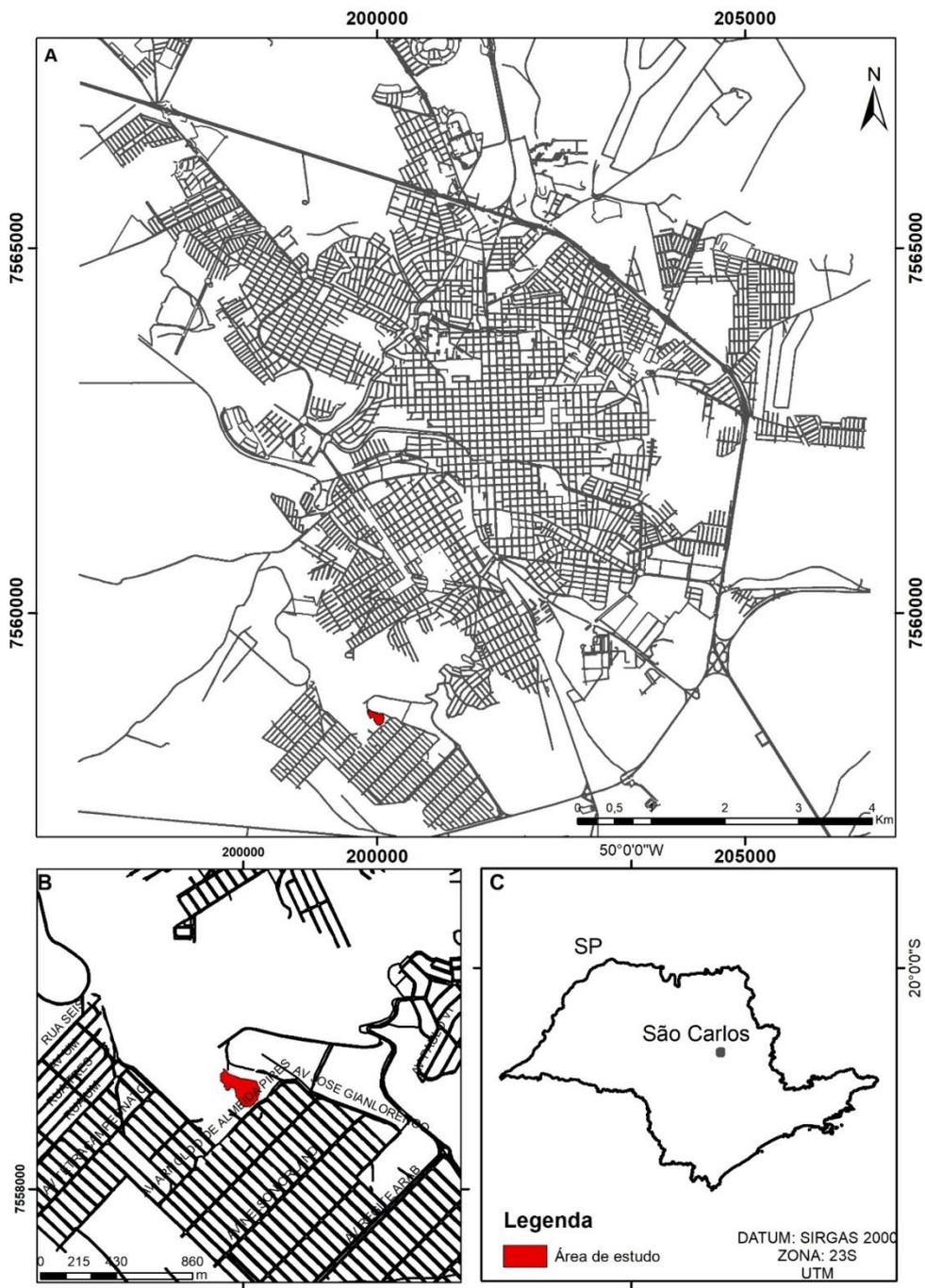


Figura 11 Localização da área de estudo. A) Mapa da área urbana do município de São Carlos. B) Localização da área de estudo no bairro Cidade Aracy. C) Localização do município de São Carlos no estado de São Paulo

3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS

Para atingir os objetivos de estudar e caracterizar aspectos geológico-geotécnicos do aterro de resíduos de construção civil, considerando-o como um depósito

antropogênico, foram definidos métodos aplicados à área. Todos os pontos que foram levantados ou determinados em campo, constam no Anexo 1.

O processo metodológico se divide em 6 etapas, conforme ilustra Figura 12, que serão apresentadas na sequência.

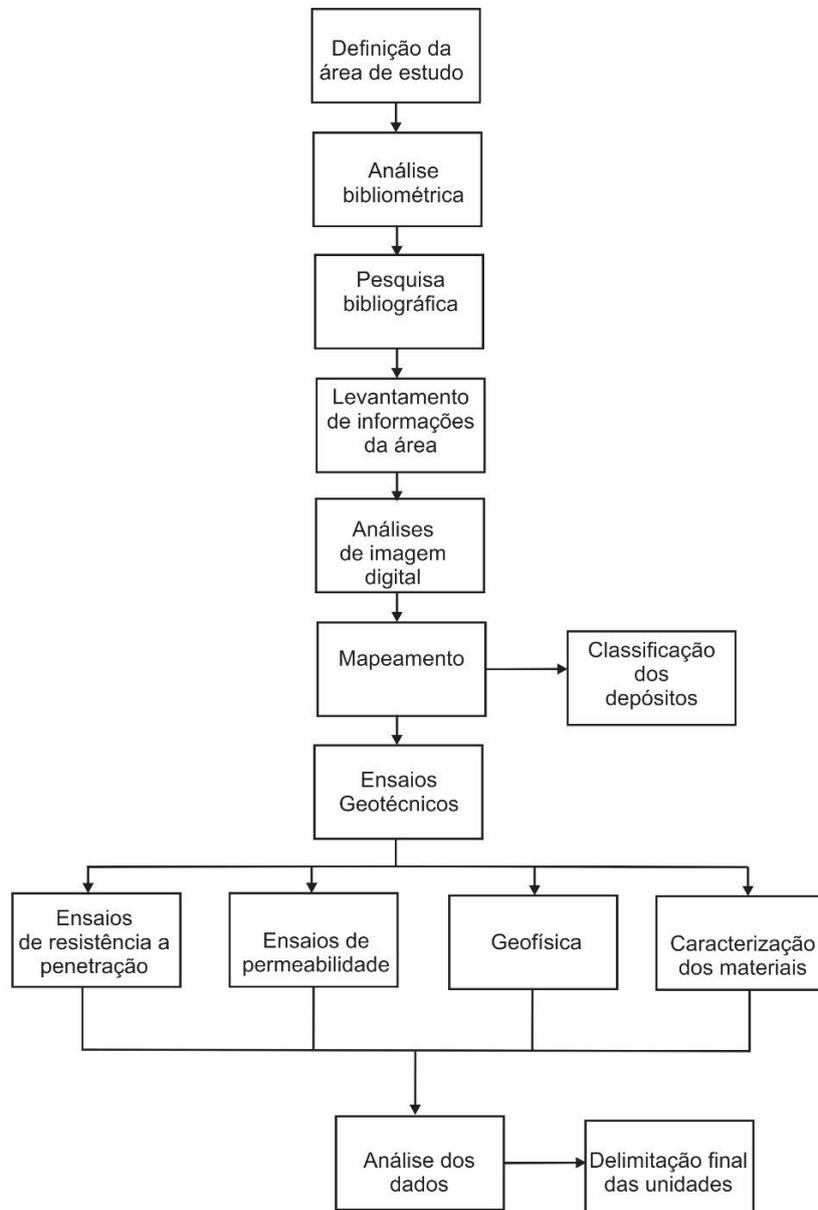


Figura 12 Fluxograma da metodologia.

3.2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre os principais estudos relacionados aos temas chaves da pesquisa. Estão incluídos solos urbanos, depósitos antropogênicos,

contaminação de águas subterrâneas, mapas geológicos e geotécnicos da região de São Carlos, geofísica como método de investigação em áreas urbanas, sensoriamento remoto, mapeamento de depósitos antropogênicos e métodos de caracterização de resíduos de construção civil. Esta etapa inclui também buscar novos métodos e técnicas relacionados ao tema.

Foi realizada uma análise bibliométrica, permitindo assim compreender melhor os diversos trabalhos publicados na área de pesquisa, e os passos seguem conforme mostrado na Figura 13, como apresentado no item 2.3 desse trabalho. Para a coleta de dados, utilizou-se a base de dados da *Scopus*, que de acordo com a Elsevier (2017), é uma das maiores bases de dados de resumos e citações de literatura científica revisada por pares, oferecendo ferramentas para rastrear, analisar e visualizar pesquisas nas áreas de ciência, tecnologia, medicina, ciências sociais, artes e humanidades.

Os artigos selecionados foram obtidos por meio do portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, que oferece acesso a textos completos em diversos periódicos. A pesquisa foi realizada utilizando-se as palavras-chave “anthropogenic deposit” ou “technogenic deposit”, que delimitam o tema da pesquisa em desenvolvimento, considerando artigos publicados em periódicos, conferências, revisões bibliográficas, capítulos de livros e artigos que já foram aceitos por periódicos e que estão em processo de publicação. Outras palavras foram utilizadas, como “human-induced deposit” e “Anthropocenic deposit” e “anthropogenic deposit stratigraphy”, mas essas buscas não retornaram artigos. Foram selecionados apenas artigos escritos em Inglês, o que se configura como uma limitação desta análise, uma vez que não abrange todos os artigos publicados, em especial no Brasil.

Para as referências em língua portuguesa foram feitas diversas buscas, que possibilitaram complementar este tema específico com artigos de autores brasileiros, com artigos de congresso, revistas e teses.

Para realizar as análises bibliométricas, utilizou-se os programas *R Studio* e *Vosviewer*, que são softwares livres, para fazer o levantamento bibliométrico. No programa *R Studio*, utilizou-se o pacote *Bibliometrix* (2016), que fornece várias rotinas para importar dados bibliográficos dos bancos de dados da *Web of Science*, *Scopus* e do *Clarivate Analytics*, realizando análises bibliométricas e construindo matrizes de dados. O *Vosviewer* é um software para a construção e visualização de redes bibliométricas. Essas redes podem ser construídas com base em cocitação, acoplamento bibliográfico

(mede a relação entre dois artigos, baseado no número de referências em comum citados por esses artigos) ou relações de coautoria.

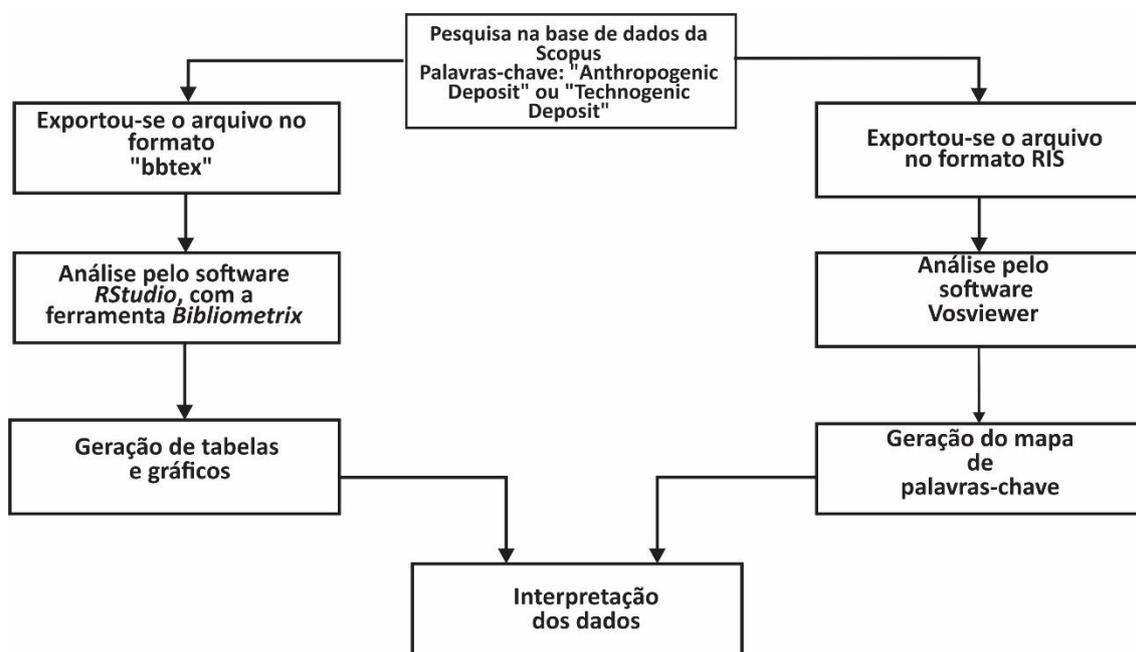


Figura 13 Fluxograma da metodologia utilizada para a análise bibliométrica. Fonte: Oliveira e Menezes (2018)

Com isso, os artigos selecionados foram utilizados para compreender melhor tema, e facilitar a busca e seleção de artigos que embasaram a revisão bibliográfica desse trabalho, que posteriormente foi complementada com referências mais recentes ou de temas específicos

3.2.2 ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS

Para esse trabalho, fez-se uso de imagens históricas da área de estudo, fornecidas pelo *software Google Earth Pro* ©, com imagens capturadas pelo satélite DigitalGlobe© com as seguintes datas: 30 de junho de 2004; 18 de out. de 2010; 1 de jun. de 2011; 1 de abril de 2012; 16 de abril de 2013; 9 de maio de 2014; 21 de maio de 2018. Todas essas imagens apresentam resolução espacial de 30 metros. Essa ferramenta auxiliou na delimitação da área ocupada pelo aterro ao longo do tempo, definindo a evolução dos processos que ocorreram, das formas do terreno antes do aterro, e dos diferentes tipos de uso do solo.

Para a análise dessas imagens, foram utilizados os softwares *ArcGIS* © 10.1 e *QGIS* 2.14.8. Essas imagens foram georreferenciadas, no datum SIRGAS 2000. Essas

imagens auxiliaram na delimitação da área de estudo e na seleção de locais para a realização dos ensaios geotécnicos e coletas de amostra. Para geração de curvas de nível, fez-se uso de imagem do satélite Alos Palsar, com data 15 de janeiro de 2011.

3.2.3 LEVANTAMENTO DE DADOS DA ÁREA

De forma a obter informações sobre a área do aterro de resíduos de construção civil e no entorno, o Ex-Coordenador de Meio Ambiente do município de São Carlos, que acompanhou todo o processo de instalação do aterro, forneceu diversas informações.

Foram fornecidas também pela empresa Silva Leme Engenharia, responsável pelo projeto e instalação do aterro, os seguintes dados: algumas fotografias históricas da área tiradas durante a instalação do aterro; um relatório técnico, com diagnóstico das principais ocorrências que afetam a Bacia do Córrego da Água Quente, em São Carlos SP, e com medidas preventivas e corretivas para o enfrentamento destes problemas; carta topográfica, da área de estudo, realizada no ano de 2007; perfis de sondagem realizados na Bacia do Córrego da Água Quente, no ano de 2007; dados de um poço de monitoramento, em local próximo da área de estudo, realizado no ano de 2007 (SILVA LEME ENGENHARIA, 2007) e relatório para recuperação de área degradada pela disposição controlada de resíduos de construção civil, na área de estudo (SILVA LEME ENGENHARIA, 2010).

Foram obtidos também, junto à CETESB, os passos de licenciamento do local (processo 73/00215/11): pedido de licença prévianº 73000054, com data da emissão 20 de dezembro de 2011; licença de instalação, nº 73000060, com data de emissão 04 de junho de 2012; e parecer desfavorável da licença de operação, nº 730000158, com data de emissão 04 de outubro de 2017.

3.2.4 MAPEAMENTO DA ÁREA DO ATERRO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DO ENTORNO

O levantamento das informações em campo se deu por meio de descrição, análise e classificação dos principais tipos de depósitos antropogênicos da área. A partir das análises das imagens digitais, realizou-se visitas de campo, observando e descrevendo as principais feições da área de estudo. Para essa etapa, utilizou-se GPS portátil da *Garmin*

e Trex, martelos petrográficos e estratigráficos, lupas, máquinas fotográficas e cadernetas de campo.

Para a classificação dos depósitos antropogênicos, definiu-se pela utilização da classificação determinada por Peloggia, que é uma variação da classificação apresentada pelos Ingleses (McMillan & Powell 1999, Rosembaum et al. 2003, Price et al. 2004, 2011), conforme Tabela 5.

Tabela 5 Classificação proposta por Peloggia et al. (2014)

Classes de terreno tecnogênico	Categorias de mapeamento	Classificação genética de tipos de terrenos, solos e depósitos tecnogênicos	Exemplos
Terreno tecnogênico de degradação	Depósitos tecnogênicos sobre terrenos naturais ou escavados	Depósito construído (depósito sobre terreno natural)	Aterros, pilhas de rejeito, barragens e etc. (Depósitos construídos de 1ª geração)
		Depósito construído ou preenchido (depósito sobre terreno escavado ou erodido)	
		Depósito sedimentar induzido aluvionar (depósito de fundo de vale)	Depósitos sedimentares em sistemas de drenagem contemporâneos
		Depósitos sedimentar induzido coluvial (depósito de encosta)	(Depósito induzido de 1ª geração)
		Depósitos remobilizados	Depósitos formados por deslocamento ou erosão de depósitos tecnogênicos preexistentes. (Depósito de 2ª geração)
Terreno tecnogênico de degradação	Cicatrizes tecnogênicas induzidas	Terreno erodido (cicatrizes erosivas)	Sulcos, ravinas e voçorocas
		Terreno escorregado (cicatrizes de deslizamento)	Escorregamentos em geral
		Terreno afundado (afundamento por subsidência ou colapso)	Dolinas, poços, depressões, sumidouros
	Cicatrizes tecnogênicas construídas	Terreno escavado (superfície de escavação)	Cortes de terraplanagem, cavas de mineração
Terreno tecnogênico modificado	Horizontes alterados	Solos quimicamente alterados (horizontes com alteração química)	Solo contaminado com efluentes ou pesticidas
		Solo mecanicamente alterado (horizontes compactos ou revolvidos)	Solo compactado, subsolagem de solo agrícola
Terreno tecnogênico misto	Unidades compostas	Camadas sobrepostas	Aterro (depósitos construídos) sobre depósito de assoreamento (induzido) ou sobre horizontes de solo tecnogênico
	Unidades complexas	Camadas complexas (unidade indiferenciada)	Aterro alterado por efluentes (depósitos construídos e modificados, camadas arqueológicas)

3.2.5 INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

O objetivo em realizar ensaios geológicos, geotécnicos e geofísicos nesse trabalho é fazer o levantamento de parâmetros físicos da área de aterro de resíduos de construção civil e áreas de materiais naturais, em suas camadas superficiais e subsuperficiais, de

forma direta e indireta, determinando assim as características geotécnicas desses ambientes, em especial aquelas relacionadas com a infiltração de água.

Com isso, os métodos diretos utilizados atingiram profundidade subsuperficial (até 60 cm), sendo avaliados quantitativamente a compactação, condutividade hidráulica, amostragem e caracterização dos materiais. Já nos métodos indiretos, fez-se uso da geofísica, com o método de eletrorresistividade.

Já a caracterização, foi utilizada para determinar os tipos de materiais superficiais naturais ou antrópicos que podem ser encontrados na área e sua granulometria.

Desta forma, escolheu-se os seguintes ensaios de forma a se obter um melhor detalhamento das propriedades de aterros de resíduos de construção civil.

3.2.5.1 Geofísica

Neste trabalho, o objetivo principal da geofísica é delimitar a área de aterro, determinando a profundidade em que os resíduos foram depositados e as possíveis plumas de contaminantes.

Escolheu-se utilizar o método geofísico de eletrorrestividade, por ser prático, de baixo custo, possibilitando delimitar melhor as áreas de aterro e suas profundidades, assim como e a presença ou não de plumas de contaminantes, e o nível do freático. É principalmente, devido ao fato de a área possuir rejeitos de construção civil, seria possível observar um grande contraste de resistividade entre as áreas naturais e os resíduos de construção civil.

Como pressuposto, baseia-se no fato que, nas áreas de aterro de resíduos de construção civil, devido à grande presença de materiais resistivos, como cimento, resto de concretos, restos de azulejos entre outros, apresente uma resistividade maior que os materiais naturais que se encontram no limite inferior do aterro.

Kearey (2002) afirma que a resistividade diminui à medida que aumenta a porosidade, sendo esse o principal fator controlador da resistividade, devido ao fato que, soluções salinas percolam os interstícios dos solos e rochas, diminuindo a resistividade, desde que esse meio se encontre saturado. Portanto, devido à presença da deposição de resíduos ricos em matérias orgânicas em alguns pontos do aterro, espera-se observar regiões anômalas com baixa resistividade, indicando assim possíveis áreas com contaminantes.

Calcula-se a resistividade aparente devido à heterogeneidade do meio, através da equação:

$$\rho_a = k \times \left(\frac{V}{I}\right)$$

Onde:

I: Intensidade da corrente que percorre o meio

K: Geometria do arranjo dos eletrodos

ΔV : Diferença de potencial medida pelos receptores

ρ : Resistência aparente

A unidade da resistividade aparente é medida em Ohm.m, a diferença de potencial é medida em milivolt (mV), a intensidade da corrente é medida em miliampère (mA), enquanto a geometria do arranjo dos eletrodos em metros (m).

As linhas para o levantamento dos dados geofísicos foram dispostas conforme indicado na Figura 14, totalizando 6 linhas de imageamento (Tabela 6), separadas. Mas após a realização do ensaio, o perfil geofísico da linha 6 apresentou uma grande quantidade de ruído, devido ao fato que grande parte dos elétrodos utilizados para a realização do ensaio, foram cravados em cima de pilhas de rejeitos de resíduos de construção civil. Com isso, não foi possível aproveitar essa linha.

Cada elétrodo foi disposto com um espaçamento de 5 metros, utilizando o arranjo de *Schlumberger*, conforme indica a Figura 15.

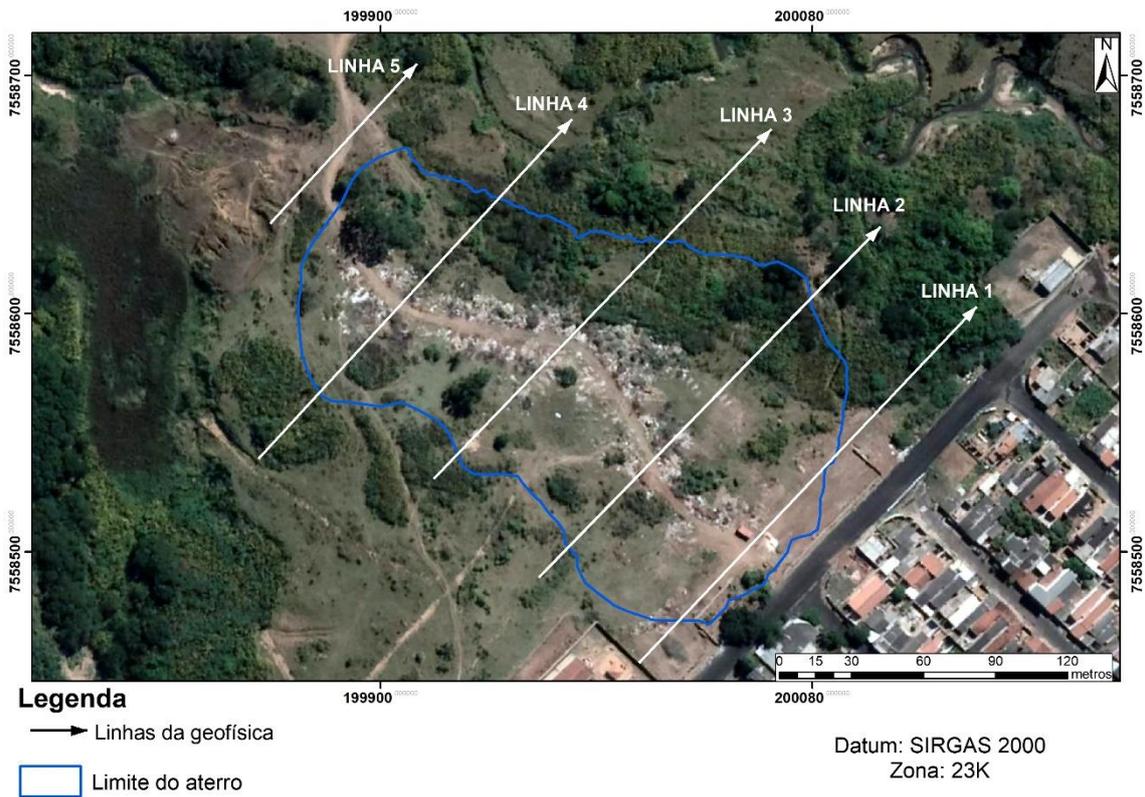


Figura 14 Disposição das linhas para a geofísica. Modificado de Google Earth, 25 de junho de 2017.

Tabela 6 Comprimento das linhas e número de eletrodos por linha.

Nome da Linha	Comprimento (metros)	Número de eletrodos	Profundidade do ensaio (metros)
Linha 1	200	40	50
Linha 2	200	40	50
Linha 3	200	40	50
Linha 4	200	40	50
Linha 5	100	20	30
Linha 6	255	51	-

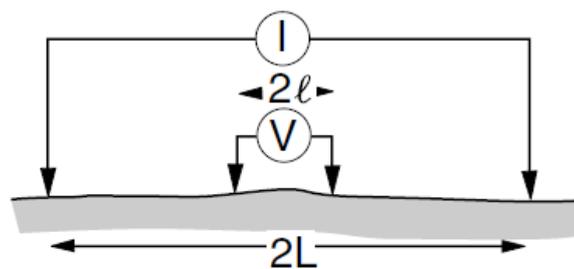


Figura 15 Modelo esquemático do arranjo de Schlumberger. $2l$ é o espaçamento usado no arranjo entre os eletrodos de potencial, que é menor que o espaçamento dos eletrodos de corrente $2L$. Fonte: Milson (2003).

Utilizou-se neste trabalho a técnica de “tomografia elétrica”, permitindo a investigação do subsolo em duas dimensões. Esta técnica consiste em manter a profundidade inicial definida, à medida que ocorre um avanço lateral das linhas estabelecidas. Para a obtenção dos dados geofísicos, primeiramente cravou-se os eletrodos no solo, e posteriormente, foi adicionado água, de modo a reduzir a resistência de contato entre o eletrodo e o solo. Após, conectou-se esses eletrodos aos cabos. Foram utilizados para o levantamento: Cabos com 210 metros de comprimento, com encaixe para 21 eletrodos; e eletrodos metálicos. O equipamento utilizado para a aquisição é o ABEM Terrameter LS com 84 canais e 250W de potência (ABEM, 2012), como mostrado na Figura 16.



Figura 16 Aquisição dos dados geofísicos em campo e aparelhos utilizado.

Para a modelagem dos dados, gerou-se o modelo de inversão 2d utilizando o *software Res2dinv*, que acompanha o aparelho (essa etapa foi desenvolvida na UNESP). Posteriormente, os dados bidimensionais foram interpolados no *Oasis Montaj* (plataforma *Geosoft*) utilizando o método da mínima curvatura, gerando os modelos 3d. Esta etapa foi desenvolvida pelo professor Dr. César Camareiro Moreira, da UNESP.

3.2.5.2 Avaliação da resistência à penetração

O objetivo principal em utilizar o penetrômetro de impacto neste trabalho foi determinar a resistência à penetração das camadas superficiais do solo na área do aterro e nas áreas naturais de entorno. Fez-se o uso do penetrômetro de impacto por ser um equipamento versátil, leve, permitindo fazer uma malha amostral que cobrisse toda área

de aterro. Com isso, utilizou-se esse aparelho para obter o valor da resistência física a penetração dos locais da área de aterro, resíduos superficiais e materiais naturais.

O penetrômetro de impacto utilizado foi o modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF, produzido pela Kamaq (Araras-SP), Figura 17. De acordo com Stolf, Fernandes e Furlani Neto (1983), esse penetrômetro possui as características constantes na Tabela 7.



Figura 17 Penetrômetro de impacto utilizado na pesquisa.

Tabela 7 Especificações do penetrômetro de impacto IAA/PLANALSUCAR-STOLF. Fonte: Stolf, Fernandes e Neto (1983)

Peso que provoca o impacto	4kg
Curso da queda livre	40cm
Ângulo do cone de penetração	30°
Área da base do cone de penetração	0,2pol ²
Diâmetro do cone de penetração	12,8mm
Diâmetro da haste que penetra no solo	9,5mm

A localização dos ensaios realizados com o penetrômetro de impacto foi disposta em uma malha regular, com um total de 32 pontos (Figura 18), de forma a abranger a área de aterro, área com resíduos superficiais, e área de solos naturais. Essa malha foi disposta de modo que os pontos estivessem próximos as linhas geofísicas.

Os furos foram realizados com uma profundidade máxima de 60 cm, de acordo com a capacidade máxima do aparelho. Para a execução do ensaio, contou-se a quantidade de impactos para a haste penetrar a distância de 5cm dentro do solo, obtendo-se assim, o número de golpes a cada 5cm. Quando durante a realização do ensaio o meio se tornava impenetrável ao penetrômetro de impacto (quando após 20 golpes, não ocorria mais penetração), utilizou-se as recomendações da ABGE (2013) para furos de sondagem, que consiste em anotar os valores obtidos até a profundidade que foi possível penetrar nesse local, e refazer o furo em um local próximo, com distância máxima de 1 metro do furo original (indica no máximo 3 metros de distância).

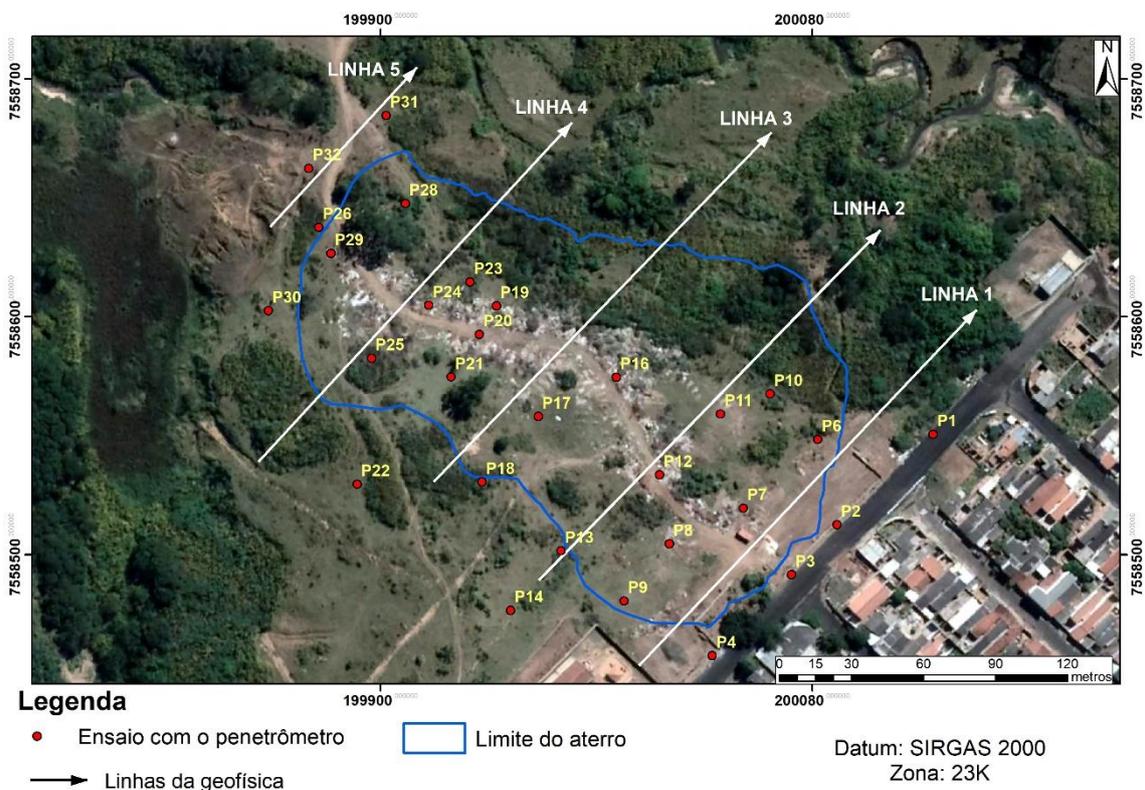


Figura 18 Malha de pontos utilizados para o ensaio de compacidade.

Para transformar os resultados gerados pelo penetrômetro (número de golpes pela distância penetrada) para força por unidade de área, Sanglerat (1972, pg. 219) afirma que a fórmula mais adequada é a “formula dos Holandeses modificada”, juntamente com parâmetros de correção que foram por ele testados. Essa formula é uma variação da formula de Sanders, considerando a energia perdida por o impacto entre as massas (M e m), considerando um choque totalmente inelástico, sem deformações permanentes. Essa fórmula se dá da seguinte maneira:

$$F = (M + m)g + \frac{M}{M + m} \cdot \frac{Mgh}{x}$$

Onde:

F: força de resistência do solo (kgf);

M: massa que provoca o impacto (kg);

m: Massa dos demais componentes do penetrômetro, excluía a de impacto (kg);

M+m: massa total (kg);

Mg e mg: pesos das massas consideradas (se M = 4kg; Mg = 4kgf);

h: altura de queda da massa que provoca o impacto (cm);

x: penetração unitária ocasionada por um impacto (cm/impacto), que é medida contando-se quantos golpes são necessários para penetrar uma determinada profundidade

Essa formula de transformação está contida no software (planilha no excel) proposto por Stolf et al. (2014).

Na Figura 19, tem-se a posição de cada variável utilizada no cálculo para transformação de golpes por unidade de distância para força por unidade de área.

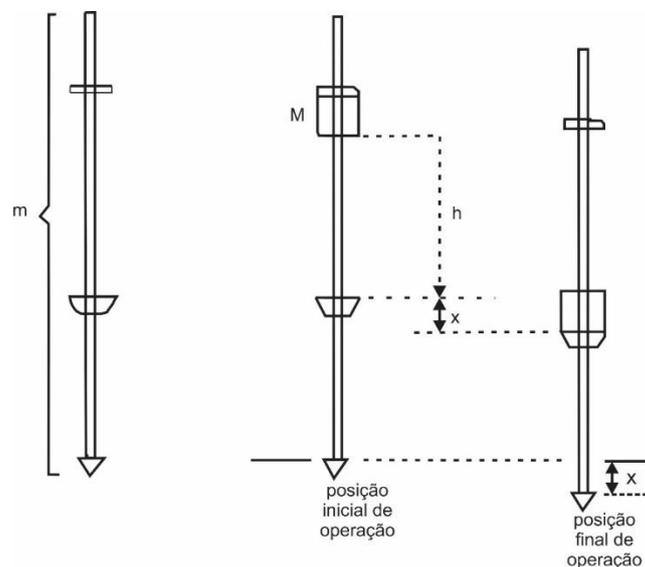


Figura 19 Modo de utilização do penetrômetro. Fonte: Stolf (1991)

Comparando o valor da resistência física do penetrômetro de impacto dinâmico na ponta do cone de penetração em Mpa, com a resistência física no ensaio de SPT, tem-se a relação indicada na Tabela 8.

Tabela 8 Resultados da literatura para a correlação $q_c/NSPT$ para areias. Onde q_c é valor da resistência física no penetrômetro de impacto em Mpa e NSPT valor da resistência física no ensaio SPT. Fonte: (MORAES, 2008).

$q_c/NSPT$ médio	Descrição do solo	Energia do SPT	Referência
1,00	Areia		Aoki e Velloso (1975)
0,80	Areia siltosa		
0,70	Areia silto-argilosa		
0,60	argilosa		
0,50	Areia argilo-siltosa		
0,40 – 0,60	Areia		Schmertmann (1978)
0,30 – 0,40	Areia siltosa, argilosa, silto-argilosa ou argilo-siltosa		
0,50 – 0,70	0,30		Ramaswany et al. (1982)
	Areia siltosa, argilosa, silto-argilosa ou argilo-siltosa		
0,50 a 0,70	0,30 < D_{50} < 0,70mm	55% a 65%	Robertson et al. (1983)
0,60	Areia		Danziger e Velloso (1986)
0,53	Areia siltosa, argilosa, silto-argilosa ou argilo-siltosa (areias do Rio de Janeiro)		
0,70 e 1,00	Areia fina a média	72%	<u>Castello e Polido (1994) *</u>
0,20 a 1,00	Areias do Rio de Janeiro, São Paulo e Rio Grande do Sul (solos residuais).		Politano et al. (2001)
0,50 (solo natural)	Areia fina e areia fina siltosa		Soares (2002)
0,60 e 0,65 (solo compactado)			
1,1	Areia com pedregulhos		Teixeira (1996a)
0,90	Areia		
0,70	Areia siltosa		
0,55	Areia argilosa		
<u>0,50 (0,25 a 1,00)</u>	Areia fina a média e	<u>75%</u>	
0,40 (0,20 a 0,80)	areia média a fina	60%	Cordeiro (2004)
	0,30 < D_{50} < 0,70mm		

Como os materiais da área de aterro são de granulometria distinta, com porções grosseiras, foi definido pela não determinação do teor de umidade. Pois como considera Hassan (1966), para solos finos e grossos, os parâmetros considerados são distintos, sendo que para os finos a umidade influencia bastante na resistência à penetração, enquanto para materiais grossos não; em solos com granulometria fina o que causa a resistência à penetração é a estrutura desse solo e em solos grosseiros essa resistência é provocada devido à dificuldade do penetrômetro perfurar esses materiais. Vaz et al. (2002) recomenda-se que as medidas sejam feitas em condições umidade nem muito alta nem muito baixa, preferencialmente na capacidade de campo. Com isso, os ensaios foram

realizados em datas próximas, em uma mesma condição climática, para que a umidade não seja um fator determinante no resultado.

Como a área de estudo é destinada para habitação de interesse social, fez-se uso do penetrômetro de impacto para avaliar a capacidade desse terreno para a instalação de fundações rasas. Uma outra possibilidade de uso para essa área, seria a criação de um parque. Com isso, o uso do penetrômetro também avaliou a capacidade do crescimento de raízes nesse local.

Segundo dados da estação meteorológica da INMET (2019), em São Carlos, não teve ocorrência de chuva nos 25 dias anteriores à realização desse ensaio, sendo realizado nos dias 25 a 27 de julho, e nos dias 31 de julho a 1 de agosto. A precipitação nesse período foi de 0mm (Figura 20). Foi considerada a mesma condição de umidade para todos os ensaios realizados em período seco e, portanto, menor teor de umidade no solo. Essa estação está localizada dentro da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) com as seguintes coordenadas: Latitude-21.980353° Longitude -47.883927°.

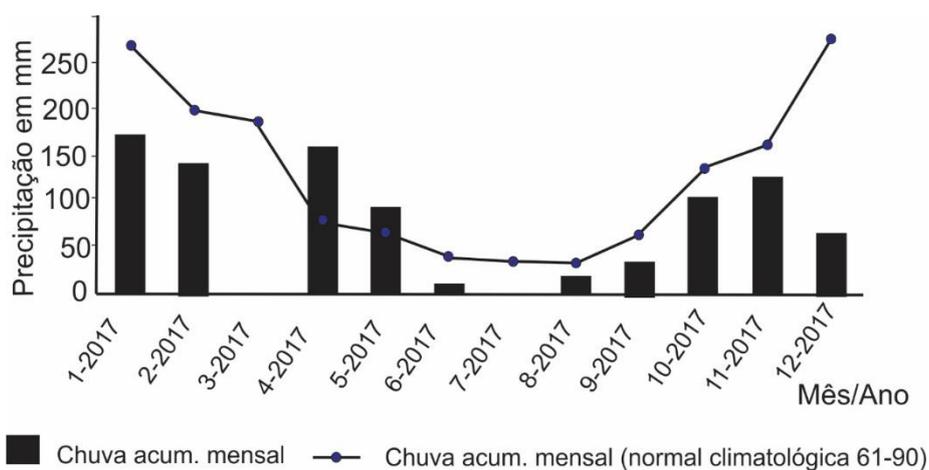


Figura 20 Chuva acumulada mensal x chuva (normal climatológica 61-90), em São Carlos - SP, para o ano de 2017. Modificado de INMET (2019).

3.2.5.3 Ensaio de permeabilidade

Para a realização dos ensaios de permeabilidade, utilizou-se o ensaio proposto pela ABGE (2013) denominado ensaio de rebaixamento em poço; consiste na realização de um furo de sondagem e posteriormente, a inserção de um revestimento no furo, e a introdução de água, medindo a velocidade de rebaixamento da água. O objetivo foi medir a velocidade que a água leva para atravessar os primeiros 60cm de camada das áreas de

aterro e de materiais naturais, e com isso, definir o coeficiente de permeabilidade dos materiais naturais e de aterros. Posteriormente seria buscada a correlação com os valores do ensaio de compactação. Escolheu-se o método que será mostrado a seguir, devido a área ser localizada em uma local remoto, onde não se tem uma grande disponibilidade de água para ser utilizada no ensaio e por possibilitar ensaiar a camada subsuperficial.

O objetivo tanto do ensaio de permeabilidade quanto do ensaio de resistência física a penetração, foi determinar as características das camadas até 60cm, pressupondo que, a partir da saturação dessas camadas, a infiltração cessa, e passa a ocorrer apenas o escoamento superficial.

Para a realização da sondagem, utilizando-se trado manual, seguiu-se as recomendações propostas ABGE (2013a), que são:

- A área a ser realizada a sondagem deve estar limpa, permitindo a realização das operações sem que haja obstáculos;
- A sondagem deve ser iniciada com o trado do tipo concha;
- Quando o avanço com o trado do tipo concha se torna difícil, utilizar o helicoidal;
- Quando não for necessária a remoção de amostras, como em caso de materiais duros e areias sem coesão, deve-se adicionar um pouco de água de forma a facilitar a perfuração;

A ABGE (2013a) recomenda que a sondagem deve ser terminada quando:

- Atingir a profundidade programada;
- Ocorrerem desmoronamentos sucessivos no furo;
- O avanço do trado foi inferior a 5cm em 10min de operação;
- Quando o terreno for impenetrável ao trado, devido a cascalhos, matacões ou rocha.

Neste caso, deve-se fazer sondagens adicionais, deslocadas de 3m de para qualquer direção.

Para a abertura dos furos, utilizou-se um trado tipo concha de 4 polegadas, e quando necessário, o auxílio de um trado helicoidal de 6 polegadas. Devido à dificuldade para realizar a perfuração, por apresentar diversos materiais com tamanho superior a pedregulhos, dificultando a abertura com o trado, fez-se uso de uma “vanga” e uma “cavadeira”, de forma a retirar os fragmentos maiores, e dar continuidade no furo até se obter a profundidade determinada.

Os ensaios foram realizados em áreas de aterro, área com resíduos superficiais e locais de material inconsolidado natural, de forma a comparar as diferentes taxas de infiltração em diferentes locais.

Após a abertura da sondagem, colocou-se o permeâmetro, que consiste de um tubo de PVC, com 97,8 cm de comprimento, diâmetro interno da boca de 9,6 cm, e diâmetro externo de 10,2 cm, acoplado com um nível graduado de 29 cm. A Figura 21 mostra o permeâmetro instalado para início do ensaio.

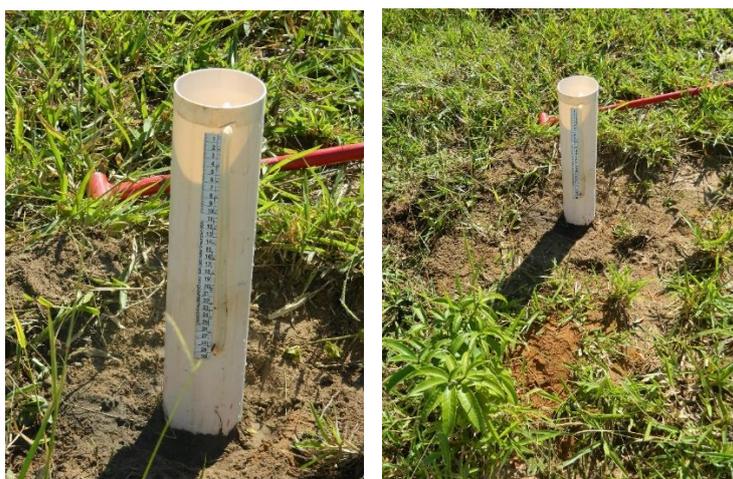


Figura 21 Ensaio de infiltração.

Antes de iniciar o ensaio de infiltração, é realizada a saturação do solo no entorno do furo, de forma a se obter uma vazão constante para o ensaio. A ABGE (2013a) considera um fluxo estabilizado quando não se observa variações bruscas nos valores lidos e a diferença entre leituras isoladas e seu valor médio não supera 20%.

Após a saturação ter sido atingida, inicia-se o ensaio de rebaixamento. Adiciona-se água no piezômetro até a “boca”, tomando o instante zero com 0cm da régua graduada. Posteriormente, faz-se as leituras das medias nos tempos de 15 segundos, 30 segundos, 45 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 3 minutos, 4 minutos e assim sucessivamente, até o fim do ensaio, conforme indicado pela ABGE (2013a). O ensaio é dado por concluído quando o rebaixamento atingir 20% (que equivale a 29 cm da régua graduada) da carga inicial aplicada ou 30 minutos de ensaio.

Para o cálculo da condutividade hidráulica, utilizou-se a formula proposta pela ABGE (2013a), como mostrado na equação abaixo, e apresentado na Figura 22:

$$k = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{d_1^2}{8 \cdot h_0 \cdot \sqrt{dL}}$$

Em que:

K: constante da condutividade hidráulica (cm/s).

Δh : diferença da carga piesométrica (cm)

d_1 : diâmetro externo do furo (cm)

d: diâmetro do revestimento

h_0 : comprimento do revestimento (cm)

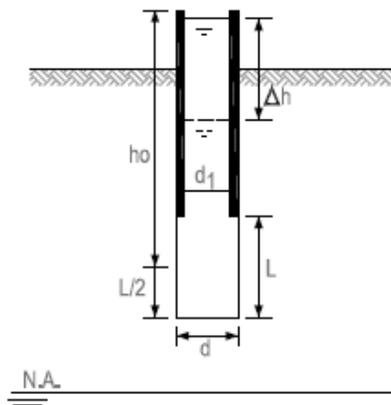


Figura 22 Modelo esquemático do ensaio de rebaixamento. Fonte: ABGE (2013a)

Os pontos foram alocados de forma a abranger toda área de aterro de resíduos de construção civil, materiais inconsolidados naturais e a área com resíduos apenas superficiais. Foram realizados 10 ensaios de rebaixamento, dispostos conforme indicado na Figura 23, alocados nos locais onde foram realizados os levantamentos geofísicos, ou em alguns casos, em locais próximos a essas linhas.



Figura 23 Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios de rebaixamento

3.2.5.4 Amostragem e caracterização dos materiais

Para a caracterização, foi utilizado material removido das sondagens para o ensaio de infiltração, buscando caracterizar materiais superficiais naturais e materiais de aterro. Segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004), o objetivo em fazer uma amostragem é coletar uma quantidade significativa de material, de forma a poder determinar suas características, como classificação granulométrica e composição dos materiais.

Baseado nessas informações, na coleta de materiais superficiais para uma posterior caracterização foi utilizado trado do tipo concha, tipo helicoidal e em alguns casos, cavadeira. Como recipiente, foram utilizados sacos plásticos resistentes para alocação das amostras. Todas as amostras foram identificadas, utilizando uma caneta permanente.

A profundidade máxima em que as amostras foram coletadas é a mesma da profundidade em que foram realizados os furos para o ensaio de infiltração (máximo de 60cm).

A caracterização visual e as análises granulométricas foram realizadas em laboratório.

A norma da NBR 8.044 ABNT (2018) de investigação geotécnica não estabelece parâmetros para a investigação de terrenos antropogênicos. Com isso, durante a coleta, seguiu-se o estabelecido pela ISO 14.688-1 (ISO 2018), que afirma que deve-se listar as seguintes características quando estudando materiais antropogênicos: origem do material; presença de objetos maiores, como concreto, alvenaria e etc.; presença de vazios ou desmoronamento de objetos no local da coleta; resíduos químicos e substâncias perigosas; presença de matéria orgânica, descrevendo o grau de decomposição; presença de cheiro nas substâncias; presença de diferentes tonalidades de cores; datas legíveis em documentos enterrados; e sinais de calor subterrâneo ou combustão.

Quando a amostra de material apresentava uma grande quantidade de fragmentos antrópicos foi realizado um processo de caracterização visual, observando e identificando os principais tipos de resíduos e materiais encontrados nas amostras. Posteriormente, essas amostras passaram por um processo de homogeneização e quarteamento, de forma a se obter uma amostra mais representativa, com um total de 2kg.

A análise granulométrica foi realizada de forma distinta para materiais finos (predominância de solos e materiais naturais) e grosseiros. Para materiais grosseiros, não foi feita a análise granulométrica para finos, uma vez que, para o ensaio de sedimentação, a NBR 7.181 (ABNT, 2016) indica que a amostra para esse ensaio deve ter um peso máximo de 150g, valor que não seria representativo devido ao tamanho das partículas.

I- Material de aterro grosseiro

1ª etapa (peneiramento grosso):

Utilizou o método de peneiramento para agregados graúdos, para amostras que visualmente apresentavam partículas de maiores dimensões. Com isso, essa etapa foi realizada apenas nas amostras I2, I3, I4, I5, I6 e I10.

Primeiramente, as amostras secaram em temperatura ambiente por 4 dias. Após isso, foi realizado homogeneização e posteriormente quarteamento, onde foram separadas amostras de 2kg para a realização dos ensaios.

Baseado na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), utilizou-se as seguintes peneiras com abertura de: 50mm, 37,5mm, 31,5mm, 25mm, 19mm, 12,5mm, 9,5mm e 4,75mm. O ensaio foi desenvolvido com o uso de um agitador mecânico, conforme indicado na Figura 24. O material retido em cada uma das peneiras foi pesado, e o material que ficou no fundo foi separado para a próxima etapa do ensaio granulométrico.



Figura 24 Foto do agitador mecânico do Laboratório de Materiais de Construção, com as peneiras, utilizado no ensaio granulométrico para materiais de aterro e com fragmentos grandes.

2º etapa (peneiramento fino)

Posteriormente nestas amostras, coletou-se o que passou na peneira de 4,75mm da etapa anterior e realizou-se um novo peneiramento, dessa vez com as peneiras com as seguintes aberturas: 4,75mm (4#); 2mm(10#); 1,18mm(16#); 0,425mm(40#); 0,150mm(100#); 0,075mm(200#), como indicado pela NBR 7181 (ABNT, 2016). Pesou-se o material retido em cada uma das peneiras juntamente com o material menor que 0,075mm.

Para gerar a curva granulométrica, considera-se as porcentagens retidas nas peneiras das duas etapas, segundo a equação:

$$Q_g = \frac{(M_S - M_i)}{M_S} \times 100$$

Onde:

Q_g : Porcentagem de material que passou em cada peneira

M_S : Massa total da amostra

M_i : Massa do material retido acumulado em cada peneira

II- Materiais naturais ou de aterros com predominância de solos

Para o material que foi coletado em área natural I7 e I8 e em área de aterro I1 e I9, por não apresentarem fragmentos com grandes diâmetros, foi realizado uma análise granulométrica completa para solos a NBR 7181 (ABNT, 2016).

Esse ensaio foi dividido em três etapas.

1ª etapa Sedimentação

Primeiramente, as amostras foram homogeneizadas e quarteadas. Em seguida, determinou-se a umidade do solo, utilizando 3 capsulas de alumínio, onde foi retirado aproximadamente 40g de solo, e colocado na estufa, a temperatura de 150° por 24 horas. Posteriormente, separou-se 250g de cada amostra de material, e adicionou-se 125cm³ de hexametafosfato de sódio (solução de 45,7g de hexametafosfato de sódios e foi adicionado 1000cm³ de água destilada), e deixado em repouso por 24 horas. A seguir, colocou-se a amostra no recipiente do dispersor de partículas, e completou com água destilada, e deixou dispersar por 10 minutos. Após, transferiu-se esse material para uma proveta, utilizando um funil de vidro, e adicionando água destilada até atingir a marca de 1000cm³, conforme mostrado na Figura 25. Na parte superior desse funil, utilizou-se uma peneira de abertura de 2mm, de forma a separar o material grosso. Esse material retido, foi para estufa, e retornou para etapa de peneiramento. O material que passou para proveta, possuía granulometria inferior a areia. Com isso, esse material foi agitado por 1 minuto, de forma a tornar a suspensão homogênea. A partir daí, foi iniciado o processo de medição com o densímetro, utilizando um cronômetro, fez-se as leituras nos tempos de 15s, 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1 h, 2h, 4h, 8h e 24h. Para o descanso do densímetro, utilizou-se uma proveta graduada contendo água, e também, nessa proveta um termômetro, de forma a se tomar a temperatura da água em cada medida. Após a realização da última leitura (24 horas), lavou-se o material da proveta na peneira de 200# (abertura de 0,076mm), e o material retido foi levado a estufa para a secagem.



Figura 25 Proveta contendo amostras dos materiais, para o ensaio de sedimentação

Para o cálculo dos materiais em suspensão, utilizou-se a seguinte equação, segundo NBR 7.181 ABNT (2016):

$$Q_s = \frac{N \times \delta}{(\delta - \delta_d)} \times \frac{v \delta_c (L - L_d)}{\frac{M_h}{(100 + h)} \times 100}$$

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

N : porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm

δ : Massa específica dos grãos de solo, em g/cm³

δ_d : massa específica do meio dispersor, a temperatura de ensaio, em g/cm³

V : volume da suspensão, em cm³

δ_c : massa específica da água, a temperatura de calibração do densímetro (20°C), em g/cm³

L : Leitura do densímetro em suspensão

L_d : Leitura do densímetro no meio dispersor, na mesma temperatura da suspensão.

M_h : Massa do material úmido submetido à sedimentação, em gramas

h : umidade hidrocópica do material passado na peneira de 2,0mm

Para o cálculo do diâmetro das partículas em suspensão, utilizou-se a seguinte equação:

$$d = \sqrt{\frac{1800u}{\delta - \delta_d} \times \frac{a}{t}}$$

d : Diâmetro máximo das partículas, em mm

u : Coeficiente de viscosidade do meio dispersor, a temperatura do ensaio, em g x s/cm²

a : Altura de queda das partículas, correspondente a leitura do densímetro.

2ª Etapa - Peneiramento:

Com as amostras secas, realizou-se o peneiramento nas peneiras de 4,75mm (4#); 2mm (10#); 1,18mm (16#); 0,425mm (40#); 0,150mm (100#); 0,075mm (200#), com a utilização de um agitador mecânico, conforme indicado na Figura 26. O material retido em cada peneira foi pesado de forma a gerar a curva granulométrica de cada ponto.



Figura 26 Agitador mecânico com peneiras, do Laboratório de Geociências utilizado para o peneiramento de materiais miúdos

3ª Etapa - Determinação da Massa específica:

Determinou-se a massa específica dessas amostras, pois esse valor é necessário para a etapa de sedimentação. Para essa etapa, seguiu-se as recomendações da NBR 6458 (ABNT, 2016). Primeiramente, separou-se uma amostra entre 60 a 70g. para a realização do ensaio. Cada amostra foi coberta com água destilada e deixou descansar por 12 horas; posteriormente, foi agitada no dispersor por 15 minutos e transferida para um picnômetro de 500cm³. Aplicou-se vácuo no picnômetro (Figura 27) contendo a amostra por 15 minutos, com uma pressão de 680mmHg, para a remoção das bolhas. Posteriormente, completou-se o picnômetro com água também deaerada e levou para a geladeira até atingir a temperatura de 15°C. Após isso, determinou-se a temperatura no picnômetro em 3 níveis (parte inferior, meio e parte superior do picnômetro), secando o gargalo e a parede interna com o auxílio de um algodão após obter a temperatura, e posteriormente, determinou-se a massa do picnômetro contendo as amostras de solo e água. Para esse ensaio, obteve as temperaturas na faixa de 15 a 25°C. Repetiu-se esse processo 5 vezes. Após isso, levou-se as amostras de solo e água para a estufa, determinando assim a massa de solo seco. Para a calibração, primeiramente pesou-se o picnômetro seco, depois adicionou-se água destilada até a marca, e posteriormente, determinou a massa do conjunto picnômetro mais água, e determinou a temperatura desse líquido.



Figura 27 Bomba de Vácuo utilizada para a determinação da massa específica

Para a determinação da massa específica, utilizou-se a seguinte equação:

$$\rho_s = \frac{M_1 \times 100 / (100 + w)}{(M_1 \times 100 / (100 + w)) + M_3 - M_2} \times \rho_{w(T)}$$

Onde:

ρ_s : massa específica do solo. Em g/cm³

M_1 : massa do solo úmido

M_2 : massa do picnômetro contendo solo e água, a uma temperatura T

M_3 : massa do picnômetro contendo água até a marca de referência

w: umidade inicial da amostra

$\rho_{w(T)}$: massa específica da água, à uma temperatura T

Para a classificação dos materiais naturais, utilizou-se a classificação unificada. Segundo Pinto (2006) esse sistema foi inicialmente elaborado pelo Prof. Casa Grande, principalmente para utilização em obras de aeroportos. Fez-se uso dessa metodologia devido ao fato de não ser necessário obter o índice de plasticidade (IP) das amostras com menos de 5% de finos (silte e argila). Não se determinou o índice de plasticidade devido ao fato de as amostras serem muito heterogêneas, com uma grande quantidade de pedregulhos, não sendo possível obter uma medida representativa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Nesse capítulo será apresentada uma contextualização geológico geotécnica da região, a evolução da área de estudo e de outros depósitos antropogênicos que ocorrem no entorno.

4.1.1 CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

As rochas que compõem a região de São Carlos são pertencentes à Bacia do Paraná representadas mais especificamente pelas Formações Pirambóia, Botucatu, Serra Geral do Grupo São Bento, e Itaqueri do Grupo Bauru, conforme carta de compilação de mapeamentos elaborada por Pons (2006) (Figura 28).

Segundo Hasui et al. (2012), a Formação Botucatu é constituída de arenitos provenientes de areias de dunas quartzosas, finas, com grânulos submilimétricos bem classificados. Essa formação encontra-se intercalada com os derrames basais da formação Serra Geral e lâminas de estratificação cruzada de arenitos silicificados; está estratigraficamente limitada na parte inferior pela formação Pirambóia e na superior pela formação Serra Geral. A Formação Serra Geral originou-se de uma das mais importantes efusões de lavas basálticas conhecidas na história geológica da Terra (HASUI et al., 2012). Esta unidade é uma província magmática relacionada aos derrames e intrusivas, composta por rochas vulcânicas básicas, com intrusões hipoabissais e intercalações com arenitos da Formação Botucatu (AGUIRAR, 1989).

Já o Grupo Bauru é representado em São Carlos por rochas da Formação Itaqueri (PONS, 2006). Esta Formação ocorre em discordância sobre a Formação Serra Geral e restritamente sobre a Formação Botucatu, correspondendo a depósitos areno-conglomeráticos, que ocorrem sobre as serras de Itaqueri, São Pedro, São Carlos e Cuscuzeiro, com espessura que raramente ultrapassam 30 metros, ocupando principalmente em áreas com cotas superiores a 850m (RICOMINI, 1997; PONS, 2006).

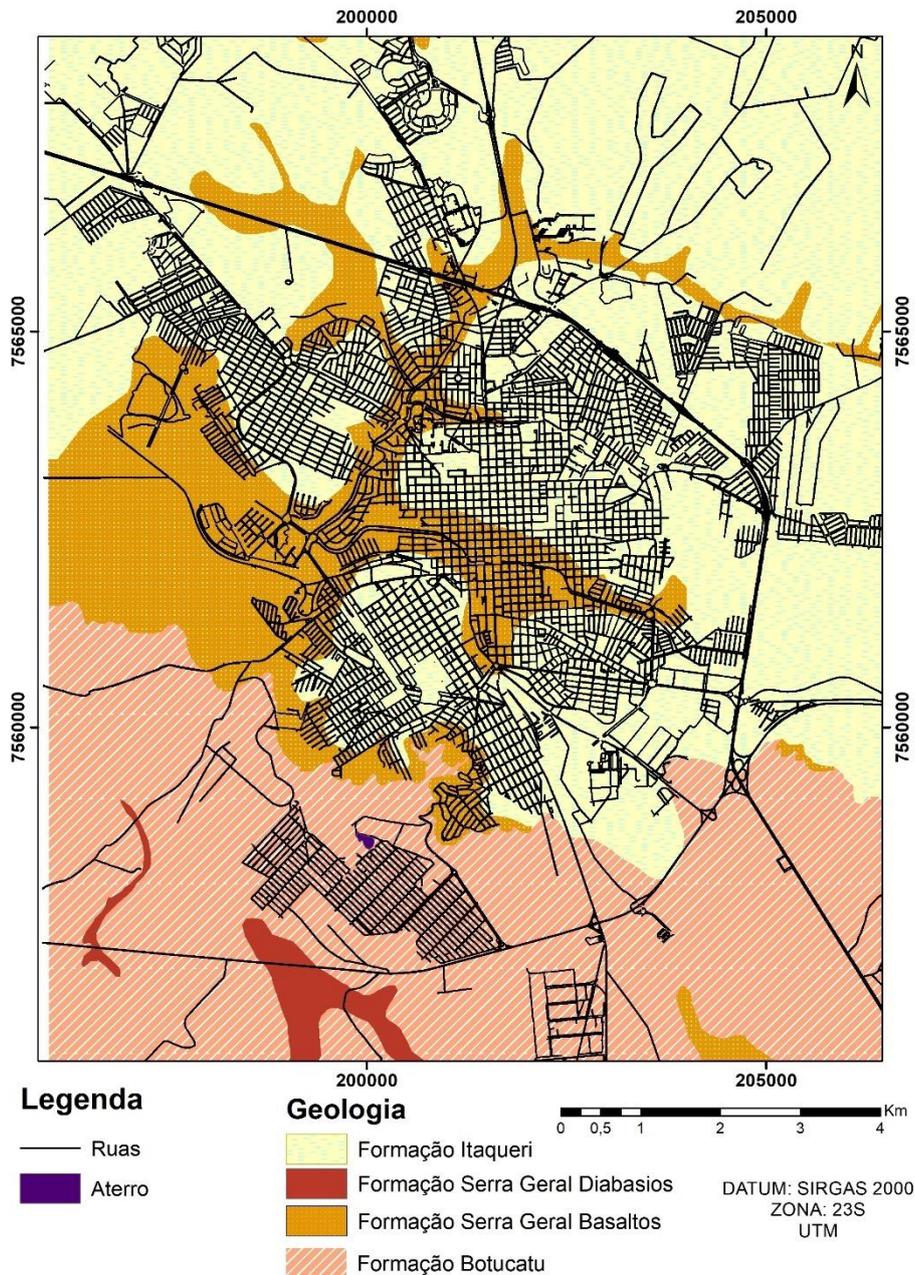


Figura 28 Mapa geológico de São Carlos- SP. Fonte: Pons (2006), modificada pelo autor.

Segundo AGUIAR (1989), na região de São Carlos-SP, ocorrem materiais inconsolidados que estão posicionados indistintamente, em discordância erosiva sobre as unidades do substrato, ou desenvolvendo perfil sobre as rochas em que são originados. Ocorrem nessa região materiais residuais: do Botucatu, dos Magmatitos básicos e do Bauru; os materiais transportados, que apresentam indício de retrabalhamento e de transporte significativo: transportados orgânicos; material arenoso I, onde predominam materiais da Formação Botucatu; Material Arenoso II, que se trata da unidade situada nas áreas de ocorrência do arenito Botucatu, nas proximidades dos magmatitos básicos;

Material Arenoso III, relativamente fino, que sofreu influência de todas as unidades geológicas da região; material aluvionar formado pela sobreposição de camadas de materiais muito recentes; material coluvionar dos magmatitos Serra Geral e material coluvionar do arenito Botucatu.

No entorno da área de estudo, tem-se a ocorrência dos materiais inconsolidados transportados arenoso I, como indicado na Figura 29 e estes materiais, embora não visíveis em superfície, são os que embasam o aterro de resíduos de construção civil.

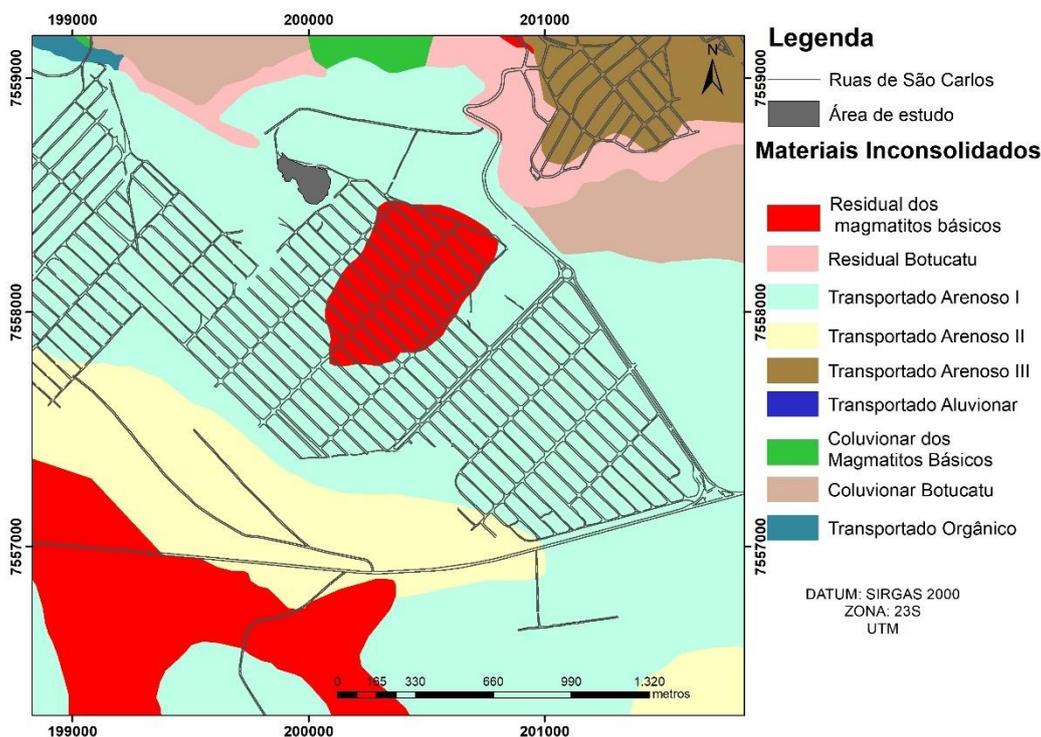


Figura 29 Mapa de materiais inconsolidados do bairro Cidade Aracy, São Carlos – SP. Fonte: Aguiar (1989), modificada pelo autor.

4.2 EVOLUÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada em uma região que apresenta diversos problemas referentes à intervenção humana no meio ambiente. Está próxima da “antiga entulheira do Aracy”, local que por longos períodos de anos recebeu diversos tipos de entulhos de todo o município de São Carlos e atualmente se encontra interditada.

Ao lado do aterro de resíduos de construção civil, há uma área foi por muitos anos um local de extração de areia. Ainda que essa informação não esteja registrada em nenhum documento encontrado (há citação na recusa da Licença de Operação da

CETESB para o aterro), existe ainda no local o legado desta extração, como presença de marcas de escavação, uma área alagada e pilhas de rejeito, que ainda estão preservadas. Sobre essa área, tem-se a seguinte informação (SILVA LEME ENGENHARIA, 2010, p. 4):

Nestes pontos observa-se que o Córrego da Água Quente acabou desviando-se do seu leito original, aproximando-se da área de extração de areia. Devido à fraca coesão característica do solo local, observa-se alguns trechos de margens erodidas.

De acordo com informações fornecidas por um Ex-diretor de Meio Ambiente do Município de São Carlos, pelo responsável técnico da Silva Leme Engenharia e pelo relatório técnico (SILVA LEME ENGENHARIA, 2007), para a implantação de aterros para as obras de construção das vias do bairro Cidade Aracy, foi retirada grande quantidade de solos da área de estudo, gerando assim a abertura de uma cava (Figura 30).

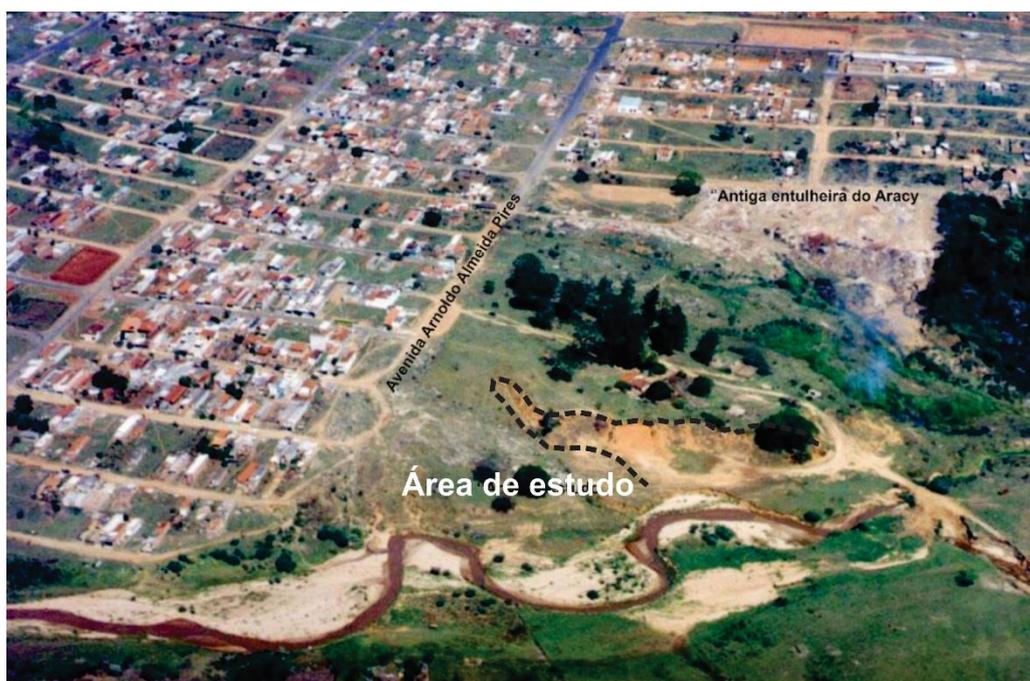


Figura 30 Foto histórica da área de estudo, de 2007, mostrando a área escavada, a "entulheira do Aracy", o Córrego da Água Quente. Foto fornecida pela Silva Leme Engenharia, modificada pelo autor.

Devido ao fato da área de estudo se localizar próximo a residências, mas também fora da vista de moradores, iniciou-se clandestinamente nessa área o processo de deposição de resíduos de entulho, lixo doméstico, podas de árvores, entre outros.

Na Figura 31, é possível observar o início da abertura da cava, que futuramente se transformou na área de aterro. A abertura da cava se ocorreu devido a necessidade da extração de solos para servir de aterro para outras áreas. Nas proximidades do aterro, é

também possível observar muitas feições de erosão. Esse fato pode ter sido decisivo para a escolha dessa área para a remoção de solos, uma vez que uma cava já havia sido iniciada nesse local.

Ocorria também, próximo na área de estudo, na parte superior, uma chácara (Figura 31) que possuía uma área para a criação de animais e um lago. Atualmente, todas as instalações dessa chácara encontram-se demolidas.



Figura 31 Imagens históricas, tirada durante o ano de 2007, mostrando na parte superior da imagem uma chácara na área de estudo, e a presença de entulhos. Foto cedida pela Silva e Leme Engenharia

No ano de 2006, com a Lei 13.919 (SÃO CARLOS, 2006), essa área, de aterro de resíduos de construção civil, ora denominada de “desmembrado Sítio dos Cocais” ora ‘Gleba remanescente’ foi doada para a PROHAB, com matrícula nº 115.035, para o loteamento de interesse social.

Com a interdição da “antiga entulheira do Aracy”, área que recebia entulhos na cidade de São Carlos, a área de estudo passou a ser o local onde esses resíduos passaram a ser depositados. Com isso, as pilhas de resíduos começaram a crescer gradativamente, gerando um grande depósito antropogênico, conforme mostrado nas Figuras 32, 33 e 34.



Figura 32 Fotografias de 2007 mostrando entulhos depositados na área de estudo. Cedida pela Silva Leme Engenharia



Figura 33 Fotografias de 2007 mostrando os entulhos depositados na área de estudo. Cedida pela Silva Leme Engenharia



Figura 34 Fotografias de 2007, mostrando os entulhos depositados na área de estudo. Cedida pela Silva Leme Engenharia

No relatório técnico de projeto para a área do aterro de resíduos de construção civil, durante o ano de 2010, de forma a reduzir os possíveis impactos ambientais que esse empreendimento pudesse causar, foi proposto pela Silva Leme Engenharia (SILVA LEME ENGENHARIA, 2010, p. 10), as seguintes soluções para a estrutura do aterro:

- Portão e cancela na entrada da área, com a finalidade de controlar a entrada de veículos no local.
- Container e toldo, com instalação de água, luz e esgoto, dando mais conforto aos funcionários que atuarão no aterro. Optou-se pelo container por se tratar de uma estrutura provisória e de fácil transporte.
- Cercamento da área. Este cercamento terá início na divisa com a creche e irá até a estação elevatória do SAAE. Este cercamento será feito com mourões de concreto e gradil metálico e terá altura de 2,0m.

- Acesso interno do aterro feito com RCD moído em graduação nº 3. Este material pode ser obtido junto à PROHAB de São Carlos, e é uma alternativa ecologicamente melhor que o uso de pedra britada.
- Pátio para equipamentos e máquinas. Local reservado para o estacionamento de máquinas do aterro e eventuais caminhões que eventualmente necessitem aguardar no local.
- Aterro de RCD. Como já foi salientado anteriormente, o material a ser aterrado deverá ser selecionado de forma a garantir que só resíduos inertes e tipicamente oriundos da construção civil (solo, tijolos, cimentos, etc.) sejam colocados no local. Ao se atingir a configuração superficial sugerida em projeto, o aterro será finalizado com a execução de camada de solo de boa qualidade, com 30 centímetros de espessura. Ao final da cobertura, será realizado plantio de sementes de braquiária.
- Para evitar futuras erosões no local, está previsto a execução de uma canaleta trapezoidal de 75x25cm, que captará as águas pluviais na parte alta do aterro e as conduzirão até uma escada hidráulica. Esta escada será ligada a uma rede de tubos de concreto armado de diâmetro Ø600mm, que conduzirão as águas até outra escada hidráulica, e pôr fim a um dissipador que lançará as águas pluviais de forma controlada ao Córrego da Água Quente.

No ano de 2011, iniciou-se, em uma parte da área de estudo, a construção de uma creche (C.E.M.E.I. Dário Rodrigues), que se encontra em funcionamento até os dias de hoje. Do lado direito da área, próximo à margem do Córrego da Água Quente, foi construída uma estação elevatória, com o objetivo de bombear o esgoto do bairro até a estação de tratamento da cidade. Tem-se o seguinte sobre o local de instalação da estação elevatória (SILVA LEME ENGENHARIA, 2010, p.3):

Segundo projetos do SAAE, a nova rede coletora do bairro passará atrás da creche, e próxima da área da antiga extração de areia, onde em um determinado ponto ela será desviada para a rua, seguindo para a estação elevatória. A rede teve que tomar este caminhamento, pois durante investigações geotécnicas averiguou-se que na Av. Arnaldo Almeida Pires, em trecho que fica em frente a futura creche, a rede teria que passar por uma camada rochosa que inviabilizaria o Projeto.

A Figura 35A mostra o local no ano de 2010, onde posteriormente (2015) foi instalado o emissário de esgoto Figura 35B.

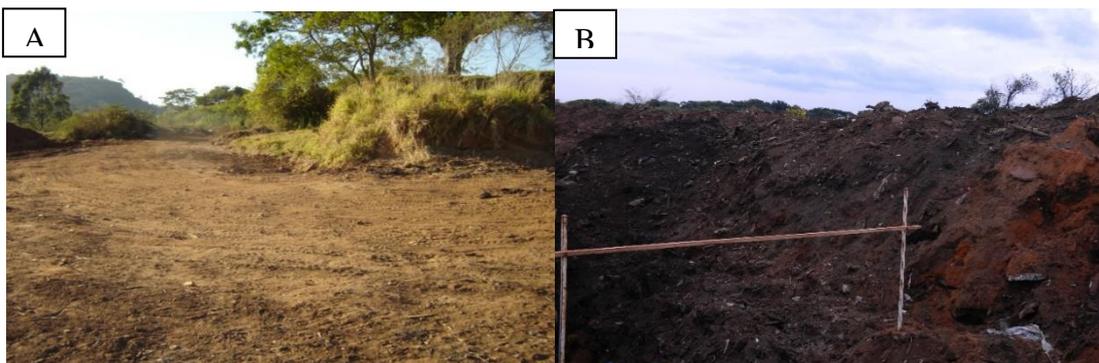


Figura 35 (A) Foto histórica da área de estudo. Local onde estava prevista a instalação da adutora. Fonte: SILVA LEME ENGENHARIA (2010) e(B) a obra para implantação desta adutora, no ano de 2015. Autora: Denise Menezes

A área passou por licenciamento junto à CETESB. Em 06 de setembro de 2011, a Prefeitura Municipal de São Carlos, entrou com um pedido na CETESB para obtenção da licença prévia. Essa licença foi emitida na data de 20 de dezembro de 2011, com número do processo 74/00215/11 e número do documento 73000054.

Foi realizado o pedido a CETESB da licença de instalação na data de 26 de dezembro de 2011. Essa licença obtida a licença de instalação para a área do aterro na data de 04 de junho de 2012, com número do processo 74/00215/11 e número do documento 73000054. Nessa licença, consta as seguintes exigências para serem aplicadas na área de resíduos de construção civil:

01. Somente poderão ser aterrados resíduos de construção civil classificados como Classe A de acordo com a Norma NBR15113 "Resíduos de Construção Civil e Resíduos Inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação".
02. Deverão ser mantidos os acessos internos e externos de maneira a permitir a utilização da área em qualquer época do ano e sob quaisquer condições climáticas.
03. Deverão ser implantadas medidas de restrição ao acesso à área do aterro de modo a impedir a entrada de pessoas não autorizadas.
04. Deverá ser implantada adequada sinalização de identificação na entrada do empreendimento.
05. Deverá ser implementado treinamento adequado dos funcionários incluindo pelo menos: a forma de operação do aterro, com ênfase na operação desenvolvida pelo indivíduo e os procedimentos a serem adotados em

casos de emergência.

06. Deverá ser implantado plano de inspeção e manutenção envolvendo os sistemas de drenagem, estabilidade

do aterro, dispersão de material particulado e ruídos e segurança operacional para operadores e instalações.

07. Os resíduos recebidos deverão ser previamente triados, na fonte geradora, em áreas de transbordo e

triagem ou em áreas de triagem no próprio aterro, de modo que sejam dispostos apenas resíduos de construção

civil classe A ou resíduos inertes.

08. É proibida a queima de resíduos ou quaisquer outros materiais ao ar livre.

09. Controlar a emissão de poeira para a atmosfera de modo a não permitir a dispersão para fora dos

limites de propriedade do empreendimento.

10. Instalar poços de monitoramento das águas subterrâneas, sendo, no mínimo, um poço a montante e três

poços a jusante da área do empreendimento considerando-se o fluxo preferencial das águas subterrâneas, e implantar o plano de monitoramento das águas subterrâneas proposto no processo 73/0021.

Essa licença continha as observações que o empreendimento deveria funcionar após a obtenção da licença de instalação, e que deveria ser cumprido integralmente o termo de compromisso de recuperação ambiental.

No dia de junho de 2012, foi realizado o pedido da licença de operação. No dia 04 de outubro de 2017, esse pedido foi indeferido pela CETESB, afirmando os seguintes motivos:

Por falta de operação, manutenção adequada, isolamento da área e equipe de vigilante o local transformou-se em um vazadouro de resíduos de diversas naturezas, objeto de Ação Civil Pública do Ministério Público de São Paulo e de autuações da CETESB. Atualmente foram firmados compromissos de recuperação da área degradada e monitoramento das águas subterrâneas. Conforme verificado em vistoria datada de 05/5/2017 o aterro não está recebendo resíduos da construção civil por estar com a vida útil exaurida.

Na Figura 36, tem-se a placa na entrada do aterro, em 2015, já paralisado, com os tipos de resíduo que poderiam ser ali recebidos.



Figura 36 Foto da entrada do aterro de resíduos de construção civil, no ano de 2015. Autora: Denise Menezes

Atualmente, dentre as diretrizes que foram aplicadas na área de estudo (SILVA LEME ENGENHARIA, 2010), o cercamento de parte da área foi realizado, sendo que, atualmente, essa cerca já foi desmanchada, fazendo com que a área tenha livre acesso, para qualquer tipo de veículo. O aterro tem recebido diversos tipos de resíduos, não apenas os de classe A derivados de construção civil.

Não existe funcionários, tornando o local de livre acesso para a população, sendo comum, quase diariamente, a presença de caminhonetes e pequenos caminhões, que fazem o despejo de entulhos de diversos tipos na área de estudo. No projeto inicial, estava previsto um container e toldo, com instalação de água, luz e esgoto, dando mais conforto aos funcionários que atuarão no aterro, mas na prática não existe nenhum funcionário, ou mesmo estrutura no local. Fato esses que culminaram com o processo de indeferimento do pedido de licença de operação na CETESB.

O local de aterro foi projetado para, após atingir a configuração inicial, ou seja, a forma que o terreno possuía antes da escavação, ser finalizado com uma camada de solo de boa qualidade com uma espessura de 10cm. Com isso, tem-se um depósito ainda mais heterogêneo, sendo uma combinação de solos, pedregulhos, artefatos, e diversos outros tipos de entulho. Como também previsto no projeto inicial, não existe no local uma canaleta de forma a captar as águas pluviais na parte alta do aterro e as conduzirão até uma escada hidráulica, de forma a lançar essas águas pluviais de forma controlada no Córrego da Água Quente. Isso poderia evitar a perda de solo devido a corrida de águas superficiais, reduzindo assim as taxas de erosão.

4.3 EVOLUÇÃO DAS ALTERAÇÕES NA ÁREA COM USO DE ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS

De acordo com informações do Ex-coordenador de meio ambiente do município de São Carlos - SP e do funcionário da Empresa Silva Leme Engenharia, responsável técnico pela instalação do aterro, ao lado da área de estudo já foi um local de extração de areia para a construção civil. Mas não foi possível determinar ao certo quando foi iniciada essa exploração, nem a data do término. Na Figura 37 é possível ver a morfologia do terreno, através das curvas de nível, antes da ocupação antrópica.

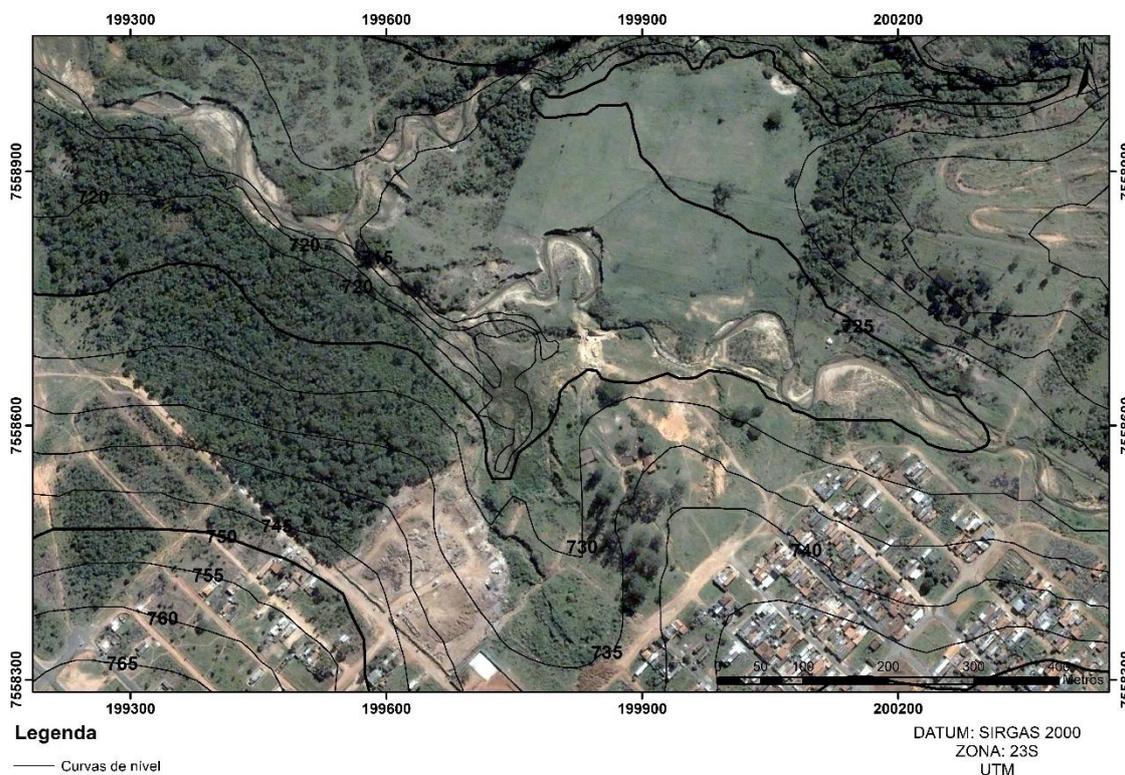


Figura 37 Curvas de nível da área de estudo, no ano de 1989, na escala de 1:10.000, com curvas de nível de 5 em 5 metros. Fonte: IGC (1989) e Google Earth, 30 de junho de 2004.

Já na Figura 38, é possível ver a morfologia do terreno da área estudo e do entorno, antes da instalação do aterro, durante o ano de 2004, em que as atividades minerárias já haviam sido encerradas. Nessa imagem é possível ver o início da abertura de uma cava, que futuramente se tornou a área aterrada. Encontra-se nessa imagem, uma área que por anos foi minerada para a extração de areia, restando atualmente as pilhas de rejeito dessa exploração.



Figura 38 Imagem de satélite do local de estudo e áreas antropizadas vizinhas. Ano de 2004. Fonte: Google Earth, 30 de junho de 2004, modificada pelo autor.

A área que se localiza a esquerda da cava do aterro, é conhecida como “antiga entulheira do Aracy”. Por anos, esse local recebeu resíduos de diversos tipos, e atualmente se encontra interdito, não sendo permitida a entrada de pessoas, devido riscos à saúde.

Na cava do aterro, após o ano de 2004, foi intensificada a remoção de solo. Esse material removido serviu de substrato para as obras de pavimentação do bairro Cidade Aracy. Concomitantemente com a remoção, no ano de 2010, também foi intensificada a deposição de resíduos na cava. Com isso, nesse período, a área escavada possuía a forma indicada na Figura 39.

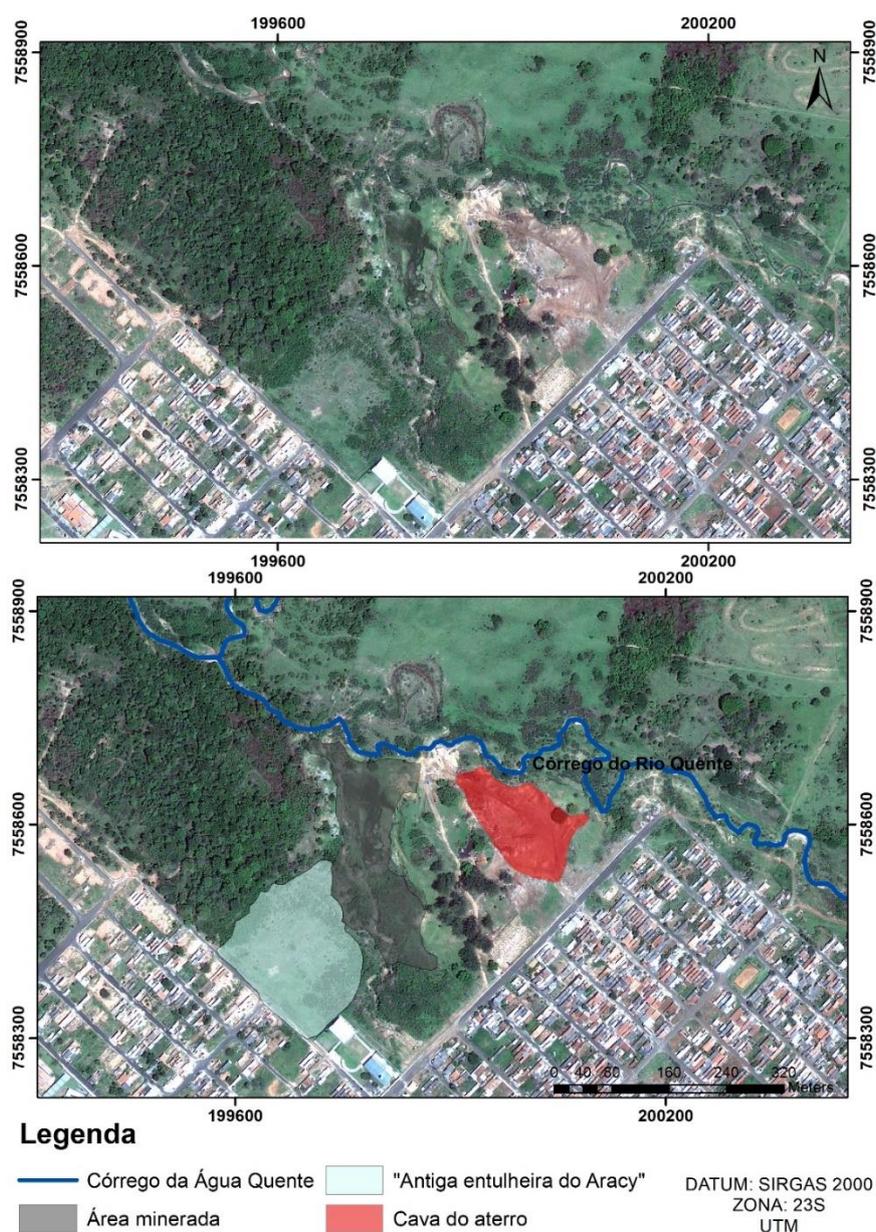


Figura 39 Forma do terreno da área de estudo no ano de 2010. Fonte: Google Earth, 18 de out. de 2010, modificada pelo autor.

A Figura 40 mostra a morfologia do terreno da área de estudo durante o ano de 2010, quando já estava em curso o projeto do aterro. Nesta figura, é possível ver que, a região Sul do mapa possui uma maior elevação, quando comparada com a região Norte. É possível observar também que, na região oeste do mapa, tem a presença de um talude com alta declividade, local onde o solo foi removido.

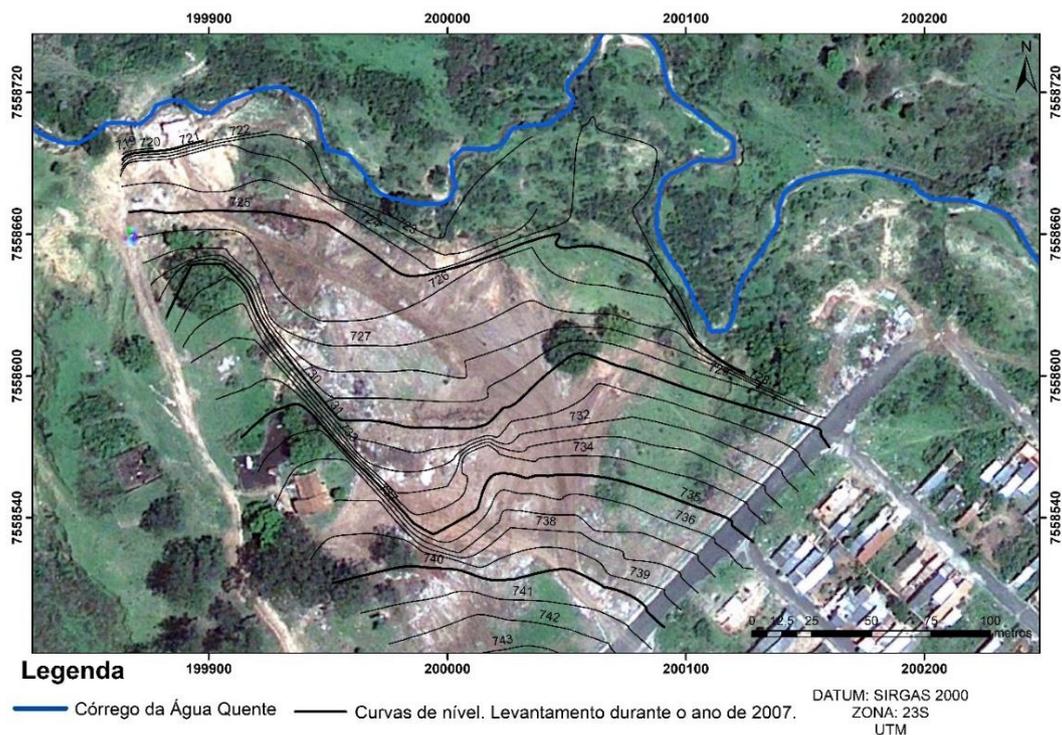


Figura 40 Levantamento topográfico da área escavada no local de estudo. Levantamento realizado durante o ano de 2010, na escala 1:1.500, e curvas de nível de 5 em 5m. Fonte: mapeamento topográfico fornecido pela Empresa Silva Leme Engenharia, realizada em junho de 2010; Google Earth, 18 de out. de 2010, modificada pelo autor.

No ano de 2011, as escavações na área de estudo continuaram, e como resultado tem o alargamento da cava do aterro, como indicado na Figura 41. Concomitantemente com as escavações do terreno, ocorreu a deposição de resíduos sólidos de diversos tipos, como resíduos de construção civil (tijolo, concreto, resto de cimento, argamassa, azulejo e outros), areia, cascalho, madeiras, lixo doméstico, podas de jardim, entre outros. Isso ocorreu devido ao fato que o antigo depósito de resíduos conhecido como “antiga entulheira do Aracy” foi interdito, e a área de estudo passou a receber os resíduos de diversos lugares da cidade de São Carlos.

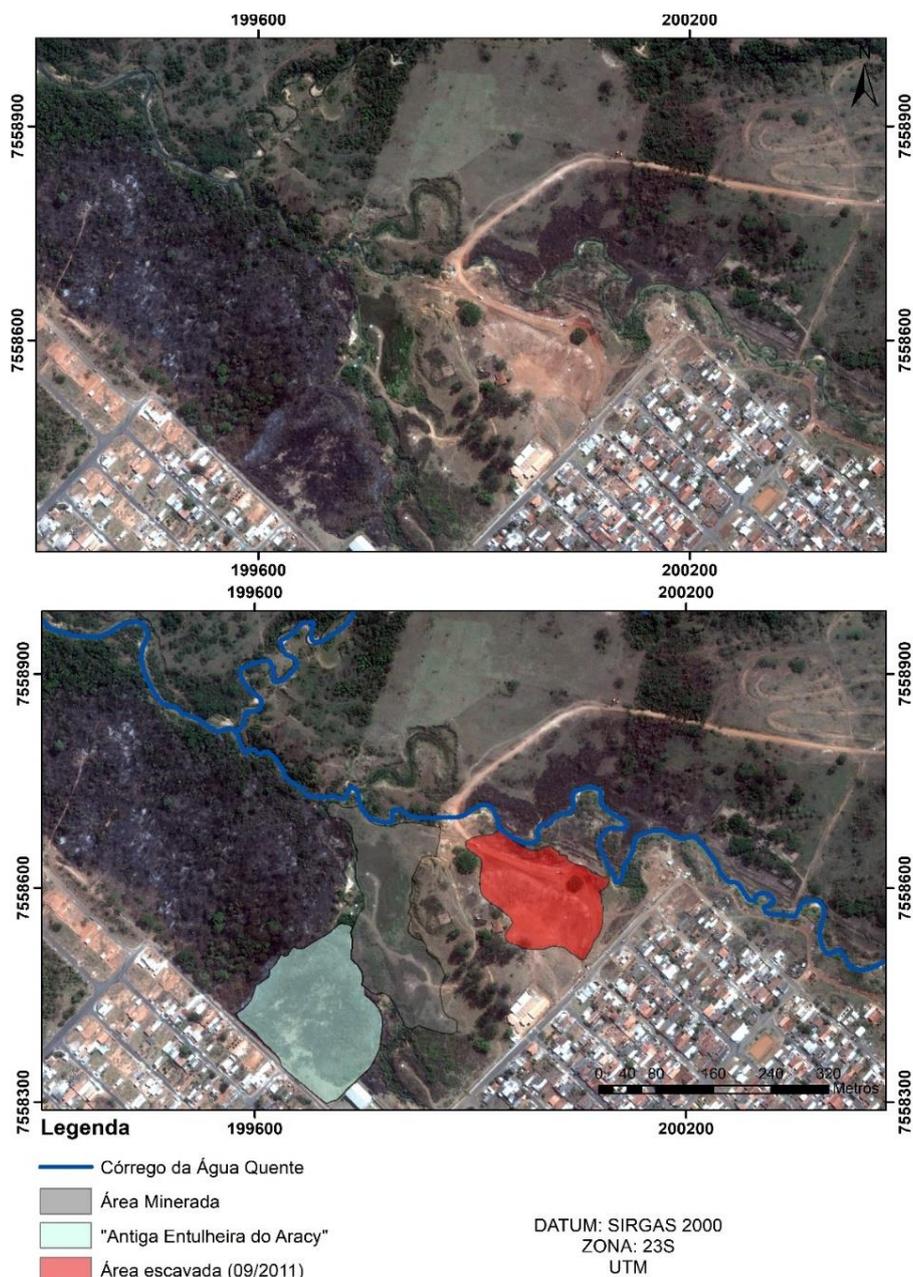


Figura 41 Área escavada durante o ano de 2011. Fonte: Google Earth, 1 de jun. de 2011, modificada pelo autor.

Na Figura 42, é possível ver as diversas pilhas de rejeitos depositadas na área de estudo, durante o ano de 2012. Nessa imagem observa-se que a cava da área do aterro não teve um aumento considerável, possuindo aproximadamente o mesmo tamanho que possuía durante o ano de 2011.

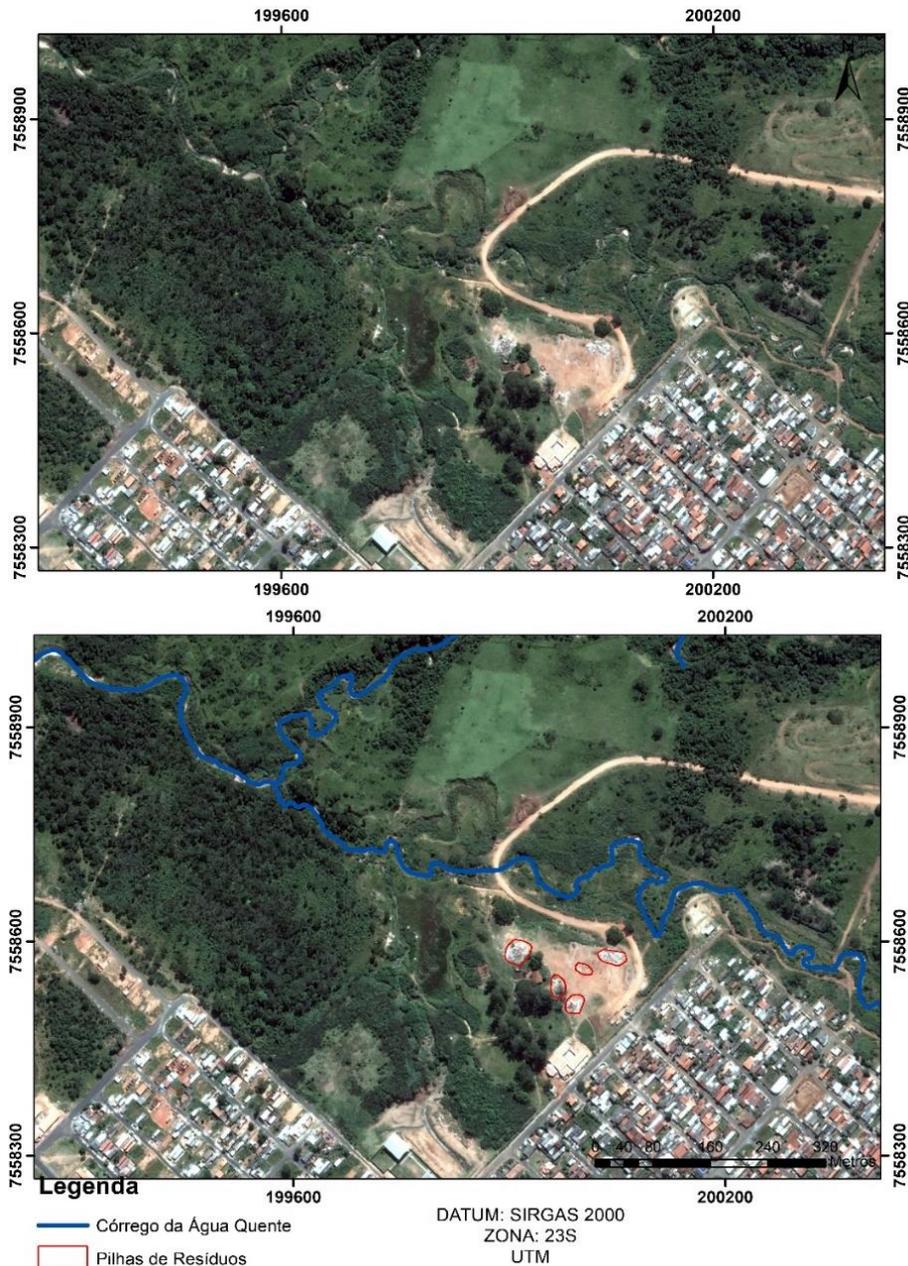


Figura 42 Foto indicando a presença de pilhas de rejeito, durante o ano de 2012. Fonte: Google Earth, 1 de abril de 2012, modificada pelo autor.

Durante o ano de 2013, a área escavada se tornou maior, quando comparada com os anos anteriores. É possível ver também, no interior da cava, uma maior quantidade de resíduos, com uma maior concentração na região central (Figura 43). Na região Norte do mapa é possível ver o início da exploração de areia para a construção civil, gerando um outro tipo de depósito antropogênico.

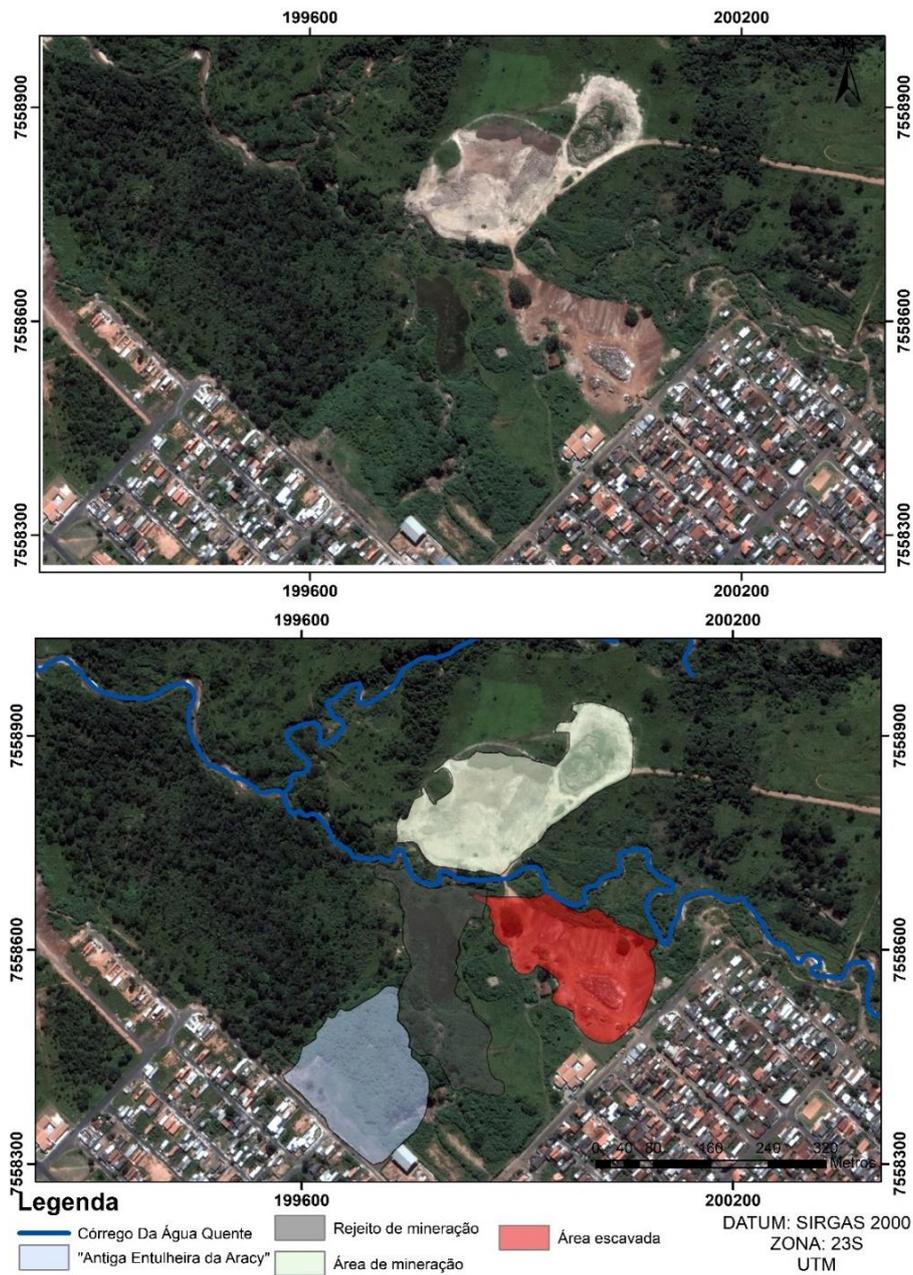


Figura 43 Área de estudo durante o ano de 2013. Aumento da área escavada e presença de exploração de areia na região norte do mapa. Fonte: Google Earth, 16 de abril de 2013, modificada pelo autor.

Esses resíduos depositados foram aterrados, e a área do aterro foi consolidada, conforme mostrado na Figura 44. A área de mineração a Norte do mapa encerrou sua produção, restando apenas os rejeitos nessa área.

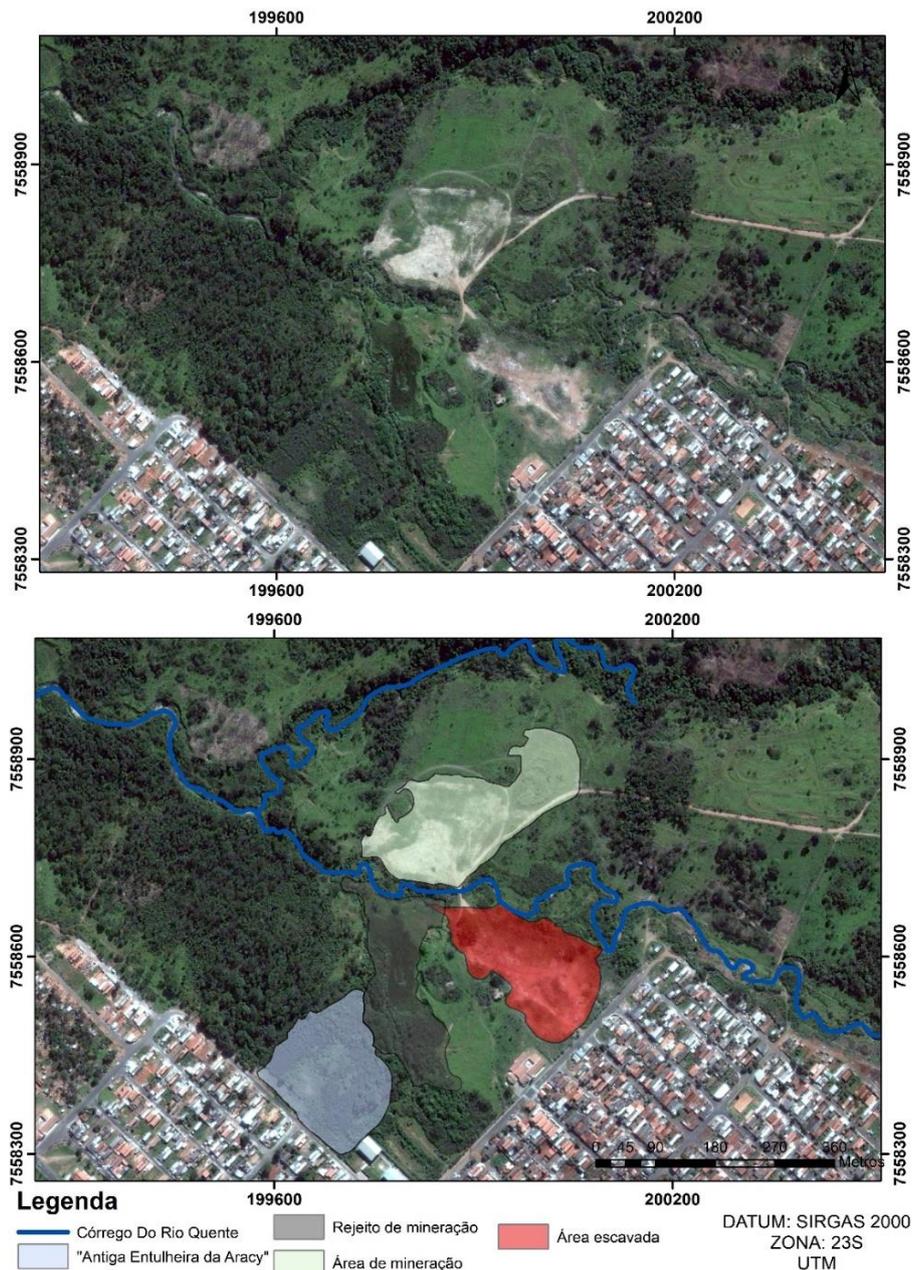


Figura 44 Fechamento da cava, com a deposição de resíduos, durante o ano de 2014. Fonte: Google Earth, 9 de maio de 2014, modificada pelo autor.

No ano de 2018, a área de estudo e o entorno se encontram conforme indicado na Figura 45, em que é possível ver a presença de uma vegetação rasteira sobre os resíduos de construção civil. A área de mineração, no Norte do mapa, também encerrou sua atividade, restando apenas um lago, gerado de forma antropogênica, e os resíduos dessa exploração.



Figura 45 Forma atual da área de estudo. Fonte: Google Earth, 21 de maio de 2018.

Estas áreas e sua descrição serão apresentadas na sequência.

4.4 FORMAÇÕES NATURAIS, DEPÓSITOS E FEIÇÕES ANTROPOGÊNICOS

No mapeamento de depósitos antropogênicos nas regiões no entorno da área de estudo (aterro de resíduos de construção civil), foram identificados diversos tipos de depósitos, gerados de forma direta (alteração do meio ambiente de forma direta, com a deposição ou alteração dos materiais) e feições indiretas, que não geram um depósito antropogênico, mas sim características que as diferem de terrenos naturais, como a elevação das taxas de erosão, alterações na paisagem devido à remoção de materiais, entre outros, dando caráter relevante ao estudo de depósitos.

Conforme indicado na Figura 46, na região do aterro de resíduos de construção civil RC1 (área de estudo), tem-se os seguintes depósitos antropogênicos: resíduos superficiais - RS; área de aterro RC2; e áreas mineradas de areia RM1 e RM2. Como feições indiretas, ocorre erosão e a presença de lançamento de esgoto - ES que contamina água e sedimentos no Córrego da Água Quente.

Como materiais naturais ocorrem na área de estudo afloramentos de arenito silicificado da Formação Botucatu e materiais inconsolidados transportados arenoso I (Aguiar, 1989).

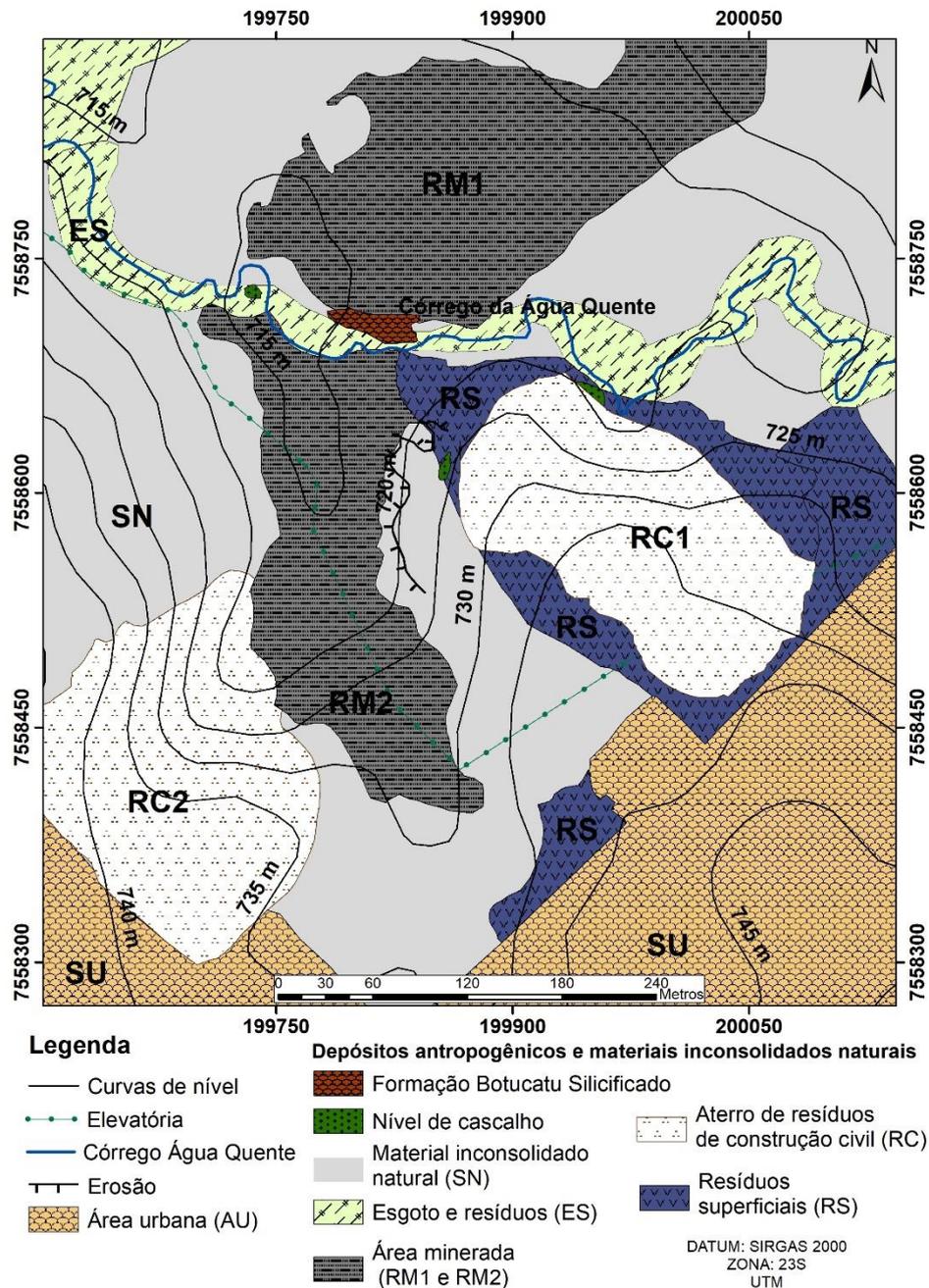


Figura 46 Carta de intervenções antrópicas e solos naturais da área de estudo. Curva de nível obtidas pelo satélite Alos Palsar de 2011. Fonte: (OLIVEIRA; MENEZES, no Prelo)

4.4.1 DESCRIÇÃO DOS DEPÓSITOS NA REGIÃO

4.4.1.1 Áreas mineradas

Existe na região de entorno da área de estudo, dois locais distintos com feições de áreas de mineração, que foram formados devido à exploração. Embora não se tenha essa informação oficial, existem no local pilhas de rejeito, marcas de escavação, áreas alagadas. Na área minerada RM2, ocorre uma área alagada (Figura 47) e diversas pilhas de rejeito (Figura 48). Atualmente, esta área se encontra vegetada. Já na área minerada RM1, tem-se além da presença das pilhas de rejeito, um lago antropogênico, com a presença de alguns poucos resíduos, como restos de construção civil e lixo doméstico.



Figura 47 Área alagada no local minerado RM2 (ponto C26).



Figura 48 Área de rejeitos de mineração (ponto C27).

Essas áreas, podem ser classificadas, de acordo com Peloggia et al. (2014) como Terreno antropogênico/tecnogênico de degradação, com cicatrizes construídas, terreno escavado.

4.4.1.2 Área de aterro de resíduos RC2

A área de aterro RC2, local denominado popularmente de “antiga entulheira do Aracy”, recebeu por anos diversos tipos de resíduos, sendo o material predominante os resíduos de construção civil. Atualmente, é considerada área contaminada e está interdita pela CETESB.

Pode ser classificada (PELLOGIA et al., 2014) como terreno tecnogênico misto, complexo, aterro alterado por efluentes.

4.4.1.3 Lançamento de efluentes no córrego da água quente

No Córrego da Água Quente, ocorre o lançamento esgoto, alterando a coloração da água e dos sedimentos (Figura 49), e causando mau odor nas regiões do entorno. Existe no local a presença de uma estação elevatória, mas que não funciona.



Figura 49 Córrego da Água Quente, coloração alterada devido ao lançamento de efluentes.

O lançamento de efluentes no Córrego da Água Quente, não se configura como um depósito antropogênico, mas sim como um terreno antropogênico, onde a ação humana não gerou nenhum tipo de depósito, mas sim alterações no terreno. De acordo com a classificação de Peloggia et al. (2014) pode ser classificado como Terreno antropogênico/tecnogênico modificado, com horizontes quimicamente alterados.

4.4.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DA ÁREA DE ESTUDO

4.4.2.1 Formação Botucatu – arenito silicificado

Tem-se no limite norte da área, na calha do Córrego da Água Quente, afloramentos de arenito silicificado da Formação Botucatu. Nesse local, a rocha se encontra bem preservada, com baixíssimo grau de alteração. Apresenta estratificação cruzada acanalada, conforme pode ser visto na Figura 50.



Figura 50 Afloramento da Formação Botucatu Silicificado.

4.4.2.2 Materiais inconsolidados transportados

Sobre o arenito silicificado ocorrem materiais inconsolidados transportados, classificados por Aguiar (1989) como arenoso I, predominantemente de origem da Formação Botucatu, apresentando coloração amarela (Figura 51), granulometria areia fina a média, bem selecionada, com pouca coesão.



Figura 51 Solos residuais da Formação Botucatu.

Em perfis geológicos dos piezômetros realizados nesse local no ano de 2007 (SILVA LEME ENGENHARIA, 2007), observou-se os materiais naturais no topo e na base. No PMA (Figura 52) localizado na parte alta da área, há a presença de areia fina siltosa, pouco argilosa até a profundidade de 1m e após areia fina e média siltosa, com presenças pontuais de arenito silicificado. No PMB, 14 metros mais baixo, localizado próximo ao córrego da Água Quente, tem-se a presença de areia fina a média siltosa.

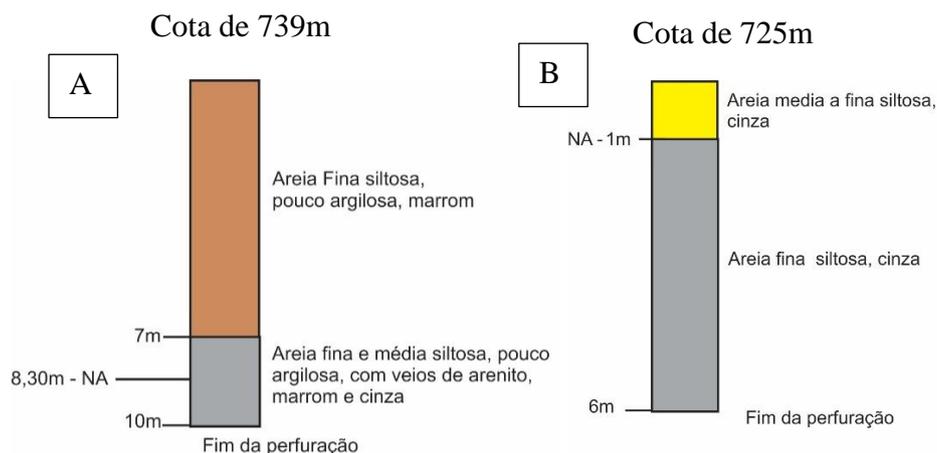


Figura 52 Perfil do poço piezométrico do poço PMA(A) e PMB (B). Fonte: (SILVA LEME ENGENHARIA, 2007).

Tem-se na também a presença, em alguns cortes do terreno, de linhas de seixos de quartzo, com granulometria variando de areia fina a cascalho (Figura 53), mal selecionado, assemelhando-se muito a um depósito aluvionar. A coloração, granulometria e estrutura diferem dos residuais arenosos 1. Os seixos maiores possuem diâmetro em média de 1cm. Esses níveis de cascalhos ocorrem em locais distintos, sendo observados em dois pontos na área de estudo, já próximo ao contato com os arenitos da Formação Botucatu. Em um primeiro local, próximo ao ponto C28, tem-se um solo bastante desenvolvido na superfície, passando para solo de alteração, até chegar ao saprolito. Não foi possível observar a rocha sã.



Figura 53 Linha de seixos de quartzo.

Próximo ao Córrego da Água Quente, no ponto C2, pode-se observar a presença deste tipo de material, com níveis de cascalho, em algo que provavelmente se assemelha a um antigo canal do Córrego ou de um afluente, conforme pode ser visto na Figura 54.



Figura 54 Perfil, mostrando o contato entre o nível de cascalho e os solos residuais da Formação Botucatu.

Como não foi feita uma comparação com outros locais de ocorrência do material transportado Arenoso I (Aguiar, 1989), a correlação destes afloramentos com a base ou com outro depósito de canal fica prejudicada.

Segundo Aguiar (1989), os materiais Arenoso I apresentam uma baixa quantidade de finos ($< 0,074\text{mm}$), sendo que raramente ultrapassam os 15%, apresentando como faixa dominante a areia de fina a média. Ocorrem materiais francamente arenosos, homogêneos em suas características físicas, químicas e mecânicas, apresentando coloração amarelada, com os finos dando uma tonalidade avermelhada. Esse autor afirma também que, esses materiais, assim como os residuais da Formação Botucatu, são fontes de areia para a construção civil.

4.4.2.3 Depósito antropogênico formado por aterro de resíduos de construção civil

O aterro de resíduos de construção civil, que representa a área de estudo, é local onde foram depositados a maior parte dos resíduos, e é representado pela sigla RC1 na carta da Figura 55. As pilhas de resíduos depositados podem ser vistas conforme indicado na Figuras 56, com a área de aterro já consolidada.



Figura 55 Resíduos na área de aterro.



Figura 56 Resíduos na área de aterro.

Devido a esses resíduos estarem aterrados, tem-se a formação de camadas de solo antropogênico, com a presença de diversos artefatos, característicos de solos urbanos, conforme indicado na Figura 57, onde é possível ver pedaços de plástico, blocos de concreto, pedaços de tijolo, entre outros.



Figura 57 Presença de artefatos na camada de aterro.

De acordo com a classificação proposta por Peloggia et al. (2014), para depósitos antropogênicos, esse local pode ser classificado como: Terreno antropogênico/tecnogênico de agradação, com depósitos antropogênicos/tecnogênicos sobre terrenos naturais e escavados, depósitos construídos ou preenchidos

Essa classificação se dá devido ao fato que a área primeiramente foi escavada, e posteriormente, retrabalhada, com a deposição de resíduos sólidos. Foram depositados nessa área resíduos como: restos de construção civil em geral, como tijolos, concreto, telhas, areia, cimento, argamassa, blocos de pedras, azulejos, entre outros; lixos domésticos; papelão; madeira; podas de arvores e jardins; garrafas pet; entre outros.

4.4.2.4 Resíduos superficiais

A área em que os resíduos se encontram apenas superficialmente representa o local onde não houve escavação, e os resíduos foram depositados sobre solos naturais. Foram depositados ao longo dos anos, os mesmos tipos de resíduos que foram depositados no local de aterro, conforme mostrado na Figura 58.



Figura 58 Área de resíduos depositados apenas superficialmente.

Os locais com resíduos superficiais apresentam um problema ambiental relativamente menor, quando comparado com a área aterrada, apenas devido ao fato desses resíduos encontrarem apenas superficialmente. Em geral, essas camadas apresentam uma espessura de aproximadamente 60cm.

Essa área pode ser classificada segundo a proposta de Peloggia et al. (2014), da seguinte forma: Terreno antropogênico/tecnogênico de agradiação, depósitos construídos de primeira geração.

4.4.2.5 Processos erosivos

Em áreas de material inconsolidado natural, devido ao fato da sua baixa compactidade, ocorrem diversos problemas com carreamento de materiais superficiais, provocando princípios de processos erosivos concentrados, como pode ser visto na Figura 59A. Como o material é pouco coesivo, as margens do Córrego da Água Quente são facilmente erodidas, como pode ser visto na Figura 59B.



Figura 59 (A) Início de processos erosivos e (B) Margens do Córrego da Água Quente, pouco coesivas, ocasionando processos erosivos.

A classificação dos processos erosivos, segundo Peloggia et al. (2014), fica da seguinte forma: Terreno antropogênico/tecnogênico de degradação, com cicatrizes tecnogênicas induzidas, erodido.

As unidades naturais e os depósitos antropogênicos da área de estudo foram amostrados e ensaiados buscando-se definir formas de obter suas características geológico-geotécnicas por meio de ensaios diretos e indiretos que possam ser utilizados em outros locais de depósitos antropogênicos.

4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.5.1 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

Na linha 1, as áreas circuladas RC, como pode ser visto na figura 1, representam áreas de elevada resistividade. Por serem rasas, atingindo uma profundidade máxima de 10 metros, representam locais que foram aterrados com resíduos de construção civil, que são materiais mais resistivos, podendo ser vistos em superfície. Esses materiais encontram-se misturados com solos, que foram depositados nesse local. A Figura 60 exibe também a variação da topografia atual, com a topografia da área de estudo no ano de 2007. Vale ressaltar que, na topografia da área de estudo levantada no ano de 2007, compreende apenas o período inicial da remoção de material, sendo que posteriormente, essa área escavada se tornou mais profunda.

A área circulada denominada de BS, provavelmente, representa a Formação Botucatu - arenito silicificado, apresentando uma resistividade superior a 4000ohm.m. Chegou-se a essa conclusão devido aos mapas geológicos delimitarem o local do aterro com ocorrência da formação Botucatu, que em diversos locais apresenta pacotes de arenito silicificado; é possível observar o afloramento do arenito silicificado em locais próximo à área de estudo, especialmente no fundo e nas encostas do Córrego da Água Quente, na cota topográfica de 724 metros.

Nas áreas circulada AC1 é possível observar uma zona com anomalia de baixa resistividade (variando de 11.8 a 27.5ohm.m), podendo indicar área contaminada por percolados. Uma fonte provável de contaminante, considerando os tipos de materiais que são depositados nesse local, seria o chorume. Chega-se a essa conclusão pois pode ser visto em superfície grande quantidade de lixo orgânico, que são depositados quase que diariamente na área de estudo, e foram depositados durante a formação do aterro, como pode ser visto em fotos históricas, em especial resto de podas. Comparando esses valores de resistividade, com o perfil de camadas de solos naturais, sem a presença de contaminantes (Figura 64), observa-se que o valor padrão, para solos naturais, de resistividade são superiores a 100ohm.m, podendo chegar a 500ohm.m. A tabela 9 apresenta valores de resistividades obtidos em trabalhos de diferentes autores, e em geral, em condições naturais, os solos da Formação Botucatu, apresentam uma resistividade superior a 100ohm.m.

É possível observar que esses contaminantes, da área delimitada AC1, estão migrando para locais mais profundos. A região de anomalia AC2, também representa um potencial local com presença de contaminantes, aflorando em superfície. Na linha 1, o nível de água pode variar até a profundidade de 20 metros. Em geral, se encontra entre 8 a 10 metros. Como pode ser visto, no poço de monitoramento PMA, o nível de água estava a 8 metros de profundidade, e no poço PMB, mais próximo ao córrego da Água Quente, o nível de água estava a 1 metro de profundidade. A área delimitada BSL, provavelmente são veios de arenitos silicificado, conforme observado no poço de monitoramento PMB, iniciando na profundidade de 7 metros, que foram registrados em área natural, não tendo uma ocorrência em toda área, não sendo observado nos pontos de sondagem (SILVA LEME ENGENHARIA, 2010)

Tabela 9 Comparação de diferentes valores de resistividades para substratos semelhantes.

Autor	Resistividade do solo natural	Resistividade do solo antropogênico	Resistividade das rochas	Resistividade da área contaminada
Presente trabalho	100-500Ω.m (Fm. Botucatu)	360- superior a 4000 Ω.m (aterro de RCC)	850- superior a 4000Ω.m (arenito silicificado)	Inferior a 100 Ω.m (arenito silicificado)
Vargemezis (2014)	Inferior a 19 Ω.m(argilas)	34- superior a 220 Ω.m (aterro de RCC)	34 a 70Ω.m. rocha argilo arenosa	Não possui
Veloso (2006)	150 – 1672	Inferior a 150 Ω.m (Lixão desativado)	-	Inferior a 150 Ω.m
Gadotti (1997)	350-1000Ω.m arenito Fm. Botucatu	Inferior a 50 Ω.m	-	Inferior a 50 Ω.m

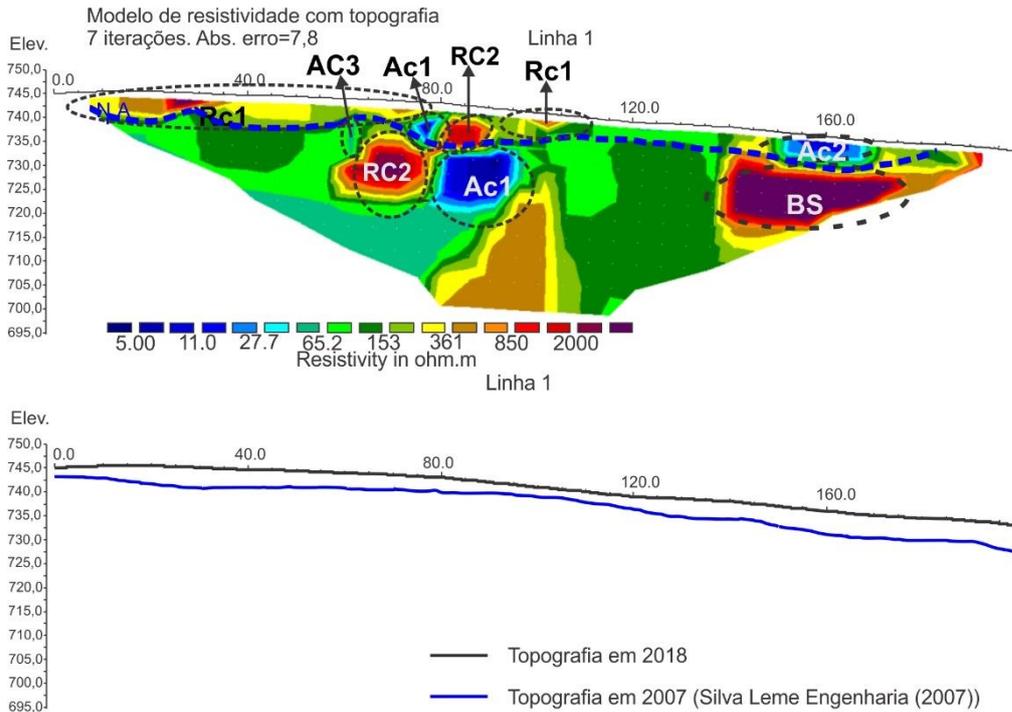


Figura 60 Perfil geofísico de eletrorresistividade e variação topográfica da linha 1.

Na linha 2, é possível observar que a área do aterro se torna mais profunda, como pode ser indicado nas áreas circuladas RC.

Na linha 2, a área circulada Ac1, Figura 61, apresenta uma região com uma resistividade baixa, chegando até a 5ohm.m, indicando um local com presença de contaminantes. É possível observar que essa pluma de contaminantes tem continuidade nos outros perfis geofísicos. As áreas circuladas Ac2, Ac3 e Ac4, apresentam uma resistividade também baixa, variando de 27,7 a 65,2ohm.m, valores muito inferiores quando comparada com o perfil de solos naturais. Com isso, conclui-se que, o que tem provocado essa anomalia seria a percolação de materiais contaminantes. A área delimitada BS provavelmente é uma parte o arenito silicificado, sendo possível ver sua continuidade nos outros perfis.

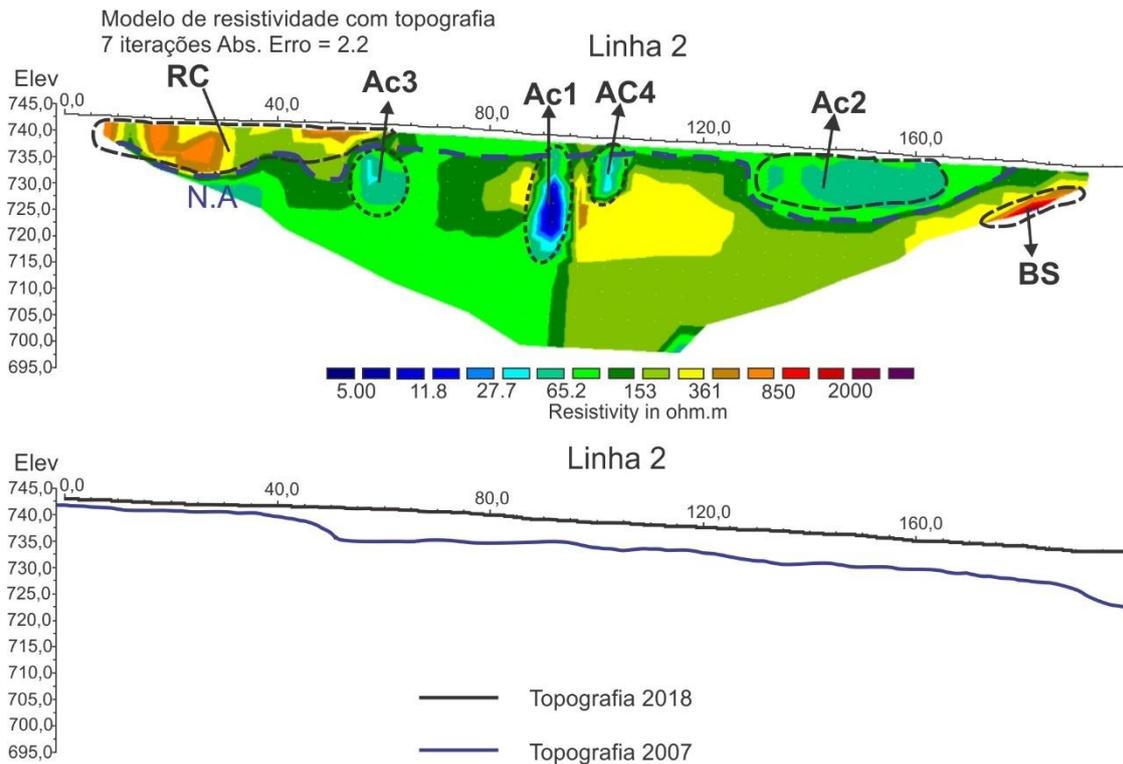


Figura 61 Perfil geofísico de eletrorresistividade e variação topográfica da linha 2.

Já na Linha 3, o aterro atinge uma profundidade máxima de 10 metros, indicado pela área circulado RC, Figura 62, com resistividade variando de 361ohm.m a valores a 4000ohm.m. As áreas Ac2, Ac3, Ac4 devido à profundidade no perfil, e pela proximidade com os materiais de maior resistividade (locais com resíduos de RCCs), pode ser considerada como uma zona anômala de baixa resistividade, provocada pela movimentação de contaminantes, já que apresentam um grande contraste quando comparadas com solos naturais. Nesses locais, juntamente com os materiais de construção civil, são depositadas grandes quantidades de lixo, fazendo com que o material lixiviado se infiltre, gerando uma pluma de contaminação.

A região anômala delimitada CC, provavelmente, o que tem provocado essa anomalia, é devido à quantidade de esgotos que circulam nas águas do Córrego da Água Quente, que estão infiltrando por baixo do arenito silicificado, indicado na área delimitada 10, chegando a resistividades muito baixas de 5ohm.m. Já a área Ac1, o que tem provocado esse baixo padrão de resistividade, provavelmente, seria uma combinação da infiltração de águas contaminadas do Córrego da Água Quente, juntamente com os materiais lixiviados, devido a deposição de lixos contendo matéria orgânica, na área de aterro.

Foram realizadas análises da água subterrâneas, coletadas através do poço de monitoramento MPB, localizado próximo ao Córrego da Água Quente. Como resultado, apenas os valores de chumbo e cromo estavam acima do valor máximo permitido (SILVA LEME ENGENHARIA, 2010). Vale ressaltar que, a coleta de água para essa análise foi realizada no ano de 2007, época em a área possuía uma quantidade muito menor de resíduos em comparação com os dias atuais; o despejo de esgoto já ocorria no córrego

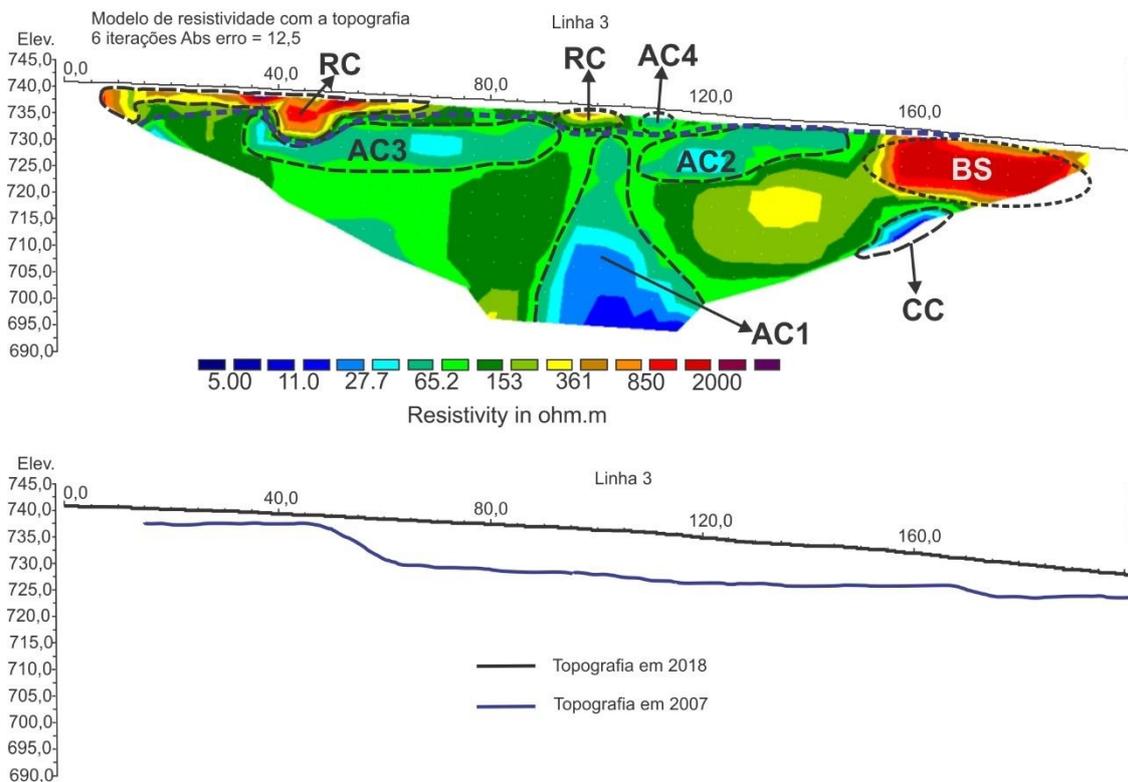


Figura 62 Perfil geofísico de eletrorresistividade e variação topográfica da linha 3.

Na linha 4, na área delimitada RC, é possível observar a presença de resíduos de construção civil, com profundidades variadas, sendo indicado por uma região anômala de alta resistividade, conforme a Figura 63, com valores variando de 361 a 2000ohm.m. Já na área delimitada 3, observa-se um pacote mais espesso de resíduos de construção civil. Esses resíduos afloram até a superfície.

Na região de baixa resistividade, na área delimitada AC1, provavelmente, o que tem provocado esses baixos valores, seriam as águas do Córrego da Águas Quente, que contêm uma grande quantidade de esgotos, que estariam infiltrando por baixo do arenito silicificado (BS), e alterando a resistividade das águas subterrâneas. Quanto mais próximo

azul, menor a resistividade deste solo. Concomitantemente, ocorre a infiltração de lixiviados, proveniente da área do aterro.

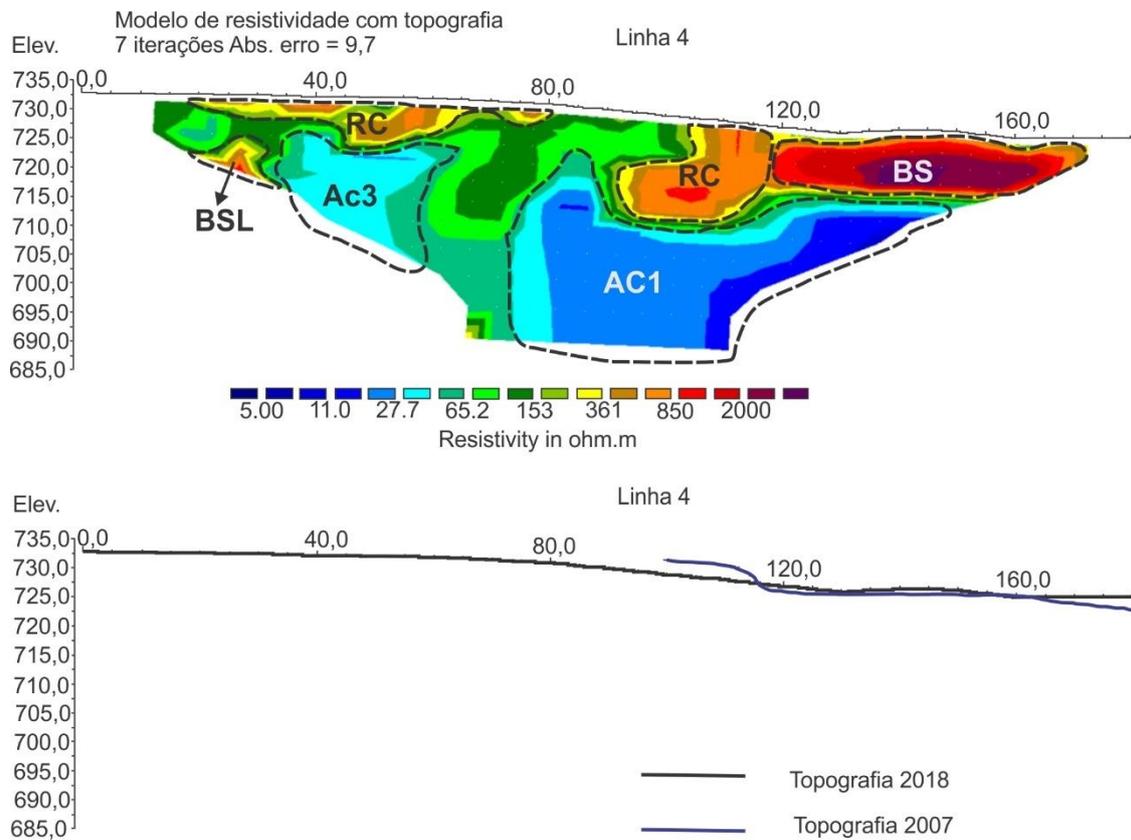


Figura 63 Perfil geofísico de eletrorresistividade e variação topográfica da linha 4.

Na linha 5, a área delimitada BS, representa uma anomalia de resistividade elevada, indicando a presença do arenito silicificado, conforme a Figura 64. Pode-se chegar a essa conclusão, baseando-se no fato que, pouco a frente dessa linha, nas margens do córrego da Água Quente, aflora, com a mesma cota, rochas da formação Botucatu. Nesse local, tem-se a presença de solo natural, sendo localizado fora da área de aterro. Como pode ser observado, o aquífero tem uma resistividade natural de 65Ohm.m. Portanto, esse perfil representa uma área com solos naturais, servindo os valores de resistividade como base para os outros perfis. A área delimitada BSL, provavelmente são lentes de arenito.

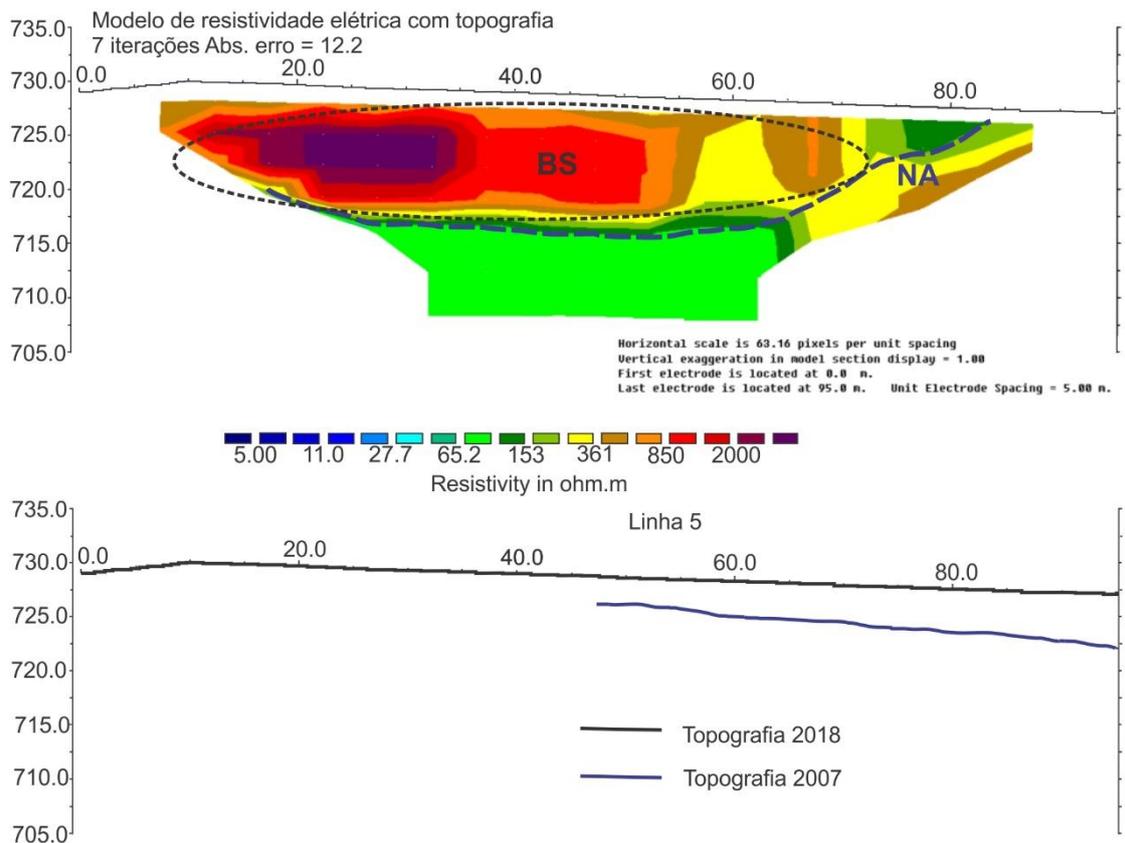


Figura 64 Perfil geofísico de eletrorresistividade e variação topográfica da linha 4.

Na Figura 65, é possível observar a posição de cada perfil obtido pelo levantamento geofísico. Nessa imagem, é possível observar a continuidade do arenito silicificado da Formação Botucatu, e também a posição geográfica dos locais contendo resíduos de construção civil, e das plumas de contaminantes.

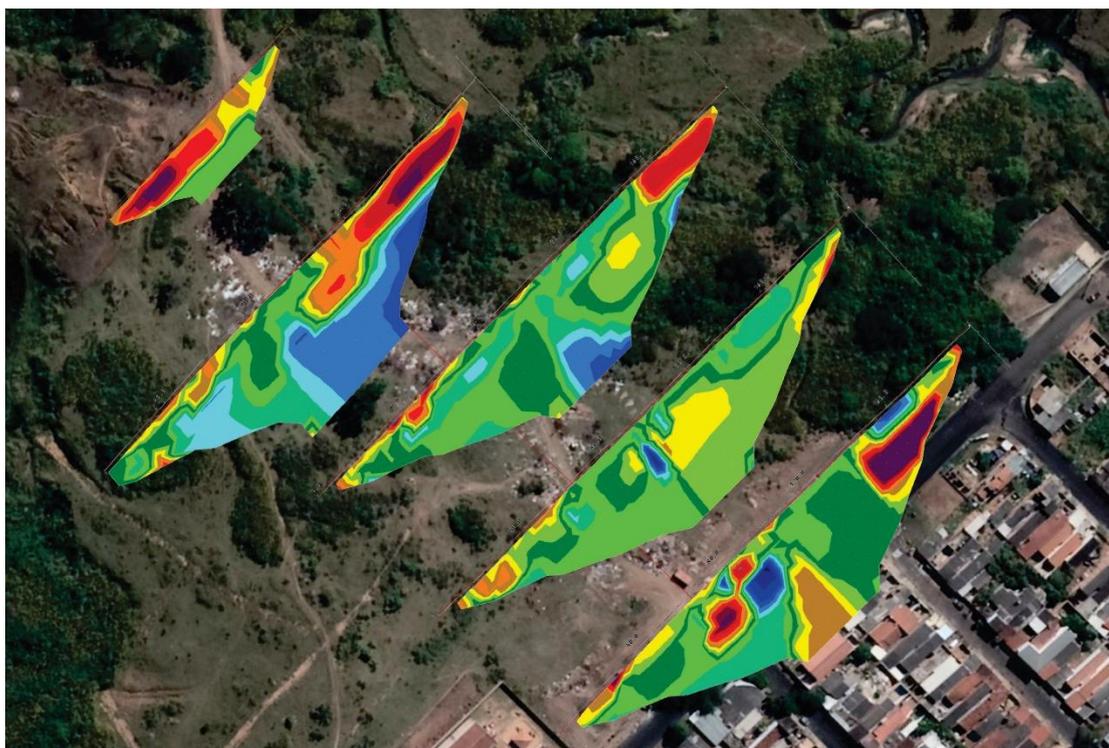


Figura 65 Distribuição espacial dos resultados obtidos em cada linha no levantamento geofísico

Estava previsto para o levantamento geofísico uma linha 6, que seria transversal às demais linhas. Mas o resultado não foi satisfatório, não sendo possível identificar os valores de resistividade na imagem em profundidade, devido a uma grande quantidade de ruídos. Esse fato se deve, primeiramente à linha ser muito longa, com 265 metros de comprimento, e também pelo fato que muito dos eletrodos terem sido alocados sobre pilhas de rejeito, não permitindo uma leitura satisfatória da resistividade nessa linha.

Na Figura 66A e B, pode-se ser visto o valor da eletrorresistividade da área superficial em um bloco 3d. É possível separar os locais onde se tem a ocorrência do arenito Botucatu Silicificado (BS), as áreas com resíduos de construção civil (RC), e a ocorrência de uma fonte de contaminante (Ac2) (que chega bem próximo à superfície). Na Figura 66C, é possível ver a parte inferior da área de estudo, indicando a presença dos contaminantes provenientes do lançamento de efluentes do córrego da Água Quente (Ac1). É possível observar que a área delimitada Ac2, aflora até a superfície. Conseguise perceber que o aterro de resíduos de construção civil, devido ao grande lançamento de matéria orgânica, tem contribuído para reduzir a resistividade dos solos em determinados locais, formando plumas de contaminantes. Esses contaminantes se unem aos

contaminantes que infiltram por baixo do arenito silicificado, devido aos efluentes despejados no córrego da Água Quente, tornando difícil de os distinguir em profundidade.

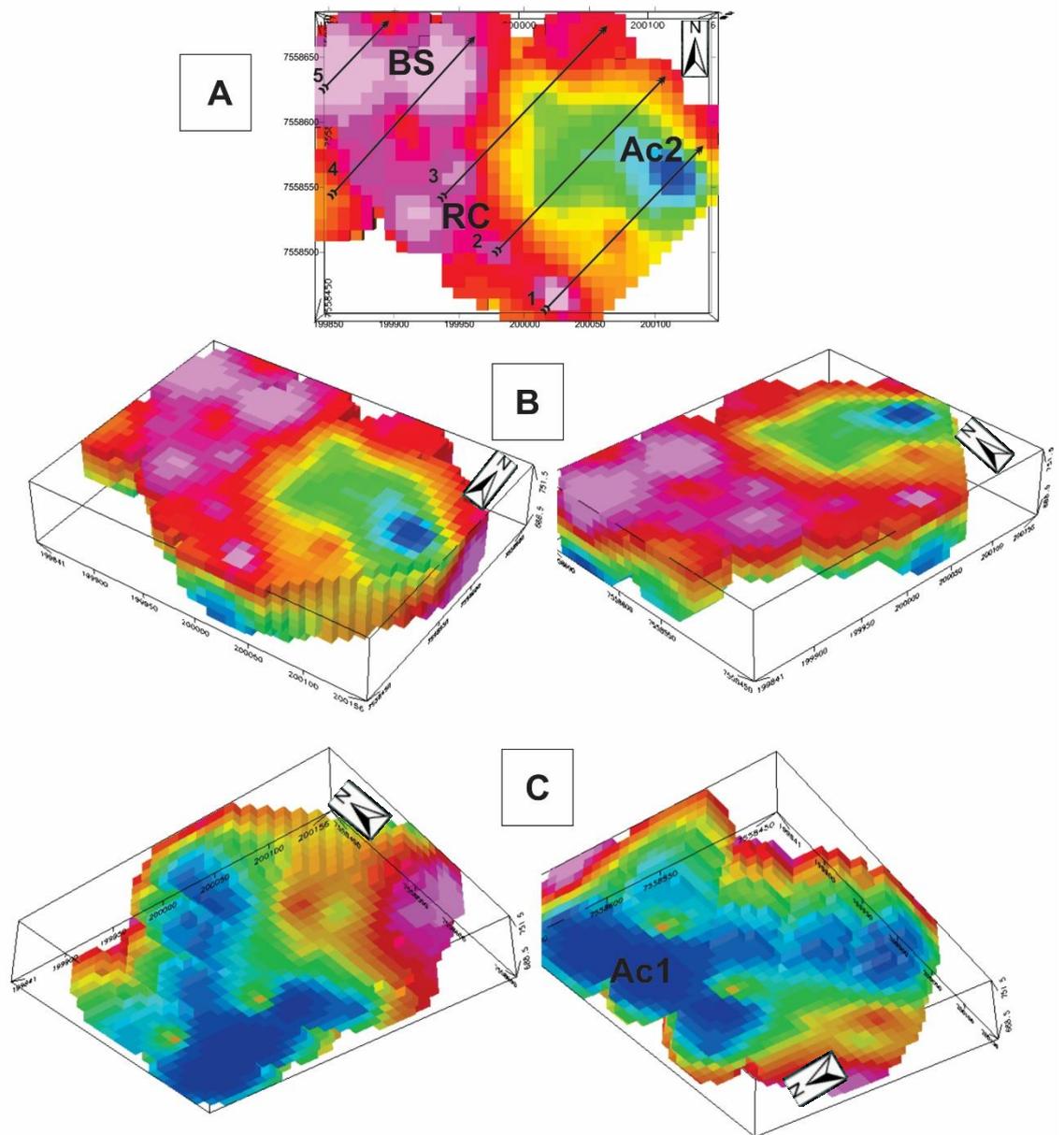


Figura 66 Modelo do bloco 3D do levantamento de eletrorresistividade

Na Figura 67 (A, B, C, D, E, G e H), pode-se observar os cortes visto em planta, em profundidades diversas, sendo a Figura 67 A representando a superfície. É possível observar, que os focos de contaminantes iniciam em sua maioria na região central da imagem, local onde encontra-se o aterro de resíduos de construção civil, quando observa-se nas Figuras 67 A e F, com as Figuras 67C, D e E mostrando a parte superior desses contaminantes.

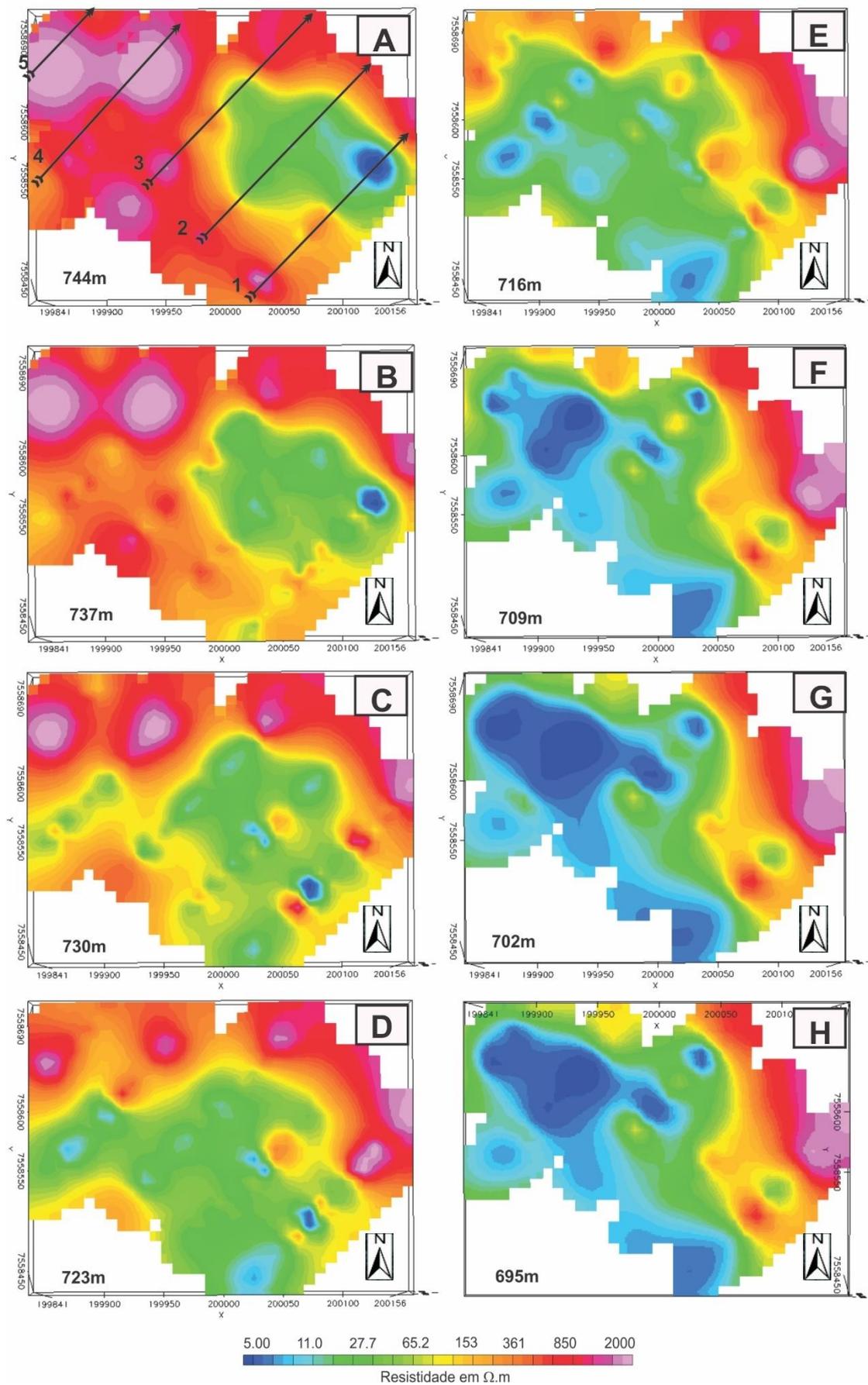


Figura 67 Figura mostrando corte em planta do levantamento geofísico em diferentes profundidades

Na Figura 67C, é possível observar que o aterro atinge uma profundidade podendo chegar até a 14 metros em alguns locais, mas em sua maior porção, atinge uma profundidade de 7 metros. Já as rochas da Formação Botucatu silicificado, indicado na Figura 67 A pelo código BS, chegam a uma profundidade de 30 metros em subsuperfície, e em algumas regiões, pode chegar a profundidades superiores a 50 metros.

Com relação à anomalia de baixa resistividade, conforme indicados nas Figuras 67 F, G e H, apenas com os dados obtidos, torna-se difícil definir quanto desses contaminantes são provenientes do despejo de efluentes no Córrego da Água Quente, e o quanto é proveniente do aterro de resíduos de construção civil. O mais provável é que esses líquidos com baixa resistividade (tanto do proveniente do lançamento de efluentes no Córrego da Água Quente quanto do aterro de resíduos de construção civil) estão se associando em profundidade, sendo essa pluma formada com contaminantes desses dois ambientes.

4.5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Com a caracterização visual dos materiais, foi possível observar os diferentes tipos de materiais antropogênicos que ocorrem no aterro e as características dos materiais inconsolidados naturais. As análises granulométricas complementaram as caracterizações. Para os materiais de aterro são descritos os fragmentos antropogênicos encontrados, conforme estabelece a norma ISO 14688-1 (ISO, 2018). Vale ressaltar que, essa determinação da granulometria é representativa apenas para o local amostrado, podendo ocorrer no local de aterro de resíduos de construção civil, fragmentos muito maiores do que os determinados por este ensaio.

4.5.2.1 MATERIAL INCONSOLIDADO ARENOSO

Foram realizadas duas amostragens em materiais inconsolidados naturais.

- Amostra coleada no ponto I7

A Figura 68 mostra o material coletado no ponto I7, em área natural, em uma profundidade máxima de 65cm.



Figura 68 Materiais coletados no ponto I7

Os materiais coletados nesse ponto apresentam as seguintes características:

- Coloração marrom amarelada.
- Sem presença de matéria orgânica visível.
- Sem presença de fragmentos de rochas ou materiais antropogênicos.

Na caracterização granulométrica no ponto I7, foram obtidas as frações indicadas na Tabela 10.

Tabela 10 Análise granulométrica no ponto I7

Argila (%) <0,002mm	Silte (%) ente 0,002 a 0,05mm	Areia (%)			Pedregulho (%) Entre 2 a 60mm	Massa específica (ρ_s)
		Fina entre 0,06 a 0,2mm	Média entre 0,2 a 0,6mm	Grossa entre 0,2 a 2mm		
1,9	2,3	25,4	60,9	9,5	0,1	2,615

Como pode ser visto, existe uma predominância de areia fina a média nesses materiais, sendo que essas duas faixas granulométricas representam 86,3% de todo material. As quantidades de material fino são baixas, apresentando apenas 4,2% de materiais de silte e argila.

Segundo a classificação unificada de solos, este material pode ser classificado como areia mal graduada.

- Amostra coletada no ponto I8

A Figura 69 mostra o material coletado no ponto I8, amostrado em área natural, em uma profundidade máxima de 52cm.



Figura 69 Materiais coletados no ponto I8

Os materiais coletados nesse ponto apresentam as seguintes características:

- Coloração marrom escuro a avermelhada.
- Sem presença de fragmentos de rocha ou materiais antropogênicos.
- Granulometria variando de fina a média.

Na caracterização granulométrica no ponto I8, foram obtidas as frações indicadas na Tabela 11.

Tabela 11 Análise granulométrica no ponto I8

Argila (%) <0,002mm	Silte (%) entre 0,002 a 0,05mm	Areia (%)			Pedregulho (%) Entre 2 a 60mm	Massa específica (ρ_s)
		Fina entre 0,06 a 0,2mm	Média entre 0,2 a 0,6mm	Grossa entre 0,2 a 2mm		
3,8	2,3	22,8	61,6	9,4	0,1	2,635

Como pode ser visto, existe uma predominância de areia fina a média nesses materiais, sendo que essa faixa granulométrica representa 84,4% de todo material. As quantidades de material fino são pequenas, apresentando apenas 6,1% de materiais de materiais de silte e argila.

Segundo a classificação unificada de solos, este material pode ser classificado como areia mal graduada.

Comparando-se as amostras, observa-se a semelhança na característica do material inconsolidado arenoso I, havendo um pequeno aumento do teor de finos na amostra I8. A Figura 70 apresenta as curvas granulométricas dos materiais amostrados nos pontos I7 e I8.

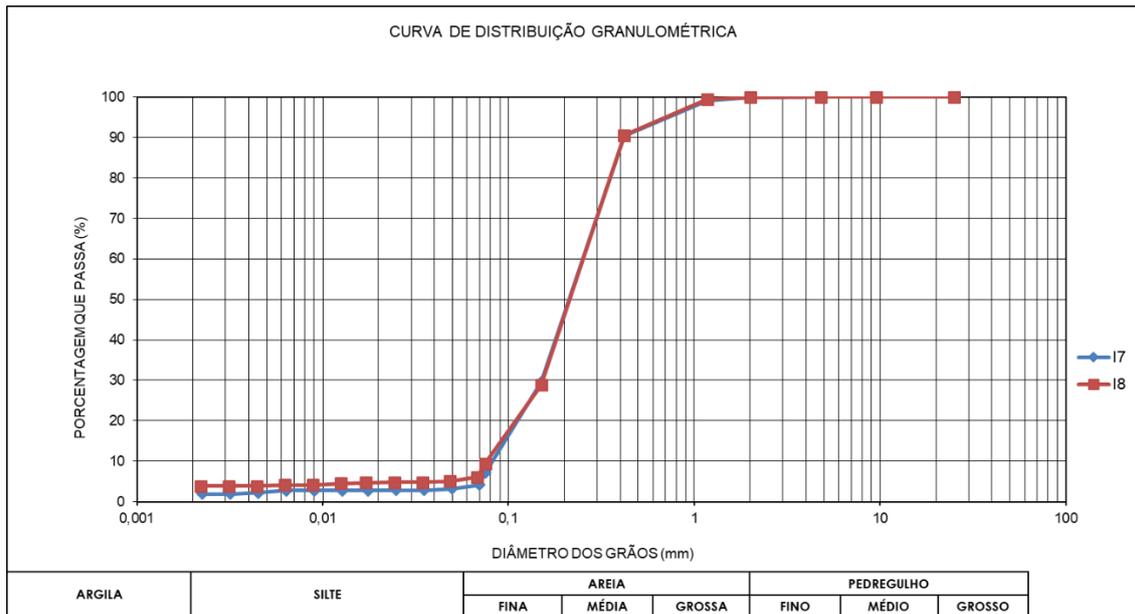


Figura 70 Curva granulométrica dos pontos I7 e I8

4.5.2.1 ATERRO COM PREDOMINÂNCIA DE MATERIAIS FINOS

Foram realizadas duas amostragens onde ocorre a predominância de materiais finos no aterro.

- Amostra coletada no ponto I1

A Figura 71 mostra o material coletado no ponto I1, amostrado em área de aterro, em uma profundidade máxima de 56cm.



Figura 71 Figura 81 Materiais coletados no ponto I1

- Fragmentos antropogênicos encontrados:

- Carvão
- Fragmentos de concreto
- Fragmentos de tijolo
- Fragmentos de rocha

Os materiais coletados nesse ponto apresentam as seguintes características:

- Coloração marrom amarelado a avermelhado.
- Presença de material orgânico já decomposto, indicado pela coloração mais escura.
- Areia com granulometria variando de fina a média.

Na caracterização granulométrica no ponto I1, foram obtidas as frações indicadas na Tabela 12.

Tabela 12 Análise granulométrica no ponto I1

Argila (%) <0,002mm	Silte (%) ente 0,002 a 0,05mm	Areia (%)			Pedregulho (%) Entre 2 a 60mm	Massa específica (ρ_s)
		Fina entre 0,06 a 0,2mm	Média entre 0,2 a 0,6mm	Grossa entre 0,2 a 2mm		
0,8	3,2	26,1	60,0	7,4	2,5	2,624

Como pode ser visto, existe uma predominância de areia média a fina nesses materiais, sendo que essa faixa granulométrica representa 86,1% de todo material. As quantidades de material fino são pequenas, apresentando apenas 4% de materiais de silte e argila.

Esse material, pode ser classificado de acordo com a USDA (2017) como solo arenoso médio.

Segundo a classificação unificada de solos, este material pode ser classificado como areia mal graduada.

- Amostra coletada no ponto I9:

A Figura 72 mostra o material coletado no ponto I9, amostrado em área de aterro, em uma profundidade máxima de 61cm.



- Fragmentos antropogênicos encontrados:

- Fragmento de garrafa pet
- Fragmentos de rocha
- Borracha
- Fragmentos de concreto

Figura 72 Materiais coletados no ponto I9

Os materiais coletados nesse ponto apresentam as seguintes características:

- Coloração marro escuro a avermelhada
- Sem presença de matéria orgânica visível
- Granulometria variando de areia fina a média, com presença de fragmentos antropogênicos maiores

Na caracterização granulométrica no ponto I9, foram obtidas as frações indicadas na Tabela 13.

Tabela 13 Análise granulométrica no ponto I9

Argila (%) <0,002mm	Silte (%) ente 0,002 a 0,05mm	Areia (%)			Pedregulho (%) Entre 2 a 60mm	Massa específica (ρ_s)
		Fina entre 0,06 a 0,2mm	Média entre 0,2 a 0,6mm	Grossa entre 0,2 a 2mm		
0,4	3,6	25,3	62,8	7,5	0,4	2,704

Como pode ser visto, existe uma predominância de areia média a fina nesses materiais, sendo que essa faixa granulométrica representa 88,1% de todo material. As quantidades de material fino são baixas, apresentando apenas 4% de materiais de silte e argila.

Segundo a classificação unificada de solos, este material pode ser classificado como areia mal graduada.

As análises granulométricas dos dois locais são semelhantes, embora a composição dos fragmentos antrópicos seja bastante distinta. divergem dos materiais naturais por apresentarem mais materiais grosseiros. A Figura 73 apresenta a curva granulométrica para os materiais amostrados nos pontos I1 e I9.

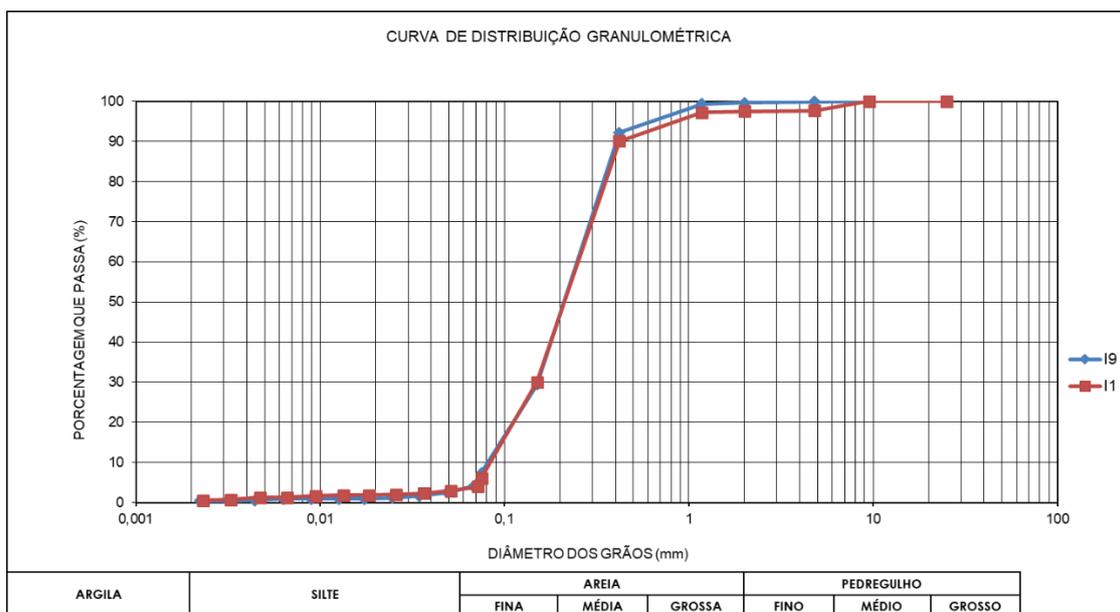


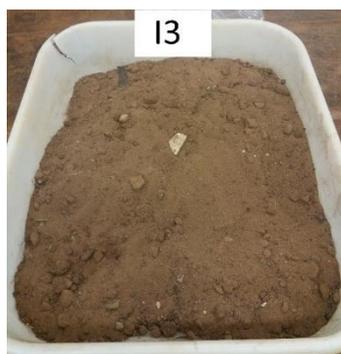
Figura 73 Curva granulométrica dos pontos I1 e I9

4.5.2.2 ATERRO COM PRESENÇA DE FRAGMENTOS GROSSEIROS

As amostras a seguir foram coletadas em área de aterro, onde há predominância de fragmentos antrópicos.

- Amostra coletada no ponto I3

A Figura 74 mostra o material coletado no ponto I3, em uma profundidade máxima de 43cm. O ponto I3 foi realizado em ensaio para materiais grosseiros por apresentar mais de 5% de pedregulhos.



- Fragmentos antropogênicos encontrados:

- Fragmentos de cerâmica
- Fragmentos de rocha
- Brita
- Concreto
- Borracha
- Pedaco de garrafa pet

Figura 74 Materiais coletados no ponto I3

Os materiais coletados nesse ponto apresentam as seguintes características:

- Coloração marrom amarelado a avermelhado, com presença de coloração mais escura.
- Presença de areia com granulometria variando de fina a média.

Na caracterização granulométrica no ponto 3 foram obtidas as frações indicadas na Tabela 14.

Tabela 14 Análise granulométrica no ponto I3

Argila (%) <0,002mm	Silte (%) ente 0,002 a 0,05mm	Areia (%)			Pedregulho (%)		
		Fina entre 0,06 a 0,2mm	Média entre 0,2 a 0,6mm	Grossa entre 0,2 a 0,6mm	Fino entre 2 a 6mm	Médio entre 6 a 20mm	Grosso entre 20 a 60mm
1,8		12,8	68,4	10,9	1,2	3,7	1,2

Segundo a classificação unificada de solos, este material pode ser classificado como areia mal graduada.

- Amostra coletada no ponto I4

A Figura 75 mostra o material coletado no ponto I4, em uma profundidade máxima de 54cm.



Fragmentos antropogênicos encontrados:

- Cerâmica
- Tijolo
- Telha
- Plástico
- Amianto
- Fragmentos de rocha
- Concreto
- Cerâmica
- Borracha

Figura 75 Materiais coletados no ponto I4.

Os materiais coletados nesse ponto apresentam as seguintes características:

- Coloração marrom escuro
- Sem presença de matéria orgânica.

Na caracterização granulométrica no ponto I4, foram obtidas as frações granulométricas indicadas na Tabela 15.

Tabela 15 Análise granulométrica no ponto I4

Argila (%) <0,002mm	Silte (%) ente 0,002 a 0,05mm	Areia (%)			Pedregulho (%)		
		Fina entre 0,06 a 0,2mm	Média entre 0,2 a 0,6mm	Grossa entre 0,2 a 0,6mm	Fino entre 2 a 6mm	Médio entre 6 a 20mm	Grosso entre 20 a 60mm
1,7		1,4	18	14,8	3,3	10,9	49,9

Segundo a classificação unificada de solos, este material pode ser classificado como pedregulho bem graduado.

- Amostra coletada no ponto I6:

A Figura 76 mostra o material coletado no ponto I6, em uma profundidade máxima de 45cm.



Fragmentos antropogênicos encontrados:

- Tijolo
- Nylon
- Gesso
- Plástico
- Concreto
- Rochas
- Isopor
- Borracha
- Amianto
- Cerâmica
- Telha

Figura 76 Materiais coletados no ponto I6

Os materiais coletados nesse ponto apresentam as seguintes características:

- Cor marrom escuro a cinza escuro.
- Tamanho do diâmetro do maior fragmento: 9cm.
- Presença de solos com coloração escura, indicando ocorrência de matéria orgânica já decomposta.

Na caracterização granulométrica no ponto I6, foram obtidas as frações indicadas na Tabela 16.

Tabela 16 Análise granulométrica no ponto I6

Argila (%) <0,002mm	Silte (%) ente 0,002 a 0,05mm	Areia (%)			Pedregulho (%)		
		Fina entre 0,06 a 0,2mm	Média entre 0,2 a 0,6mm	Grossa entre 0,2 a 0,6mm	Fino entre 2 a 6mm	Médio entre 6 a 20mm	Grosso entre 20 a 60mm
3,5	4,3	22,4	14,3	2,5	6,3	46,7	

Segundo a classificação unificada de solos, este material pode ser classificado como pedregulho bem graduado.

- Amostra coleada no ponto I10:

A Figura 77 mostra o material coletado no ponto I10, em uma profundidade máxima de 40cm.



- Fragmentos antropogênicos encontrados:

- Cerâmica
- Tijolo
- Telha
- Plástico
- Amianto
- Fragmentos de rocha
- Concreto

Figura 77 Materiais coletados no ponto I10

Os materiais coletados nesse ponto apresentam as seguintes características:

- Coloração marrom escuro
- Sem presença de matéria orgânica visível

Na caracterização granulométrica no ponto I10, foram obtidas as frações indicadas na Tabela 17.

Tabela 17 Análise granulométrica no ponto I10

Argila (%) <0,002mm	Silte (%) ente 0,002 a 0,05mm	Areia (%)			Pedregulho (%)		
		Fina entre 0,06 a 0,2mm	Média entre 0,2 a 0,6mm	Grossa entre 0,2 a 0,6mm	Fino entre 2 a 6mm	Médio entre 6 a 20mm	Grosso entre 20 a 60mm
6,5	7,8	25,8	15,9	5,7	14,9	23,4	

Segundo a classificação unificada de solos, este material pode ser classificado como pedregulho mal graduado.

Os materiais de aterro com predominância de fração mais grosseira são bastante heterogêneos, como pode ser observado pelas análises visuais, coloração e granulometria encontrada. suas características não guardam nenhuma semelhança aos materiais inconsolidados naturais. A Figura 78 apresenta a curva granulométrica para os materiais amostrados nos pontos I3, I4, I6 e I10.

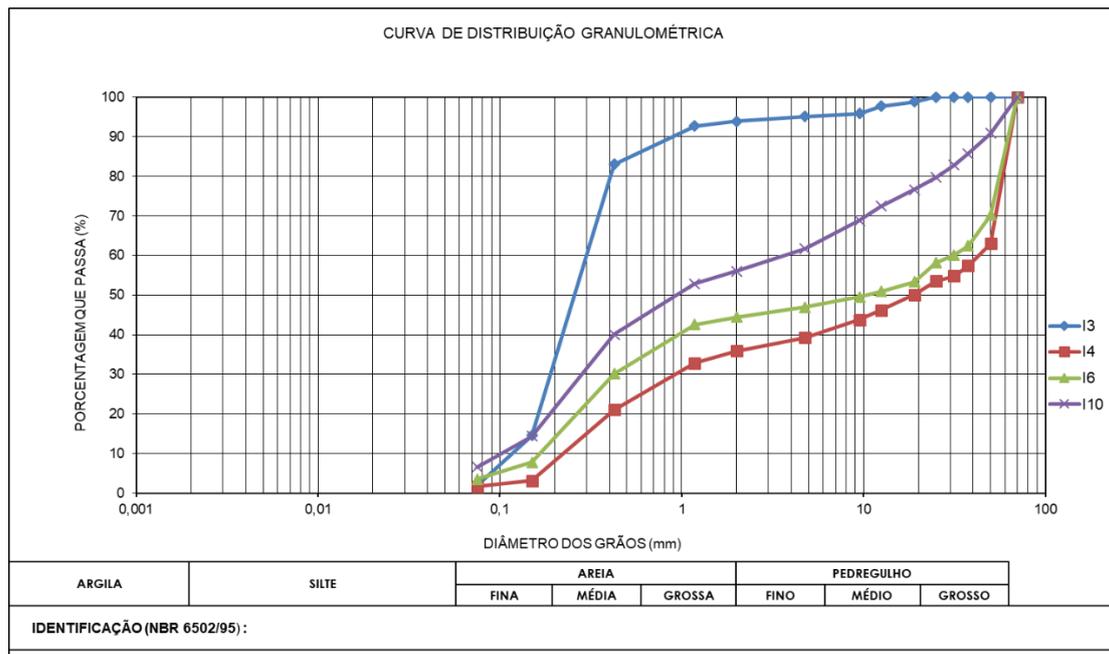


Figura 78 Curva granulométrica dos pontos I3, I4, I6 e I10

4.5.2.3 RESÍDUOS SUPERFÍCIAIS

As amostras a seguir foram coletadas em área de resíduos superficiais, onde há predominância de fragmentos antrópicos.

- Amostra coletada no ponto I2

A Figura 79 mostra o material coletado no ponto I2, em uma profundidade máxima de 55cm.



Fragmentos antropogênicos encontrados:

- Fragmentos de tijolo
- Fragmentos de borracha
- Pedacos de madeira
- Plástico
- Fragmentos de concreto
- Fragmentos de azulejo
- Fragmentos de rocha
- Brita

Figura 79 Amostra de materiais coletados no ponto I2

Os materiais coletados nesse ponto apresentam as seguintes características:

- Coloração marrom escuro
- Sem presença visível de matéria orgânica

Na caracterização granulométrica no ponto I2, foram obtidas as frações indicadas na Tabela 18.

Tabela 18 Análise granulométrica no ponto I2

Argila (%) <0,002mm	Silte (%) ente 0,002 a 0,05mm	Areia (%)			Pedregulho (%)		
		Fina entre 0,06 a 0,2mm	Média entre 0,2 a 0,6mm	Grossa entre 0,2 a 0,6mm	Fino entre 2 a 6mm	Médio entre 6 a 20mm	Grosso entre 20 a 60mm
2		2,9	28,5	17,3	3,5	14,6	31,2

Segundo a classificação unificada de solos, este material pode ser classificado como pedregulho bem graduado.

Amostra coletada no ponto I5:

A Figura 80 mostra o material coletado no ponto I5, em uma profundidade máxima de 47cm.



- Fragmentos antropogênicos encontrados:

- Cerâmica
- Tijolo
- Telha
- Plástico
- Fragmentos de rocha
- Concreto

Figura 80 Materiais coletados no ponto I5

Os materiais coletados nesse ponto apresentam as seguintes características:

- Coloração marrom escuro.
- Tamanho do diâmetro do maior fragmento: 8cm
- Baixa presença de matéria orgânica.

Na caracterização granulométrica no ponto I5, foram obtidas as frações indicadas na Tabela 19.

Tabela 19 Análise granulométrica no ponto I5

Argila (%) <0,002mm	Silte (%) ente 0,002 a 0,05mm	Areia (%)			Pedregulho (%)		
		Fina entre 0,06 a 0,2mm	Média entre 0,2 a 0,6mm	Grossa entre 0,2 a 0,6mm	Fino entre 2 a 6mm	Médio entre 6 a 20mm	Grosso entre 20 a 60mm
1,5		4,6	36,1	22	4,8	9,7	21,3

Segundo a classificação unificada de solos, este material pode ser classificado como areia mal graduada.

A Figura 81 apresenta a curva granulométrica para os materiais amostrados nos pontos I2 e I5.

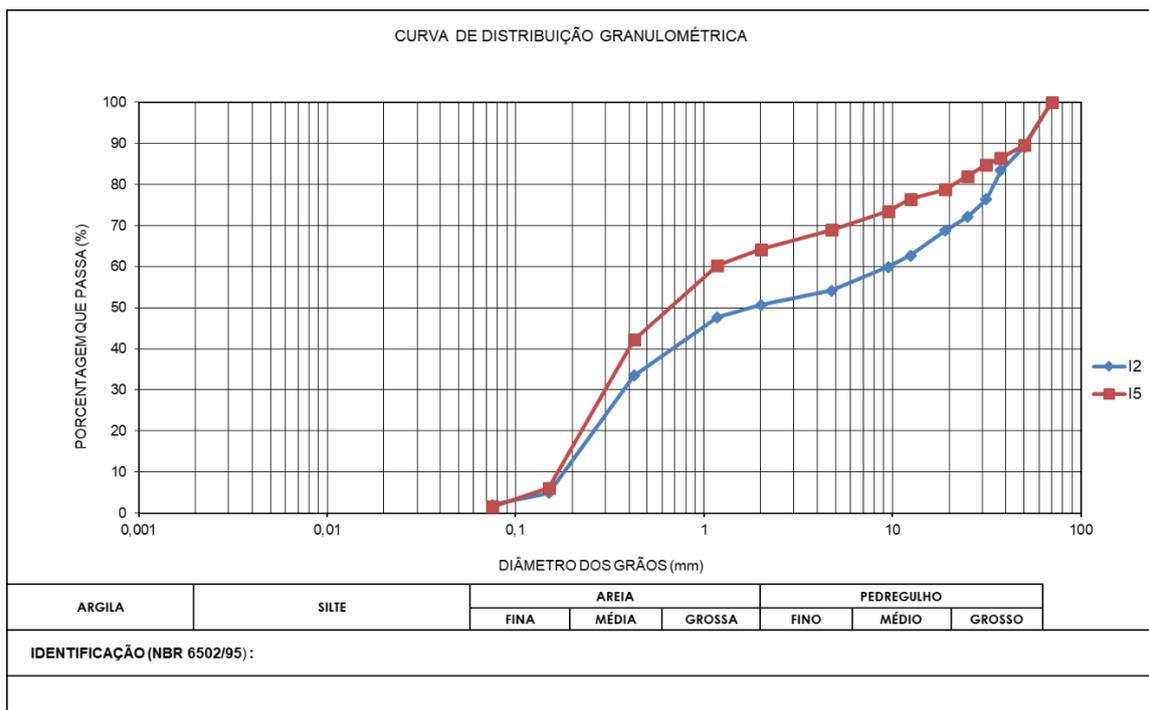


Figura 81 Curva granulométrica dos pontos I2 e I5.

4.5.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO

Os ensaios com o penetrômetro de impacto foram realizados na área de aterro, resíduos superficiais e em material inconsolidado natural, conforme indicado na Figura 82.

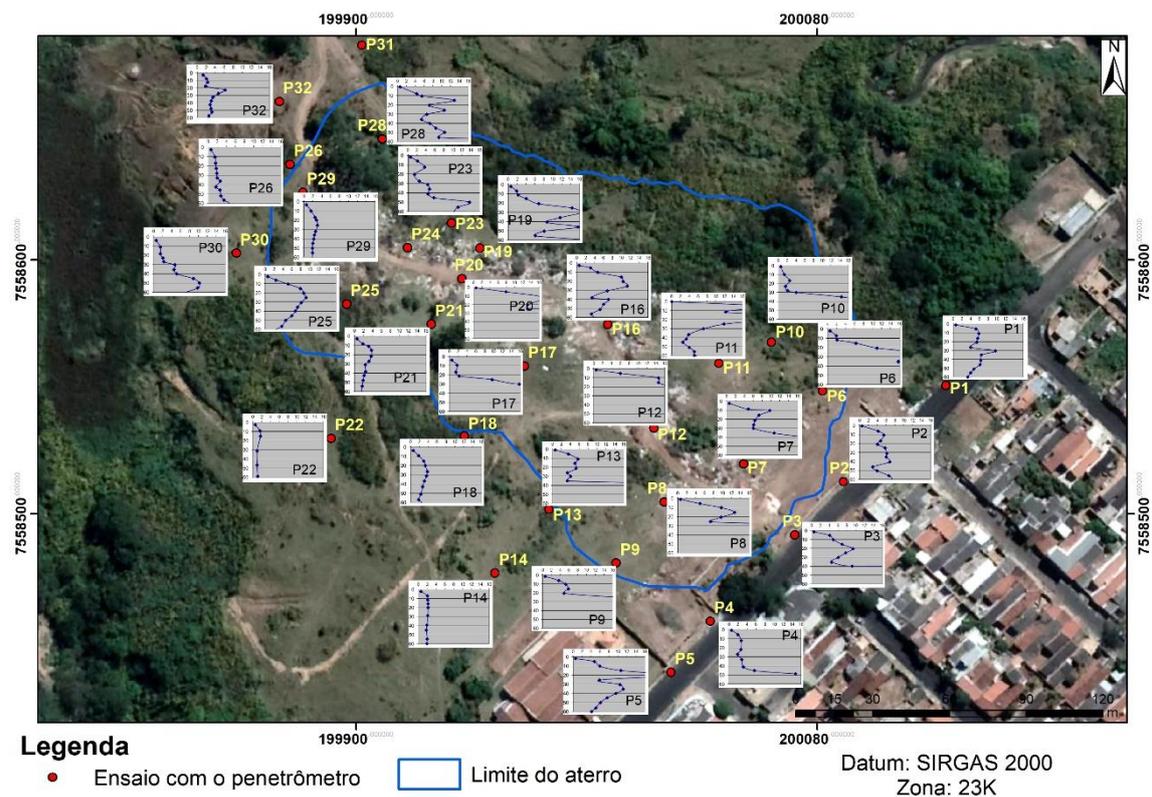


Figura 82 Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios com o penetrômetro. Fonte: Google Earth, 25 de maio de 2017, modificada pelo autor.

4.5.3.1 MATERIAIS INCONSOLIDADOS NATURAIS

Na área de materiais inconsolidados naturais, foram realizados os ensaios P14, P22 e P29. Os valores da resistência física à penetração desses pontos podem ser vistos no Anexo 3 e na Figura 83.

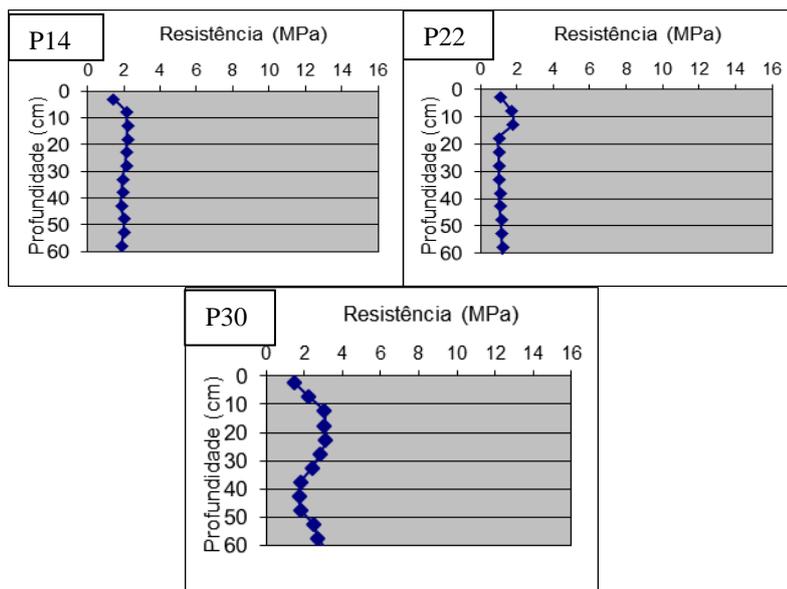


Figura 83 Gráfico com valores da resistência física a penetração dos pontos em área de solo natural, P14, P22 e P29. Fonte: Autor.

As áreas com depósitos naturais compreendem os materiais transportados da Formação Botucatu. São materiais arenosos, pouco coesivos, e com areias bem selecionadas. Apresenta características de um material que foi retrabalhado. De uma forma geral, os valores da resistência física desses pontos estão entre 1 a 2Mpa, indicando um material com baixa coesão, com exceção do ponto P30, que o valor da resistência física a penetração pode atingir até 3Mpa. Estes valores são semelhantes aos materiais arenosos estudados por Stolf (1990), para os quais obteve os valores de 1,76Mpa para solos arenosos moles e 2,17Mpa para solos arenosos duros, utilizando o mesmo tipo de penetrômetro.

Segundo Aguiar (1989) esses materiais inconsolidados transportados arenosos I, ocorrem recobrando os materiais residuais da Formação Botucatu, sendo um material relativamente homogêneo, e classifica-os quanto à compactidade como fofos a mediamente compactos, através de dados obtidos por sondagens SPT.

4.5.3.2 ATERRO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Na área de aterro de resíduos de construção civil, foram realizados os ensaios P6, P6a, P6b, P7, P8, P9a, P9b, P9c, P10, P11, P12, P16, P17, P17b, P17c, P17d, P19, P19b, P20a, P20b, P20c, P21, P23, P24a, P24b, P25 P27, P28 e P31. Os valores da resistência física a penetração desses pontos pode ser vista nos Anexos 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20, e

nas Figuras 84, 85, 86, 87, 88, 89 e 90. Os pontos com nomenclatura a, b, c (exemplo ponto P19a), foram os realizados quando o primeiro ensaio (a) deu impermeável; registrava-se os dados desse furo, e realizava um novo ensaio (b) em uma distância máxima de 1 metro do primeiro. Quando o segundo também era impenetrável, fez-se um terceiro (c) Em alguns pontos, foi possível penetrar até a profundidade de 60cm, em outros, não foi possível, devido ao fato de existir fragmentos de grande diâmetro (telhas, concreto, asfalto), impedindo a penetração do penetrômetro.

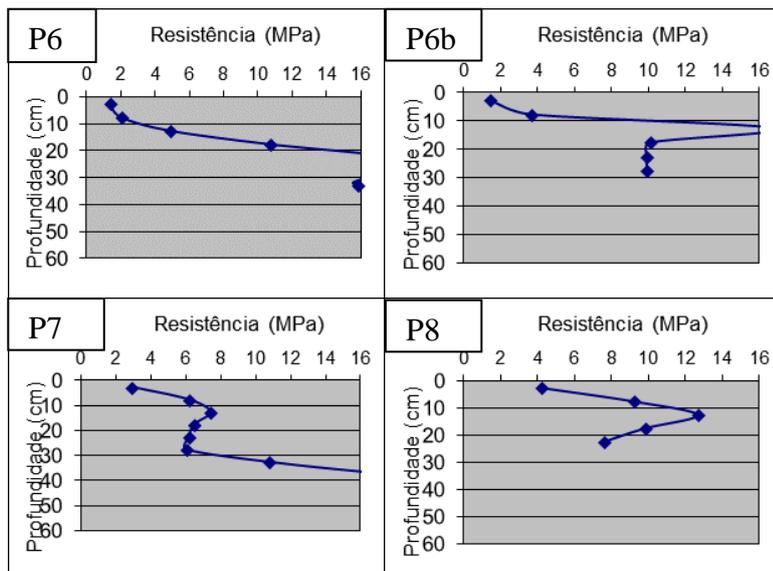


Figura 84 Valores da resistência física a penetração dos pontos P6a, P6b, P7 e P8, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

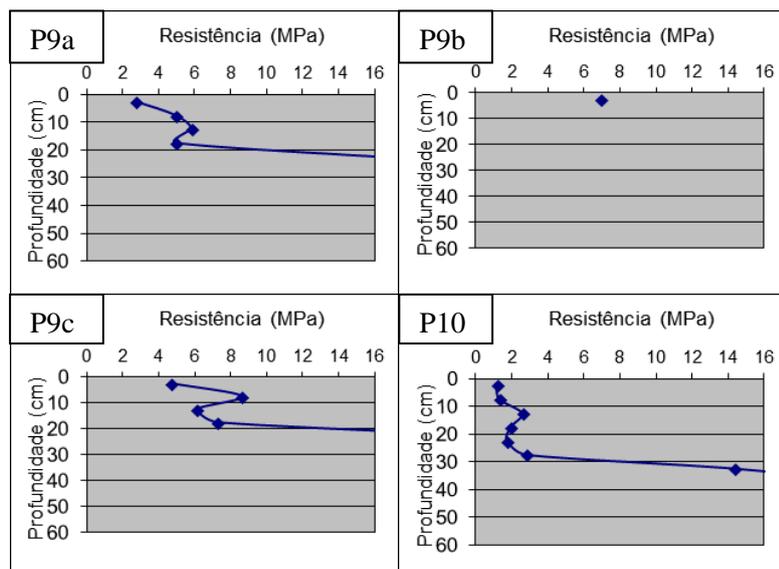


Figura 85 Valores da resistência física a penetração dos pontos P9a, P9b, P9c e P10, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

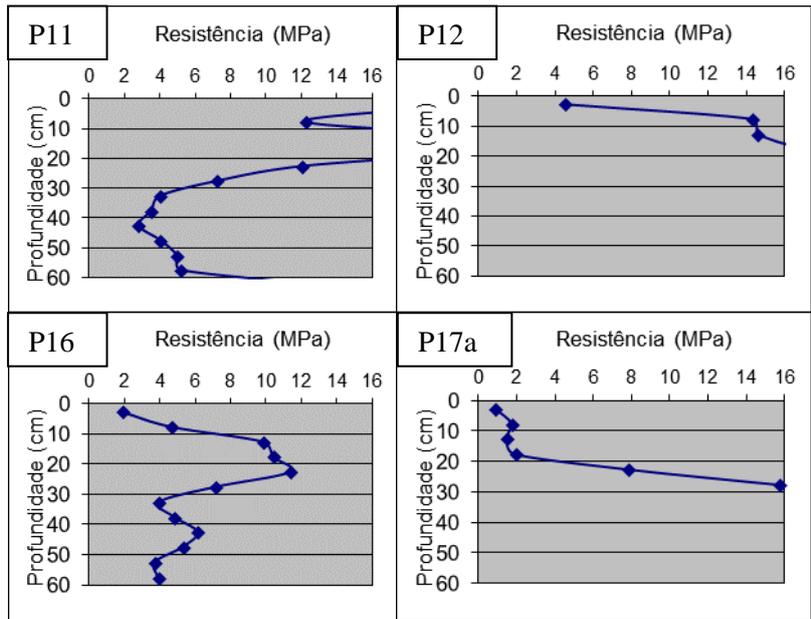


Figura 86 Valores da resistência física a penetração dos pontos P11, P12, P16 e P17a, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

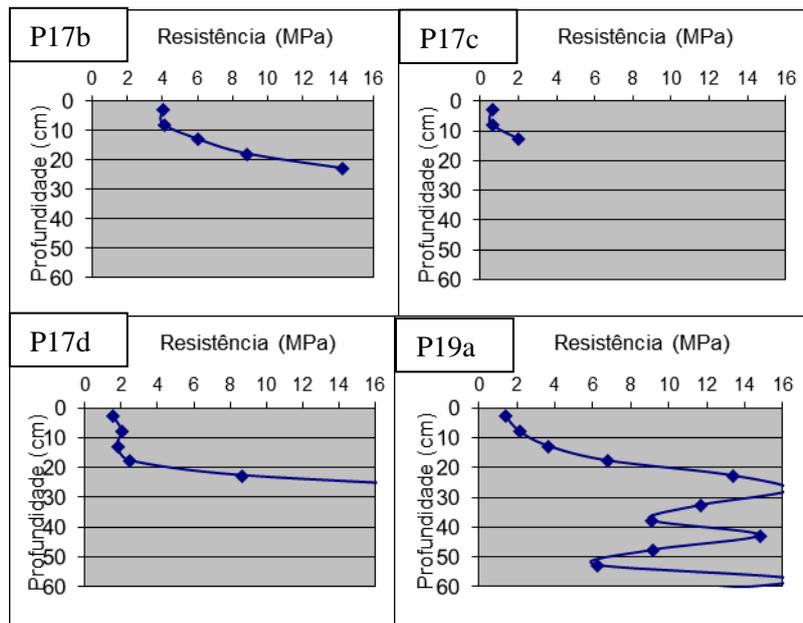


Figura 87 Valores da resistência física a penetração dos pontos P17b, P17c, P17d e P19a, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

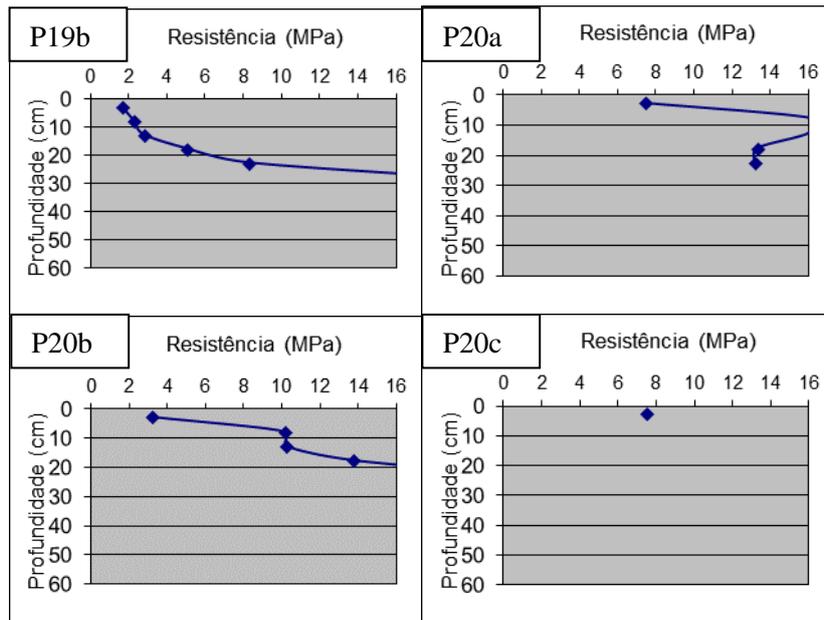


Figura 88 Valores da resistência física a penetração dos pontos P19b, P20a, P20b e P20c, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

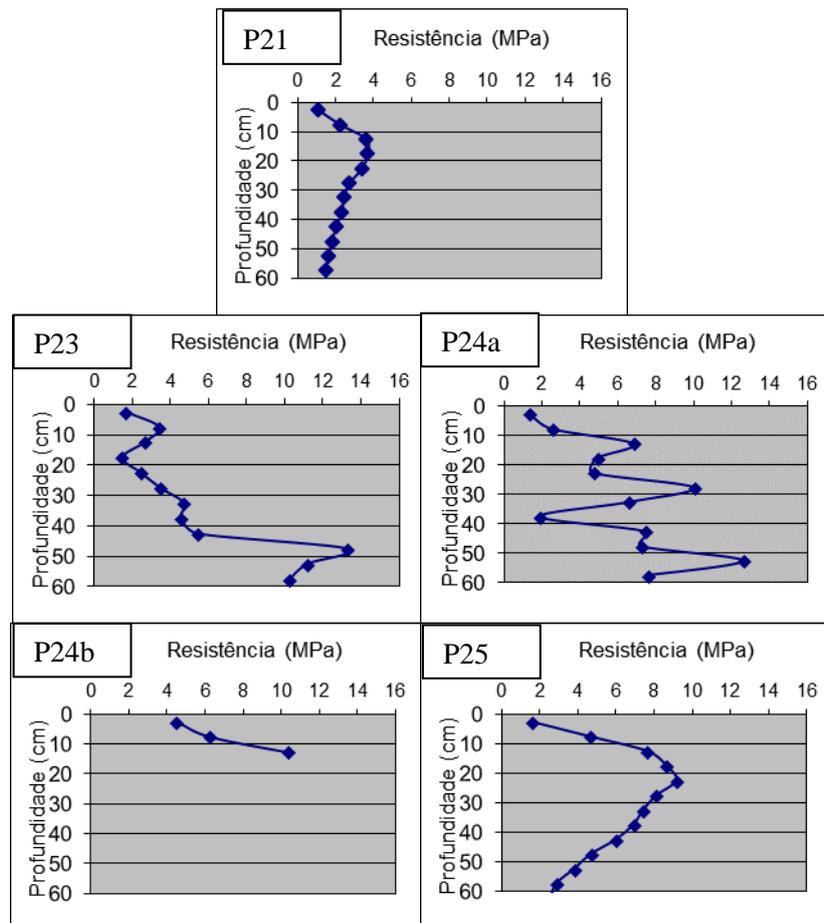


Figura 89 Valores da resistência física a penetração dos pontos P21, P23, P24a, P24b e P25, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

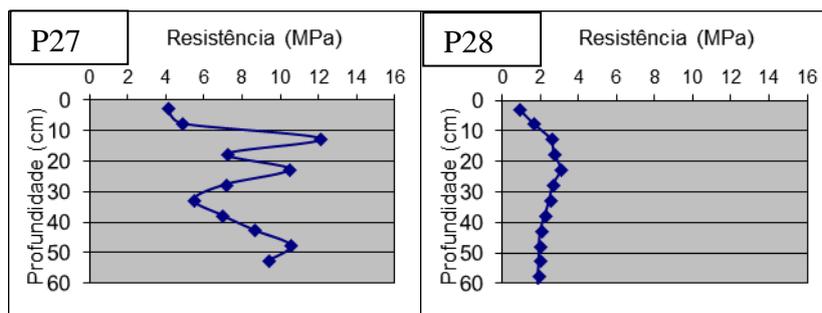


Figura 90 Valores da resistência física a penetração dos pontos P27 e P28, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor

Na área de aterro de resíduos de construção civil, os valores de resistência à penetração são completamente heterogêneos, sendo que a maioria dos pontos não apresenta um padrão entre as camadas em profundidades, podendo ocorrer camadas apenas lançadas no perfil. A maioria dos perfis pontuais não apresenta um padrão entre as camadas, podendo ocorrer materiais com baixa resistência e poucos centímetros abaixo esse valor aumentar drasticamente. Esse fato ocorre devido à heterogeneidade dos materiais que compõem o aterro, que são materiais de composição diferente que se sobrepõem. Observa-se que, em pontos com maior tráfego de veículos, como por exemplo, os pontos P17, P12, P05, P8, que ficam exatamente onde os caminhões passam para depositar os resíduos, apresentam um maior valor de compactação, quando comparados com outros locais dentro do aterro.

Em geral, após atingir uma profundidade de 10cm, tem-se um aumento da resistência física à penetração. Provavelmente, esse aumento se deve ao fato que, como consta no projeto do aterro (SILVA LEME, 2010), foi proposto que na finalização fosse colocada uma camada superficial de solo misturada com agregados finos. Existe também a possibilidade que esse material mais superficial tenha sido compactado com o auxílio de uma máquina quando do encerramento e posteriormente tenha havido novos lançamentos ou simplesmente, pelo intemperismo, o material já está se desagregando nos primeiros centímetros do aterro.

4.5.3.3 RESÍDUOS SUPERFICIAIS

Na área de resíduos superficiais, foram realizados os ensaios P1, P2, P3, P4, P5, P13, P18, 26, P31 e P32. Os valores da resistência física à penetração desses pontos podem ser vistos no Anexo 3 nas Figuras 91 e 92.

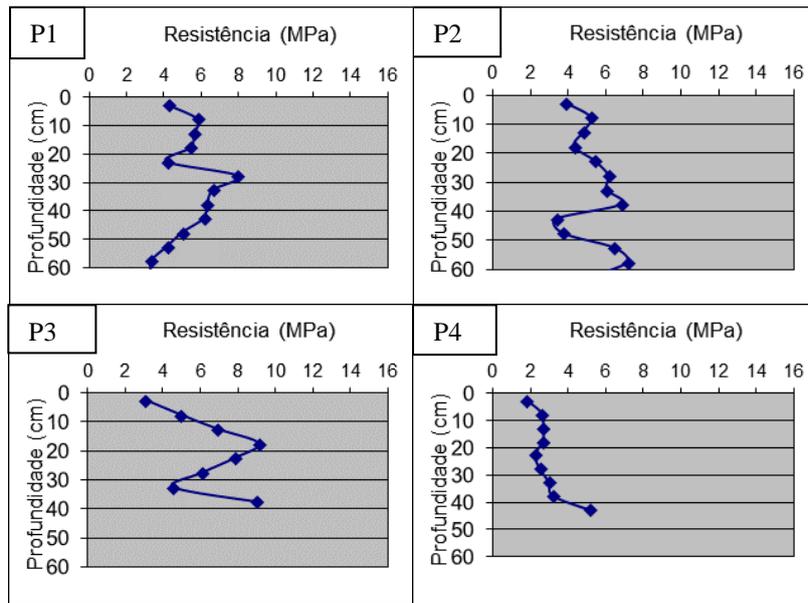


Figura 91 Valores da resistência física a penetração dos pontos P1, P2, P3 e P4, em área de resíduos superficiais. Fonte: autor.

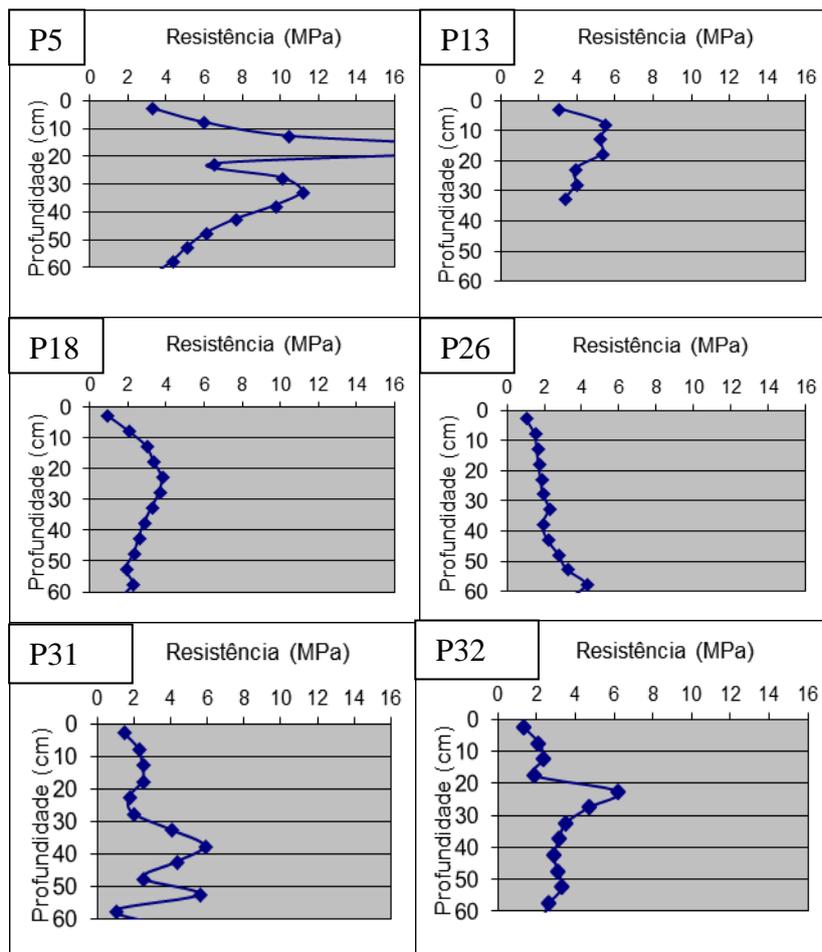


Figura 92 Gráfico com valores da resistência física a penetração dos pontos em área resíduos superficiais, P5, P13, P18, P26, P31 e P32. Fonte: autor

Essa área com resíduos depositados apenas de forma superficial apresenta também um maior valor de resistência física à penetração, quando comparados com materiais inconsolidados naturais. Apresentam valores de resistência próximos aos encontrados em as áreas menos compactadas do aterro, mas em geral, os valores são inferiores às áreas de aterro. Portanto, essa área apresenta resistência à penetração intermediária, principalmente por estar em locais com menor tráfego de veículos, e por esses materiais não estarem compactados. Apresentam em geral um comportamento caótico, como por exemplo, o ponto P5, que entre 10 a 20cm de profundidade, apresenta um valor físico a penetração de 16Mpa, e na camada de 20 a 30cm esse valor cai drasticamente para 6Mpa.

4.5.4 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

Os ensaios de permeabilidade foram realizados em materiais inconsolidados naturais nos pontos I7 e I8, em resíduos superficiais nos pontos I2, I5 e em resíduos de aterro de construção civil nos pontos I1, I3, I4, I6, I9 e I10, conforme indicado na Figura 93.

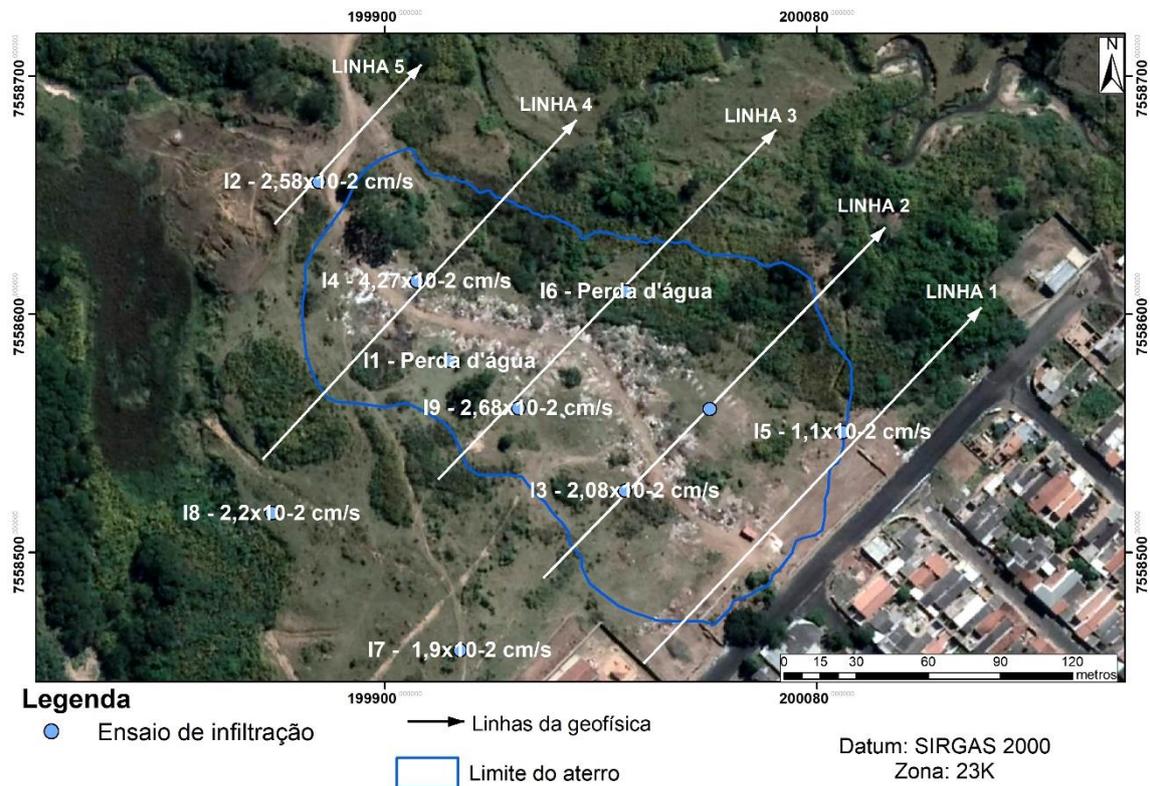


Figura 93 Localização dos ensaios de rebaixamento, com seus respectivos valores de condutividade hidráulica.

4.5.4.1 PERMEABILIDADE EM MATERIAIS INCONSOLIDADOS NATURAIS

Os valores da condutividade hidráulica (K), tempos de rebaixamento e a profundidade dos ensaios realizados em área natural encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 Profundidade, tempo do ensaio e valor da condutividade hidráulica (k) em materiais naturais.
Fonte o autor

Número do Ponto	Profundidade da sondagem	Δt	K (condutividade hidráulica)
I7	65cm	59s	$1,9 \times 10^{-2}$ cm/s
I8	52cm	51s	$2,2 \times 10^{-2}$ cm/s

Observando essa tabela, é possível perceber que de uma forma geral, os valores de condutividade hidráulica são elevados, de $1,9 \times 10^{-2}$ cm/s no ponto I7 e $2,2 \times 10^{-2}$ cm/s no ponto I8. Considerando os valores esperados para cada faixa granulométrica (Figura 94), os valores encontrados estão de acordo com o esperado para solos arenosos, de 1 a 10^{-3} cm/s.

K (cm/s)	10^2	1	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}
SOLO	pedregulhos	areias	areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos	argilas		

Figura 94 Valores médios das taxas de infiltração, de acordo com a faixa granulométrica.
Fonte: ABGE (2013)

Para areias, quanto menor a presença de finos, maior a condutividade hidráulica, devido ao fato que, a ausência de materiais do tamanho silte e argila, geram maior número de poros no material como um todo, facilitando a percolação de água nesse meio.

Nos ensaios de granulometria, observa-se que nos materiais inconsolidados arenosos naturais a porcentagem de areia fina e média variou de 86,3% a 84,4%. Os valores de finos não ultrapassaram 5,1%.

4.5.4.2 PERMEABILIDADE EM ÁREA DE ATERRO

Os valores da condutividade hidráulica (K), tempos de rebaixamento e a profundidade de cada ensaio, para a área de aterro, estão na Tabela 21.

Tabela 21 Profundidade, tempo do ensaio e valor da condutividade hidráulica (k) em área de aterro.
Fonte: autor.

Número do Ponto	Profundidade da sondagem	Δt	K (condutividade hidráulica)
I1	56cm	Perda d'água	
I3	43cm	54s	$2,08 \times 10^{-2}$ cm/s
I4	54cm	25s	$4,27 \times 10^{-2}$ cm/s
I6	45cm	Perda d'água	
I9	61cm	42s	$2,68 \times 10^{-2}$ cm/s
I10	40cm	244s	$4,01 \times 10^{-3}$ cm/s

Por essa tabela, é possível perceber que, assim como em materiais naturais, os valores de condutividade hidráulica são elevados. Nesse local, isso ocorre devido ao fato que esses materiais não foram compactados, apenas despejados, tornando os valores de condutividade hidráulica mais elevados. E também devido à grande variação de tamanho dos entulhos, associados com solos e outros tipos de materiais. Com isso, tem-se a formação de uma grande quantidade de vazios, permitindo que a infiltração da água no terreno crie diversos caminhos preferenciais, tornando os valores de condutividade hidráulica altos.

Nos pontos I1 e I6 ocorreu perda d'água. Durante o a perfuração com o trado manual foi possível observar uma grande quantidade de vazios. Essas regiões ocas () (Figura 95) criam caminhos preferencias para a água, fazendo com que ocorresse perda de água. Esse fato ocorre devido ao tamanho das partículas que o compõe, sendo observado durante a perfuração, no entorno da região do furo, fragmentos grandes de resíduos de construção civil, como telhas e tijolos.



Figura 95 Presença de vazios no ponto I1

O ponto I10, foi o que apresentou o menor valor de condutividade hidráulica ($4,01 \times 10^{-3}$), entre todos os pontos ensaiados. Uma explicação desse fato se dá devido a uma maior porcentagem de finos, quando comparados com outros pontos em área de aterro, apresentando 6,5% de silte e argila, e uma menor porcentagem de materiais grosseiros, 44%

Nos pontos I4 e I9 a condutividade hidráulica foi elevada, da ordem de 10^{-2} cm/s. Os valores foram maiores no ponto I4 que apresenta 64,1% de materiais grossos, em relação ao ponto I9, que apresenta 88,1% de areia fina e média e 4% de argila e silte. Nesses pontos, assim como no ponto I10, não se observou, quando na execução da perfuração, a presença visível de espaços vazios.

4.5.4.3 PERMEABILIDADE EM ÁREA DE RESÍDUOS SUPERFICIAIS

Os valores da condutividade hidráulica (K), tempos de rebaixamento e a profundidade de cada ensaio, para a área de resíduos superficiais estão na Tabela 21.

Tabela 22 Tabela 10 Profundidade, tempo do ensaio e valor da condutividade hidráulica (k) em área de resíduos superficiais. Fonte: autor.

Número do Ponto	Profundidade da sondagem	Δt	K (condutividade hidráulica)
I2	55cm	44s	$2,58 \times 10^{-2}$ cm/s
I5	47cm	93s	$1,1 \times 10^{-2}$ cm/s

Nos ensaios de permeabilidade, realizados em área de resíduos superficiais, atingiu-se com nas sondagens os materiais inconsolidados naturais, correspondentes aos Transportados Arenosos I. A camada de resíduos superficiais tem no ponto I2 a espessura de 55cm, e no I5 de 47cm. Com isso, de certa forma, esses ensaios de permeabilidade foram realizados em materiais naturais, embora no processo de ensaio ocorra a saturação também dos resíduos em contato.

Os valores de condutividade hidráulica para esses materiais foram altos, sendo de $2,58 \times 10^{-2}$ cm/s para o ponto I2 e $1,1 \times 10^{-2}$ cm/s para o ponto I5. Ainda que no ponto I5, o valor de condutividade hidráulica seja alto, ele é um pouco menor que os encontrados em áreas com presença de material inconsolidado natural.

5 COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Uma vez com a cava aberta, devido ao fato de a área se situar em uma local fora da vista dos moradores, iniciou-se os processos de deposição de entulhos, como restos de construção civil, lixos domésticos, restos de madeira, entre outros. Como a área não havia sido preparada para isso, esse depósito antropogênico tem representado um problema ambiental.

No levantamento geofísico, a área de aterro é marcada por um valor alto de resistividade, variando de 360 a 4000 Ω .m, devido à grande presença de materiais antropogênicos, principalmente rejeitos de resíduos de construção civil, como tijolos, concretos e outros. Além disso, os dados de permeabilidade sobre os resíduos indicam a elevada capacidade de drenagem interna. Este fato corrobora a escassez de umidade nos materiais para o aumento de resistividade elétrica.

Tanto o ensaio geofísico quanto o de resistência física a penetração foram realizados em épocas de baixa pluviosidade, sendo o primeiro realizado em julho de 2018, e o segundo em julho de 2017. Isso afeta diretamente os resultados. No caso da geofísica,

permitiu uma melhor visualização da pluma de contaminantes, já que se esse ensaio fosse realizado em um período chuvoso, a infiltração da água no solo poderia aumentar a diluição da pluma de contaminante, fazendo com que a resistividade desses locais fosse maior. Com isso seria difícil delimitar essas áreas no perfil geofísico. Para o ensaio de resistência física a penetração, o valor da umidade teve um impacto pequeno. Hassan (1966), que estudou os efeitos da granulometria do solo na utilização do penetrômetro de impacto dinâmico, afirma que para materiais grosseiros, a umidade não é um fator tão capaz de provocar grandes variações nos valores obtidos em campo. Isso se dá devido ao fato que para solos granulares, o que confere a resistência física a penetração são os materiais grosseiros que compõem esse solo.

Os materiais que compõem o aterro de resíduos de construção civil, por serem mais resistivos, aumentam o valor da resistividade elétrica dessa área, sendo possível assim delimitar a área de aterro de resíduos de construção civil e sua profundidade. A área de aterro, apresenta locais que a profundidade das camadas de resíduos de construção civil pode chegar a 20 metros. Em geral, apresenta uma profundidade média de 10 metros, podendo em outros locais ser inferior a 1 metro. Já as áreas com materiais inconsolidados naturais, apresentam uma resistividade variando de 100 a 500 Ω , sendo o valor predominante de 150 Ω . Foi possível também observar com a geofísica, a presença do arenito silicificado da Formação Botucatu, apresentando uma elevada resistividade, normalmente superior a 4000 Ω . As áreas com presença de contaminantes, apresentam resistividade inferior a 100 Ω , predominando o valor de 11 Ω .

A elevada conectividade de poros que caracterizam um aquífero possibilita uma distribuição homogênea de água e umidade permanente. Neste sentido, os dados geofísicos indicam materiais arenosos com propriedades aquíferas. A disposição inadequada de resíduos de construção civil neste local resulta num claro impacto ambiental a um importante aquífero regional (Guarani), devido ao aporte direto e rápido de contaminantes inorgânicos (chorume).

Como pode ser analisado a partir do levantamento geofísico, as áreas de lançamento de esgoto no córrego da Água Quente têm influenciado diretamente na formação de plumas de contaminantes em subsuperfície. O Córrego da Água Quente encontra-se próximo da área do aterro na cota de 728m e a pluma de contaminante tem profundidades superiores a 50m (cota de 678m). A parte mais alta do aterro encontra-se na cota de 741m.

Com isso, esses contaminantes são capazes de afetar a captação de água em poços profundos. Uma vez que 60% da água de São Carlos é captada por poços profundos (SOUZA, 2019), esses contaminantes podem levar sérios danos a população de São Carlos, já que esses contaminantes podem estar contidos na água captada pelos poços de abastecimento no bairro Cidade Aracy.

Na área de resíduos de construção civil, como é depositado materiais não inertes conjuntamente, tem-se a formação de plumas de contaminantes verticais. Em geral, as plumas geradas devido ao lançamento de efluentes no Córrego da Quente possuem tamanhos maiores que as geradas pela área de aterro. Com isso, em profundidades maiores, geralmente superiores a 20 metros, tem-se a formação de uma enorme pluma de contaminantes, sendo proveniente da infiltração dos dois ambientes citados anteriormente.

Com relação à resistência à penetração das camadas superficiais, observa-se que a área de aterro de resíduos de construção civil apresenta os maiores valores (podendo chegar a 16Mpa), com destaque para os locais onde ocorre um maior tráfego de veículos (pontos C12, C16 e C 19, Anexo 1). Nos locais de material inconsolidado natural ocorrem os menores valores de compacidade, normalmente inferiores a 2Mpa; as áreas de resíduos superficiais são as que apresentam valores intermediários, quando comparadas com os dois anteriores. Nas áreas de aterro não existe um padrão, tornando os valores de compacidade caóticos, podendo variar drasticamente em profundidade. Essas mudanças bruscas se devem à variação do tamanho dos materiais que compõem esse aterro, ou mesmo a presença de espaços vazios nesse local, além de uma possível maior ou menor compactação.

Para a ocupação urbana e criação de habitações de baixa renda pela ProHab, a área se mostra como inviável. Esse fato ocorre primeiramente, devido à grande presença de matéria orgânica na área de aterro. A elevada condutividade hidráulica dos materiais que compõem o aterro permite uma rápida infiltração da água, elevando a taxa de decomposição da matéria orgânica. Assim, é gerada uma grande quantidade de espaços vazios, em profundidade, na área de aterro. Existe também uma grande quantidade de vazios gerados por os materiais serem apenas lançados na deposição, não havendo uma compactação, e também devido à heterogeneidade da granulometria desses materiais maiores, gerando também espaços vazios.

A presença de espaços vazios pode ser observada nos resultados do ensaio utilizando o penetrômetro de impacto, em que os valores de resistência física a penetração

varia drasticamente em profundidade. Esse exemplo pode ser caracterizado pelo ponto P11, que as camadas entre 10 a 20cm apresentam um valor de resistência física à penetração de 16Mpa, e na camada entre 40 a 50cm esse valor cai para 2Mpa, ou o ponto P19a, que a camada entre 20 a 30cm possui um valor de resistência física à penetração de 16Mpa, e na camada entre 50 a 60 cai para 6Mpa (ANEXO 1).

Devido a esses fatores descritos anteriormente, a área de estudo não se configura como um lugar ideal para a implantação de habitações de baixa renda. Ramachandran, Jayamohan e Beena (2016) afirmam que a presença de vazios em profundidade em um terreno pode provocar sérios danos à estabilidade de uma fundação, sendo que a gravidade dos danos depende do grau de proximidade desses vazios tanto lateral como vertical. Com isso, nas condições atuais, a área de estudo não fornece suporte para fundações rasas, devido a grande quantidade de vazios presentes na área de aterro, podendo gerar recalque das estruturas.

Com relação à utilização desse aterro para a criação de um parque, que é o definido para parte da área (SÃO CARLOS, 2016), devido ao alto valor de resistência física à penetração, se torna inviável o crescimento radicular. Taylor, Roberson e Parker (1966) apresentam o limite de 2,5Mpa para a resistência física que permite o desenvolvimento de raízes. Na área de aterro, os valores de compactação são muito superiores a esse, podendo chegar a 16Mpa. Com isso, a área de estudo permitiria apenas o crescimento de vegetações rasteiras, ou árvores sem raízes profundas sujeitas a queda. Uma possível solução para esta área seria compactar a superfície e aplicar uma fina camada de solo de boa qualidade sobre toda área de aterro (aproximadamente 50cm), e utilizar esta área como uma praça, com presença de jardins (contendo apenas vegetações rasteiras). Seria importante uma análise de contaminantes prévia.

Devido ao fato de o aterro ser composto por materiais de granulometria grossa, locais que apresentam elevado valor de compactação não necessariamente apresentam valores menores de condutividade hidráulica. O que confere um valor variável de resistência física à penetração nesses materiais é a dificuldade do penetrômetro atravessar os fragmentos grosseiros, sendo influentes, conforme Hassan (1996), o grau de uniformidade e a densidade dos mesmos. Em materiais de aterro finos, esse valor é afetado além da granulometria, pela estrutura, umidade e densidade desses materiais. Com isso, os valores de resistência física à penetração da área de aterro grosso não podem ser comparados com os valores obtidos em áreas naturais, só os de aterro predominantemente de solos.

No I10, que apresenta o menor valor de condutividade hidráulica ($4,01 \times 10^{-3}$), apesar do elevado valor de compacidade, não é esse valor que determina esse valor de condutividade hidráulica menor. Como pode ser visto, na região desse ponto os valores de resistência física a penetração é elevada, chegando a 16Mpa nos pontos P10 e P11. Mas o que determina uma menor condutividade hidráulica para essa região é a quantidade de finos, que totalizam 6%, e menor quantidade de materiais grosseiros, quando comparados com as outras áreas de aterro.

No ensaio de permeabilidade em área natural, os valores de condutividade hidráulica também são elevados e apresentam valores próximos aos obtidos em áreas de aterro, sendo da ordem de 2×10^{-2} cm/s. Para estes materiais os valores de condutividade hidráulica altos apresentam a relação já descrita por diversos autores de correspondência a valores de compacidade baixos, da ordem de 2 Mpa no caso dos materiais inconsolidados arenosos ensaiados. Estes resultados se relacionam às características granulométricas destes materiais: uniformidade das partículas, apresentado em torno de 61 % de areia e teores de finos inferiores a 3,8%.

Nos pontos do ensaio de permeabilidade I1 e I6, ocorreu perda d'água, não sendo possível obter o valor da condutividade hidráulica. Esse fato é devido a uma grande quantidade de vazios, formados devido a uma má compactação no local. Pode ser observada a presença de espaços vazios durante a perfuração com o trado manual, fazendo com que ocorresse a perda d'água nesses pontos.

Vale ressaltar que essa área se encontra em desacordo com o que consta a NBR 15113 (ABNT, 2004b) que afirma que para a instalação de um aterro de resíduos de construção civil, deve-se observar diversos parâmetros, entre eles a geologia e a vulnerabilidade do aquífero. Observa-se, através dos ensaios de condutividade hidráulica, que os solos arenosos transportados I (solo natural na área de estudo), apresentam uma característica drenante, o que não é ideal para instalação de um aterro (área que receberá contaminantes).

Partindo de todas essas análises, foi gerado um mapa da área de estudo, conforme indicado a Figura 89.

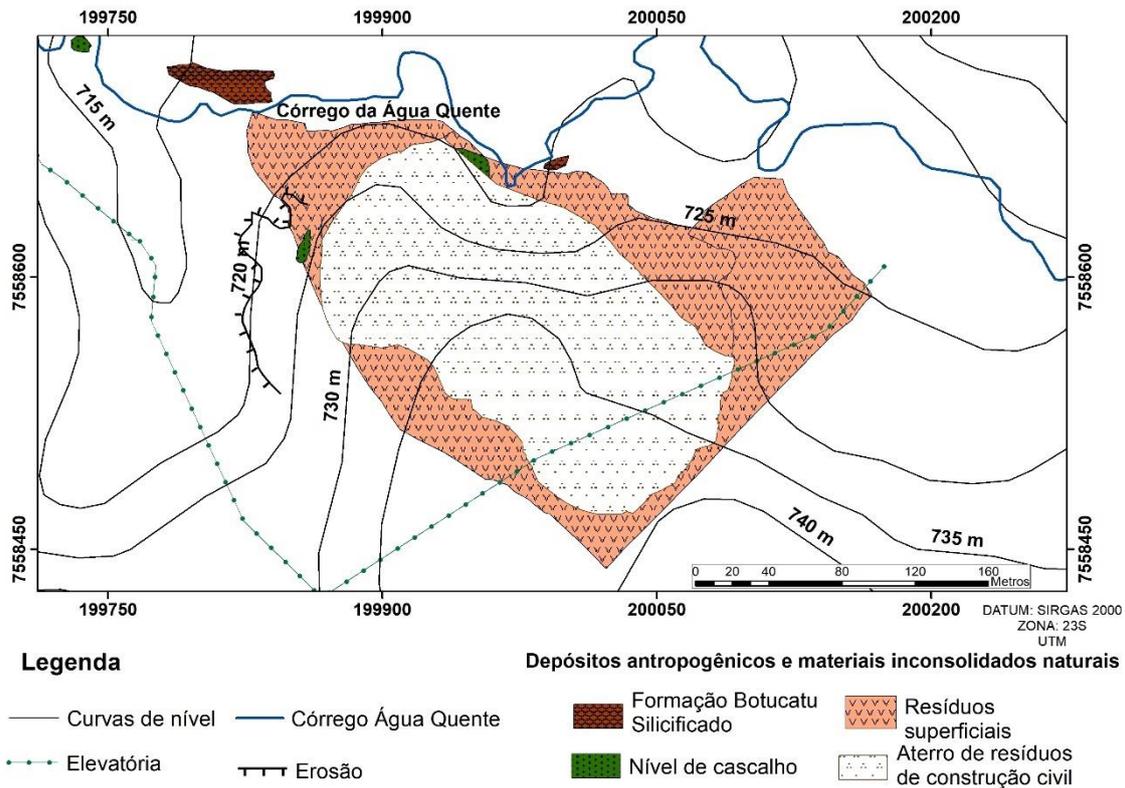


Figura 96 Mapa da área de estudo

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi mostrada a importância dos estudos sobre depósitos antropogênicos, que vem a cada ano aumentando o número de artigos publicados e o total de citações nos trabalhos. Apesar disso, as análises bibliométricas indicam um pequeno engajamento de pesquisadores brasileiros neste campo de pesquisa. Mas de uma forma geral, apesar do crescimento do número de publicações nos últimos anos, o número de artigos publicados nesse tema pode ser considerado pequeno, dada a complexidade desta área de estudo. Com isso, neste trabalho fez-se uso dos artigos dos autores mais produtivos, que foram listados na pesquisa bibliométrica, como S. J. Price, H. P. Blume, A. H. Cooper, entre outros.

Dentro os artigos pesquisados, poucos procuravam obter características físicas dos depósitos antropogênicos. Neste trabalho, através dos métodos geotécnicos e geológicos aplicados foi possível obter características de um depósito antropogênico. Com isso, essa metodologia pode ser replicada, e utilizada para outros depósitos antropogênicos

heterogêneos, como locais contendo resíduos industriais ou mesmo aterro de resíduos sólidos urbanos.

De uma forma geral, os valores de condutividade hidráulica são elevados, tornando esses locais vulneráveis à contaminação, podendo ocorrer de forma rápida a infiltração no subsolo de contaminantes oriundos dos próprios resíduos aterrados, afetando assim as águas subterrâneas. Em geral, os valores de condutividade hidráulica são próximos em todos os pontos (em torno de 2×10^{-2} cm/s). Esse alto valor de condutividade permite também um rápido consumo da matéria orgânica num curto espaço de tempo. Esses valores elevados se justificam devido ao grande tamanho das partículas que compõem a área de aterro.

Comparando o ensaio de compactação com os valores de condutividade hidráulica, observa-se que, não necessariamente uma área que apresenta um valor elevado de compactação, significa em um menor valor de condutividade hidráulica. Esse fato se justifica, por se tratar de uma área de aterro, possuindo materiais de dimensões variadas, gerando uma grande quantidade de espaços vazios nesse depósito. Os ensaios são importantes para dar características aos depósitos, mas as relações que se observam em solos, especialmente os mais finos, não valem para os materiais grosseiros e heterogêneos. Apesar de não ter sido realizados ensaios em profundidade, pode-se dizer que os ensaios realizados são representativos para profundidades superiores a 60cm. Isso ocorre devido ao fato que em profundidades superiores a que foi ensaiado, o aterro é composto pelo mesmo tipo de material, como pode ser visto em fotos históricas, indicando continuidade das características observadas em superfície.

Para os materiais de aterro mais semelhantes a solos, estes ensaios de permeabilidade e resistência à penetração podem ser considerados em outros depósitos, complementando-se o que apresenta ISO 14688 (ISO, 2018).

Observa-se nas amostras coletadas nos pontos onde foram realizados os ensaios de permeabilidade, uma grande presença de materiais grossos em área de aterro. Entre esses materiais, a grande maioria é composta por fragmentos antropogênicos, como telhas, rochas, borrachas, madeira, plástico, concreto, tijolos e outros.

A geofísica apresentou uma resposta satisfatória, sendo possível delimitar os locais com presença de resíduos de construção civil e suas espessuras, as plumas de contaminantes, o nível de água, os locais de ocorrência do arenito silicificado da Formação Botucatu. Com relação às plumas de contaminantes, são formadas tanto pelos resíduos

que são depositados em área de aterro, quanto pela infiltração dos contaminantes que são lançados no Córrego da Água Quente, provavelmente acima dos arenitos silicificados.

Foi constatada uma grande dificuldade para a realização das perfurações para a realização do ensaio de permeabilidade e coleta de amostras, devido ao fato da presença de fragmentos de antropogênicos com diâmetro grosseiro. Para essa tarefa, foram utilizadas diversas outras ferramentas. Com isso, para terrenos com essa característica, uma sondagem SPT se torna inviável.

Com os ensaios de resistência física a penetração, e juntamente com a amostragem dos materiais, foi possível observar a existência de locais com baixa compactidade, e muitos locais com ausência de materiais, gerando pequenas crateras. No ensaio de permeabilidade, foi possível observar locais com fuga d'água. Com isso, torna-se inviável a utilização dessa área para a instalação de habitação social, uma vez que para utilização de uma área para construção civil, é preciso de características conhecidas de resistência dos materiais. Como esse depósito é muito heterogêneo, com grande presença de vazios, o local não oferece condições para a instalação de fundações. Sendo assim, torna-se inviável utilizar essa área para instalação de moradias de baixo curso. Para a instalação de um parque, o fato de os valores de resistência física à penetração em diversos pontos de a área de aterro serem altos, impedem o crescimento e desenvolvimento de raízes sobre os resíduos. Uma possível solução para essa área, sereia aplicar uma fina camada de solo, e utilizar esse local como uma praça pública, com a presença de jardins, bancos e quiosques.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEM. **Instruction Manual Terrameter LS**, Suécia, 122f. 2012.

ABGE. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. **Manual de sondagens. 5º edição**. São Paulo-SP. 203f. 2013.

ABGE. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 2013. **Ensaio de Permeabilidade em Solos: orientações para a sua execução no campo**. 4.ed. São Paulo - SP. 75f. 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502 – Rochas e Solos**. Associação Brasileira de Normas e Técnicas: Rio de Janeiro,1995.

_____. **ABNT NBR NM 248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Associação Brasileira de Normas e Técnicas: Rio de Janeiro, 2003.

_____. **ABNT NBR 6458** – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Associação Brasileira de Normas e Técnicas: Rio de Janeiro, segunda edição, 2016a.

_____. **ABNT NBR 15113** – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Associação Brasileira de Normas e Técnicas: Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **ABNT NBR 10004** – Resíduos Sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas e Técnicas: Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **ABNT NBR 10007** – Amostragem de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas e Técnicas: Rio de Janeiro 2004.

_____. **ABNT NBR 15.116** – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e concretos sem função estrutural – requisitos. 12p. Associação Brasileira de Normas e Técnicas: Rio de Janeiro, 2004c.

_____. **ABNT NBR 7181** – Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas e Técnicas: Rio de Janeiro, 2016.

_____. **ABNT NBR 8044** – Projeto geotécnico – Procedimento. Associação Brasileira de Normas e Técnicas: Rio de Janeiro, 2018

AGUIAR, R. L. **Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana de São Carlos-SP: Contribuição ao planejamento**. 1989. 104f. Dissertação (Mestrado Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos-SP, 1989.

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização Física e Classificação do Solo**. Universidade Federal de Juiz de Fora: Departamento de Transporte. 2005. 145p. Apostila. Disponível em:<http://ufrj.br/institutos/it/deng/rosane/downloads/material%20de%20apoio/APOSTILA_SOLOS.pdf>. Acesso: 24/02/2019

BAHSAN, E. et al. Geotechnical characteristics of Bantargebang solid landfill waste using a laboratory test on artificial waste samples and a field test. **International Journal of Technology**, v. 6, p. 1012–1020, 2017.

BECKETT, C. T. S. et al. Evaluation of the dynamic cone penetrometer to detect compaction in ripped soils. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 150–157, 2018.

BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 581 – 586, 2004.

Bibliometrix R Package. 2016. Massimo Aria & Corrado Cuccurullo. Disponível em:<<http://www.bibliometrix.org/>> Acesso em: 11 de setembro de 2017.

BORTOLIN, J. R. M.; MALAGUTTI FILHO, W. Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 367–374, 2010.

BLUME, H. P. Classification of soils in urban agglomerations. **Catena**, v.16, n.3, p.269-275, 1989

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 307 – **Dispõe sobre a gestão dos resíduos de construção civil**. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2002. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/lei/111762.htm. Acesso: Março de 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 396 – **Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências**. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2008. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>. Acesso em: Março de 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 431 – **Altera o art. 3º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso**. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2011. Disponível em: http://site.sabesp.com.br/uploads/file/asabesp_doctos/kit_arsesp_portaria2914.pdf. Acesso em: março de 2018.

BRASIL. **Decreto nº7.404/2010, de 23 de janeiro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências**. Brasília, DF, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em março de 2018.

BROOKS, K.; ADAMS, C.; DEMSETZ, L. Germany's construction and demolition debris recycling infrastructure: what lessons does it have for the US? **Sustainable Construction**, p. 647–656, 1994.

BURGHARDT, W. Soils in Urban and Industrial Environments. **Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde**, v. 157, n. 3, p. 205–214, 1994.

CABRAL, J. J. S. P. Movimento das águas subterrâneas. In.: FEITOSA, F. A. C. et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Organização e coordenação científica: 3. ed., Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008.

CARMO, D. S.; MAIA, N. S.; CÉSAR, C. G. Avaliação da tipologia dos resíduos de construção civil entregues nas usinas de beneficiamento de Belo Horizonte. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n.2, 2012.

CARVALHO, F. R.; FUREGATTI, S. A. Variabilidade da resistência do solo à penetração do cone. In: 16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia Ambiental. São Paulo. 2018. **Anais...** São Paulo, 9 p.

CETESB. Decisão de diretoria nº 045/2014/E/C/I – **Dispõe sobre a aprovação dos valores orientadores para solos e águas subterrâneas do Estado de São Paulo – 2014, em substituição aos valores orientadores de 2005 e dá outras providências**. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2014. 4p. São Paulo – SP. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-256-2016-E-Valores-Orientadores-Dioxinas-e-Furanos-2016-Intranet.pdf>. Acesso em: Março de 2018.

CORDOBA, R. E. **Estudo do potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos de construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação**. 2014. 312f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos – SP, 2014.

COSTA, F. P. M.; NISHIYAMA, L. Utilização do permeâmetro guelph e penetrômetro de impacto em estudos de uso e ocupação dos solos em bacias hidrográficas 1. **Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 24, p. 131–143, 2007.

COSTA, S. C. F. E.; LUCENA, A. E. F. L.; SOUSA, T. M.; SILVA, G. G. Utilização de ensaios in situ para a determinação da capacidade de suporte de solos. **Anuário de Geociências da UFRJ**, v. 41, n. 2, p. 461 – 470, 2018.

CPRM. **Geologia e recursos minerais da folha Baía de Guanabara SF-23-Z-B-IV**. Escala 1:100.000. Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. Estado do Rio de Janeiro, 2012.

CRAUL, P. J. A description of urban soils and their characteristics. **Journal of Arboriculture**, v. 11, p. 330–339, 1985.

CRAUL, P.J. **Urban soils: Applications and practices**. New York: John Wiley, 1999. 366p.

CRUTZEN, P. The “anthropocene”. **Journal de Physique IV**, v. 12, p. 2–6, 2002.

CRUTZEN, P. J.; STOERMER, E. F. The Anthropocene. **Global Change Newsletter**, n. 41, p. 17–18, 2000.

DABI, Y. et al. Publication Trends in Bariatric Surgery: a Bibliometric Study. **Obesity Surgery**, v. 26, n. 11, p. 2691–2699, 2016.

DE BEER, J.; PRICE, S. J.; FORD, J. R. 3D modelling of geological and anthropogenic deposits at the World Heritage Site of Bryggen in Bergen, Norway. **Quaternary International**, v. 251, p. 107–116, 2012.

DE KIMPE, C. R.; MOREL, J. L. Urban soil management: a growing concern. **Soil Science**, v.165, n.1, p.31-40, 2000.

EDGEWORTH, M. The relationship between archaeological stratigraphy and artificial ground and its significance in the Anthropocene. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 395, n. 1, p. 91–108, 2014.

ELSEVIER. **SCOPUS**. Editora Elsevier. 2017 Disponível em: <<https://www.elsevier.com/americalatina/pt-br/scopus>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2018.

FORD, J. R. et al. An assessment of lithostratigraphy for anthropogenic deposits. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 395, p. 55–89, 2014.

FORD J. R. et al. **An Enhanced Classification of Artificial Ground**. **British Geological Survey**, Keyworth, Nottingham Open Report, OR/10/036, 32 p., 2010.

GADOTTI, R. F. Avaliação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao “lixão” da cidade de São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos – SP, 1997.

GE, Y.; MURRAY, P.; WENDERSHOT, W. H. Trace metal speciation and bioavailability in urban soils. **Environmental Pollution**, v. 107, p. 137-144, 2000.

GIACHETI, H. G.; ELIS, V. R.; RIYIS, M. T. Investigação geoambiental. In: ZUQUETTE, L. V. **Geotecnia Ambiental**. Rio de Janeiro – RJ. Elsevier Editora Ltda, 2015. 15-47p.

GOOGLE EARTH. **Google Earth Pro**. Versão 7.3.1.4507 (64-bit), 2018. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

GREGORY, J. et al. Effect of urban soil compaction on infiltration rate. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 61, n. 3, p. 117–124, 2006.

GUERN, C. L. et al. A typology of anthropogenic deposits as a tool for modeling urban subsoil geochemistry: example of the Ile de Nantes (France). **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, n. 2, p. 373-379, 2016.

HASSAN, A. **The effects of material parameters on dynamic cone penetrometer results for fine-grained soils and granular materials**. 1996. 134 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, 1996.

HASUI, Y. CARNEIRO, C. D. R., ALMEIDA, F. F. M. BARTORELLI, A. A Sub-Bacia Bauru: Um sistema continental entre deserto e cerrado. In:____. **Geologia do Brasil**. São Paulo: Ed. Beca. 2012. p. 520-544.

HERRICK, J. E.; JONES, T. L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 4, p. 1320, 2002.

HOWARD, J. L. Proposal to add anthrostratigraphic and technostratigraphic units to the stratigraphic code for classification of anthropogenic Holocene deposits. **Holocene**, v. 24, n. 12, p. 1856–1861, 2014.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Conheça cidades e estados do Brasil**. 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: dezembro/2017.

ICS. International Commission on Stratigraphy International **Chronostratigraphic Chart** 2018. Disponível em: <<http://www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2018.

IGC. Instituto Geográfico e Cartográfico. **Folha topográfica de São Carlos (São Carlos IV), SF-23 Y-A-I-1-NO-D**. Escala 1:10.000, 1989.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Chuva Acumulada Mensal x Chuva (Normal Climatológica 61-90), São Carlos – SP, para o ano de 2017**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/sim/abre_graficos.php>. Acesso: 20 de fevereiro de 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 14688** - Geotechnical investigation and testing -Identification and classification of soil – Part 1: Identification and description - National Standards Authority of Ireland: Irlanda, 2018.

JIM, C. Y. Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong. **Landscape and Urban Planning**, v.40, p.235-249, 1998.

JORDAN, H.; HAMILTON, K.; LAWLEY, R.; PRICE, S. J. Anthropogenic contribution to the geological and geomorphological record: A case study from Great Yarmouth, Norfolk, UK. **Geomorphology**, v. 253, p.534-546, 2016.

KEAREY, P. BROOKS, M. HILL, I. Electrical surveying. In: _____. **An Introduction to Geophysical Exploration**. THIRD EDIT. Blackwell study, 2002, p. 183-207.

LEHMANN, A.; STAHR, K. Nature and significance of anthropogenic urban soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 7, n. 4, p. 247–260, 2007.

LEWIS, S. L.; MASLIN, M. A. Defining the Anthropocene. **Nature**, v. 519, p. 171–180, 2015.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo-SP, EDUSP, 2005. 335p.

LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 169–176, 2013.

- LIMA, M. C. P. B. Processos urbanos em São Carlos, SP: duas bacias hidrográficas, dois momentos. In: XVII Enanpur, Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional. 2017. São Paulo, **Anais...** São Paulo – SP, 20 p.
- LIMA, R. P. DE; LEÓN, M. J. DE; SILVA, A. R. DA. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. **Revista Ceres**, v. 60, n. 4, p. 577–581, 2013.
- MACHADO, G. M. V. et al. Geohistorical evolution and the new geological map of the city. **Ocean and Coastal Management**, v. 151, p. 45–52, 2018.
- MADRID, L.; DÍAZ-BARRIENTOS, E.; MADRID, F. Distributions of heavy metals contents of urban soils in parks of Seville. **Chemosphere**, v.49, p.1301-1308, 2002.
- MARTINS, S. M. B.; FIGUEIREDO, R. A. Diagnóstico sobre o conhecimento da comunidade em uma área de recarga do Aquífero Guarani, região de São Carlos, SP, Brasil. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**. v. 6, n. 3, p. 465–477, 2010.
- MASSAD, F. **Mecânica dos solos experimental**. São Paulo, Oficina de Texto, 2016, 287p.
- MCMILLAN, A. A., POWELL, J. H. **BGS Rock Classification Scheme, Volume 4: Classification of artificial (man-made) ground and natural superficial deposits—applications to geological map and datasets in the UK**. British Geological Survey Research Report, RR 99-04. nNERC Copyright 1999 British Geological Survey, Nottingham, Contributors: Evans, C.D.R., Irving, A.A.M., Merritt, J.W., Morigi, A.N., Northmore, 1999.
- MELO FILHO, H. B. **Aplicação do cone de penetração dinâmica (CPD) como alternativa para fundações rasas**. 2007. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.
- MENDONÇA, C. A., et al. Integrated earth resistivity tomography (ERT) and multilevel sampling gas: a tool to map geogenic and anthropogenic methane accumulation on brownfield sites. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 2, p. 1217–1226, 2015.
- MEUSER, H. Anthropogenic Soil. In: _____. **Contaminated Urban Soil**. Springer. 2010. p. 121-195.
- MILSOM, J. Resistivity Methods. In: _____. **Field Geophysics**. Chichester, England: Wiley, 3ª edição. 2003. p. 97 - 116
- MILSOM, J.; ERIKSEN, A. Resistivity Methods. In: _____. **Field Geophysics**. 4th ed, John Wiley & Sons, Ltd. 2011. p. 109-133.
- MIRANDOLA, F. A.; MACEDO, E. S. DE. Proposta de classificação do tecnógeno para uso no mapeamento de áreas de risco de deslizamento Technogenic. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 5, p. 66–81, 2014.
- MOHAMMAD, L. N. et al. Prediction of Resilient Modulus of Cohesive Subgrade Soils from Dynamic Cone Penetrometer Test Parameters. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 11, p. 986–992, 2007.
- MOHAMMADI, S. D. et al. Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils. **Engineering Geology**, v.

101, n. 3–4, p. 195–203, 2008.

MORAES, M. L. Estacas de compactação para melhoramento de solos arenosos fofos e uso de penetrômetro dinâmico pesado na avaliação dos resultados. 2008, 195 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2008.

MOREIRA, C. A. et al. Electrical resistivity to detect zones of biogas accumulation in a landfill. **Geofísica Internacional**, v. 54, n. 4, p. 353–362, 2015.

MOSCATELLI, M. et al. Integrated geological and geophysical investigations to characterize the anthropic layer of the Palatine hill and Roman Forum (Rome, Italy). **Bull Earthquake Eng.** v. 12, n. 3, p. 1319 – 1338.

OLIVEIRA A. M. S. Estudos sobre o Tecnógeno no Brasil. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 10, Guarapari (ES), **Anais...** ABEQUA, 2005, CD-ROM, 3.p.

OLIVEIRA, A. M. S.; PELOGGIA, A. U. G.; OLIVEIRA, A. A. Tecnógeno – Antropoceno. In: OLIVEIRA, A. M. S.; MONTICELI, J. J. **Geologia de engenharia e ambiental**. ABGE. 2018. P. 439-452.

OLIVEIRA, V. G.; MENEZES, D. B. Classificações geológico-geotécnicas para depósitos antropogênicos/tecnogênicos. In: 16º Congresso Nacional de Geotecnia 16CNG. 2018. Ponta Delgada. **Anais...** Açores, Portugal, 8p.

OLIVEIRA, V. G.; MENEZES, D. B. Depósitos antropogênicos: Evolução das abordagens por meio da análise bibliométrica. Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ. v. 41, n. 2, p. 369 – 376, 2018a.

OLIVEIRA, V. G.; MENEZES, D. B. Delimitação e Classificação de Depósitos Antropogênicos no Município de São Carlos – SP. IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2019). No prelo.

ONU, ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. (2016). **The World's Cities in 2016. Data Booklet** (ST/ESA/SER.A/392). Disponível em: http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the_worlds_cities_in_2016_data_booklet.pdf. Acessado em: 17 de dezembro de 2017.

PASCHOALIN FILHO, J. A. et al. Gerenciamento de resíduos de construção civil em edifícios residenciais no município de São Paulo. **Revista de Gestão Social e Ambiental – RGSA**, v. 11, n. 1, p. 73-89, 2017.

PEDRON, F. D. A. et al. Levantamento E Classificação De Solos Em Áreas Urbanas : **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 13, n. 2, p. 147–151, 2007.

PEDRON, F. D. A. et al. Solos urbanos. **Ciência Rural**, v. 34, n. 5, p. 1647–1653, 2004.

PELOGGIA, A. U. G. A ação do homem enquanto ponto fundamental da geologia do tecnógeno: proposição teórica básica e discussão acerca do caso do município de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 257–268, 1997.

PELOGGIA, A. U. G. A. **Estudos de geotécnica e geologia urbana**. Manual Técnico. Prefeitura do Município de São Paulo, Secretaria de Habitação e Desenvolvimento Urbano, Superintendência de Habitação Popular. São Paulo, 1999, 50p.

PELOGGIA, A. U. G. A. ; ORTEGA, A. M. Lyell, a agência geológica humana e o antropoceno : em busca de uma epistemologia geológica e arqueológica . **Revista UNG**

– **Geociências**, v. 15, n. 2, p. 106 – 127, 2016.

PELOGGIA, A. U. G. et al. Technogenic geodiversity : a proposal on the classification of artificial ground artificiais. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 05, n. 1, p. 28–40, 2014.

PINHEIRO, R. J. B.; NUMMER, A. V.; RAUBER, A. C. UNIDADES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DE SANTA MARIA – RS. **Geociências, UNESP**, v. 36, n. 2, p. 347–363, 2017.

PONS, N. A. D. **Levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos-SP, com o auxílio de geoprocessamento**. 2006. 210f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos - SP, 2006.

PRICE, S. J. et al. Humans as major geological and geomorphological agents in the Anthropocene: the significance of artificial ground in Great Britain. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 369, p. 1056–84, 2011.

RAMACHANDRAN, M.; JAYAMOHAN, J.; BEENA, V. I. The Effect of Underground Voids on Stability of Foundations: A Review. **International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology**. v. 5, n. 1, p. 24-30, 2016

RICCOMINI, C. Considerações sobre a posição estratigráfica e tectonismo deformador da Formação Itaqueri na porção centro-leste do Estado de São Paulo. **Revista IG São Paulo**. V. 18, n. 1-2, p. 41-48. 1997

ROSENBAUM, M. S. et al. Classification of artificial (man-made) ground. **Engineering Geology**, v. 69, n. 3–4, p. 399–409, 2003.

RUDDIMAN, W. F. The Anthropocene. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 41, n. 1, p. 45–68, 2013.

SANGLERAT, G. The Dynamic Penetrometer. In: **___ Interpretation of penetration diagrams – theory and practice**. Amsterdam, The Netherlands. Elsevier Publishing Company, 1972. p. 215 – 244.

SÃO CARLOS. CÂMARA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. Lei nº 13.919 de 10 de novembro de 2006. **Autoriza o poder executivo a alienar por doação, áreas no loteamento de interesse social Cidade Aracy, e dá outras providências**. Prefeitura Municipal de São Carlos: São Carlos-SP, 2006. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/SP/SAO.CARLOS/LEI-13919-2006-SAO-CARLOS-SP.pdf>>. Acesso: 26/02/2019

SÃO CARLOS. SECRETÁRIA DE COMUNICAÇÃO. Lei nº 18.053 de 19 de dezembro de 2006. Estabelece o Plano Diretor do Município de São Carlos, e dá outras providências. Prefeitura Municipal de São Carlos: São Carlos-SP, 2016.

SÃO CARLOS. **Dados da cidade (Geográfico e Demográfico)**. 2018. Disponível em: <http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/conheca-sao-carlos/115442-dados-da-cidade-geografico-e-demografico.html>. Acesso: abril de 2018.

SILVA LEME ENGENHARIA. **Córrego da Água Quente, aspectos geotécnicos, hidrológicos, diagnóstico sobre as condições e propostas de recuperação**. Relatório Técnico. São Carlos-SP. 2007. 92p.

SILVA LEME ENGENHAIA. **Elaboração de projeto executivo para recuperação de**

área degradada pela disposição controlada de RCD no bairro Antenor Garcia, Relatório técnico - Fotográfico. Projeto de recuperação e requalificação ambiental urbana. São Carlos - SP. 2010. 16p.

SILVA, M.; HORN FILHO, N. O. Os depósitos tecnogênicos construídos no mapeamento geológico de planícies costeiras : o caso da Ilha de Santa Catarina , Santa Catarina , Brasil The built technogenic deposits on the geologic mapping of the coastal plains : the case of Santa Catarina Brasil. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 05, n. 2, p. 112–120, 2014.

SOUZA, L. A. P.; SILVA, R. F.; IYOMASA, W. S. Métodos de Investigação. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo – SP, Oficina de texto, 1996. P. 163 – 197.

SOUZA, F. A. A. Socio hydrological observatory for water security: conceptualization and study case in São Carlos, Brazil. 2019. 84f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos - SP, 2019.

STEFFEN, W. et al. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 369, n. 1938, p. 842–67, 2011.

STEFFEN, W.; CRUTZEN, P. J.; MCNEILL, J. R. The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, v. 36, n. 8, p. 614–621, 2007.

STOLF, R. A compactação do solo e perspectivas de subsolagem em citrus. **Laranja**, v.2, n.8, p.283-308, 1987.

STOLF, R. Comparação dos resultados de resistência do solo obtidos com o penetrômetro de impacto e o convencional. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, v.2, p.837-850.

STOLF, R. Teoria e testes experimentais de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistênci do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas**, v. 15, p. 229 – 235, 1991.

STOLF, R., FERNADES, J., FURLANI NETO, V. L. Penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf: recomendação para seu uso. **STAB, Piracicaba**, v.1, n.3, p.18-23, 1983.

STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; Silva, L. C. F.; MARGARIDO, L. A. C. Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)**, v. 38, p. 774-782, 2014.

STOLF, R.; THURLER, A. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 447-459, 2011.

STROGANOVA, M. N.; AGARKOVA, M. G. Urban soils: experimental study and classification (exemplified by soils of Southwestern Moscow). **Eurasian Soil Science**, v. 25, n. 3, p. 59-69, 1993.

SZABÓ, J.; DÁVID, L.; LÓCZY, D. **Anthropogenic geomorphology: A guide to man-made landforms**. London: Springer, 2010, 298p.

TAME, C. et al. Three-dimensional geological modelling of anthropogenic deposits at

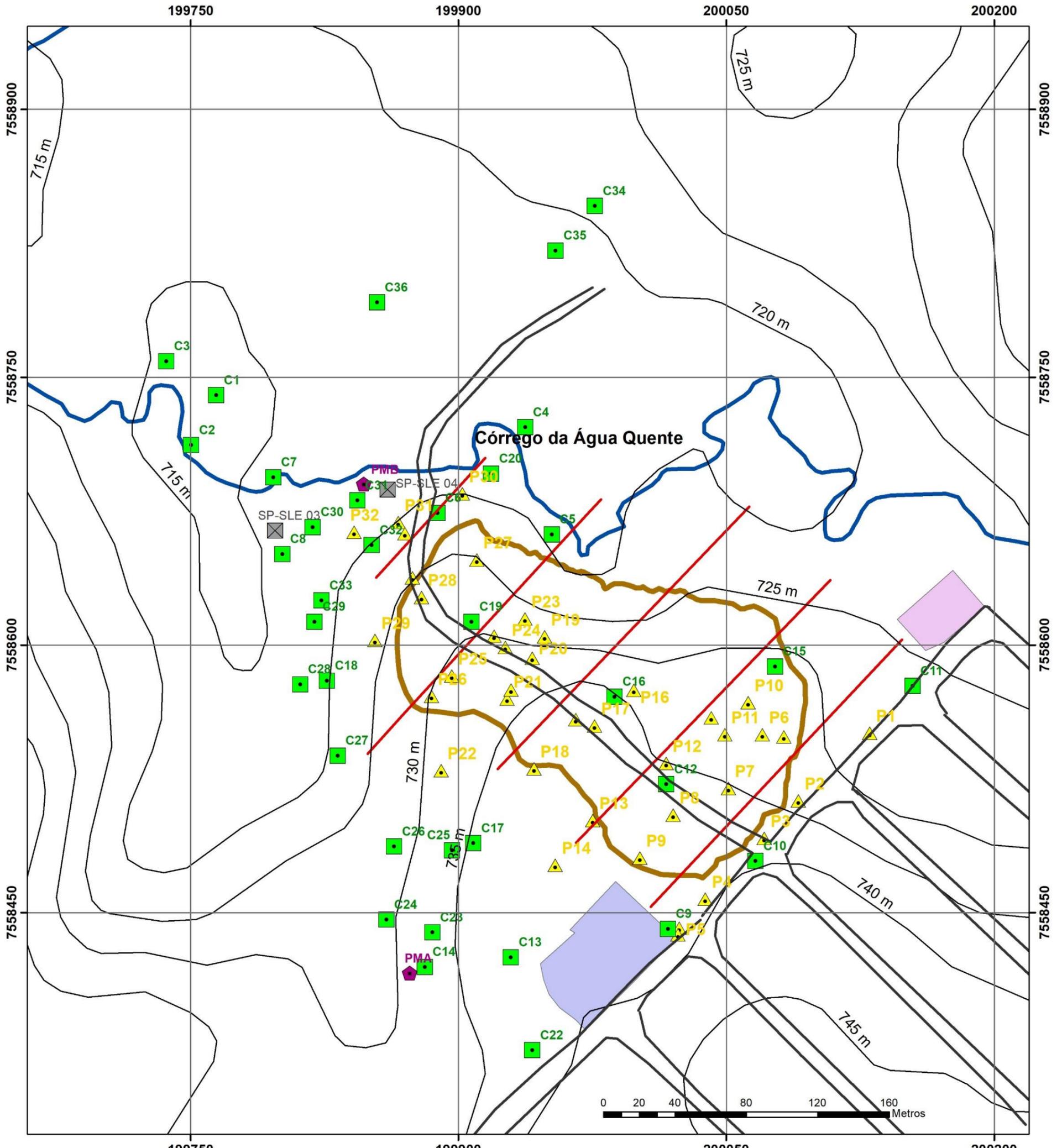
- small urban sites: A case study from Sheepcote Valley, Brighton, UK. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 628–634, 2013.
- TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n. 1, p. 18 – 22.
- TERRINGTON, R. L.; SILVA, E. C. N.; WATERS, C. N.; SMITH, H.; THORPE, S. Quantifying anthropogenic modification of the shallow geosphere in central London, UK. **Geomorphology**, v. 395, p.15-34, 2018.
- TER-STEPANIAN, G. Beginning of the technogene. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, v. 38, n. 1, p. 133–142, 1988.
- TSUHA, C. D. H. C. **Utilização de penetrômetro manual em solo colapsível e comparação com resultados de provas de carga em placa e em sapata**. 2003. 57p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos – SP, 2003.
- USDA. UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil Survey Manual**. Soil Survey Division Staff. Agriculture Handbook n° 18. 603 p. 2017.
- VARGEMEZIS, G. et al. 3D electrical resistivity tomography technique for the investigation of a construction and demolition waste landfill site. **Studia Geophysica et Geodaetica**, v. 59, n. 3, p. 461–476, 2015.
- VAZ, C. M P; PRIMAVESI, O; PATRIZZI, V. C; IOSSI, M. F. Influência da Umidade na Resistência do Solo Medida com Penetrômetro de Impacto. São Carlos. **EMBRAPA instrumentação agropecuária**, 2002. 5 p. Comunicado Técnico n° 51.
- VALENTE, L. N.; GOMES, P. L. F.; MENEZES, D. B. Potencial contaminante de depósitos tecnogênicos de resíduos de construção no município de São Carlos. In: I Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana. 2017. São Carlos. **Anais...São Carlos**, 2017. P. 26 – 38.
- VELOSO, D. I.; MOREIRA, C. A.; CÔRTEZ, A. R. P. Integration of geoelectrical methods in the diagnostic of a diesel contaminated site in Santa Ernestina (SP). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 33, 2015.
- VOOSEN, P. New geological ages comes under fire. **Science**, v. 361, n° 6402, p. 537 – 538.
- WATERS, C. N. et al. A stratigraphical basis for the Anthropocene? **Geological Society, London, Special Publications**, v. 395, n. 1, p. 1–21, 2014.
- ZALASIEWICZ, J. et al. Are we now living in the Anthropocene? **GSA Today**, v. 18, n. 2, p. 4–8, 2008.
- ZALASIEWICZ, J. et al. Stratigraphy of the Anthropocene. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 369, p. 1036–1055, 2011.
- ZALASIEWICZ, J. A. N.; WILLIAMS, M. The New World of the Anthropocene. **Environmental Science & Technology**. v. 44, n. 7, p. 2228–2231, 2010.
- ZANNA, C. D.; FERNANDES, F.; GASPARINE, J. C. Solid construction waste management in large civil construction companies through use of specific software - case study. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 39, n. 2, p. 169-176, 2017.
- ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization.

Organizational Research Methods, v. 18, n. 3, p. 429–472, 2015.

ZUQUETTE, L. V; PALMA, J. B. Avaliação da condutividade hidráulica em área de recarga do aquífero Botucatu. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 1, p. 81–87, 2006.

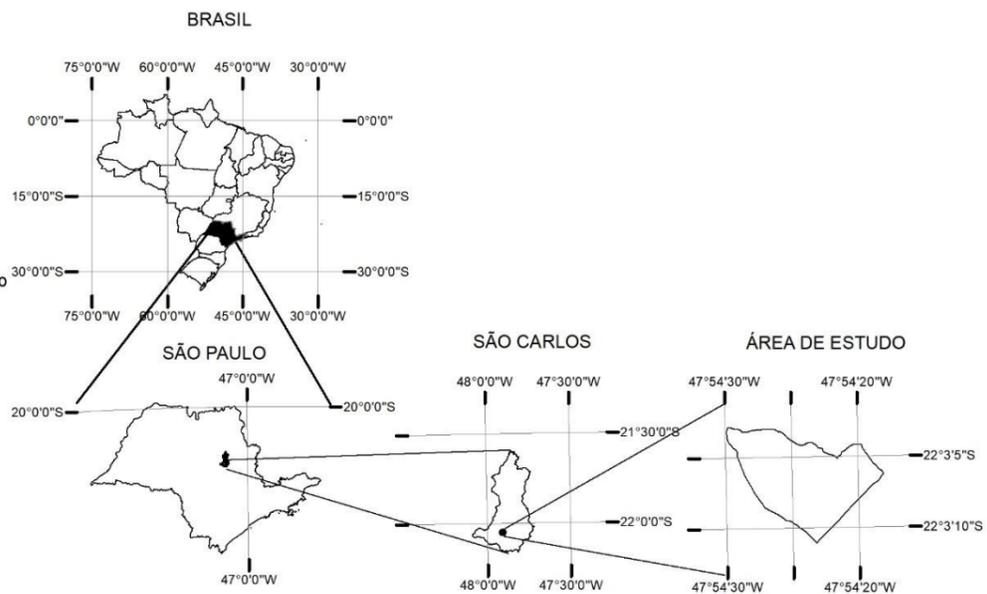
ZWIRTES, A. L. et al. Utilização do infiltrômetro de cornell e dos anéis concêntricos para determinação da infiltração de água em um Latossolo Vermelho. Soil water infiltration measurements using the double ring and cornell infiltrometer in a Rhodic Hapludox. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 3489–3500, 2013.

ANEXOS



Legenda

- Pontos de campo. Amostrados neste estudo.
- Ensaio de rebaixamento e coleta de amostra. Amostrados neste estudo.
- ▲ Ensaio de compactação. Amostrados neste estudo.
- ⊠ Sondagem. Amostrado por Silva e Leme Engenharia (2007)
- ◆ Poço de monitoramento. Amostrado por Silma Leme Engenharia (2007)
- Geofísica. Amostrado nesse estudo
- Drenagem
- Curva de nível
- Ruas
- SAAE
- Escola
- Área de estudo



Projeção UTM (Universal Transversa de Mercator)
 Referência Horizontal: SIRGAS 2000
 Referência Vertical: Marégrafo de Imbituba, SC
 Fator de escala: 0,99960000
 Meridiano Central 45- Fuso 23-

ANEXO 1 - MAPA DE DOCUMENTAÇÃO, DOS DADOS LEVANTADOS EM CAMPO. 1:2000

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA
 Departamento de Engenharia Civil
 Estudo geológico e geotécnico de depósito antropogênico de resíduos na cidade de São Carlos

Autor: Vinicius Gustavo de Oliveira
 Orientadora: Prof. Dra. Denise Balestrero Menezes

ANEXO 2: Nome e coordenadas dos furos de sondagem e poços de monitoramento na área de estudo. Fonte: (SILVA LEME ENGENHARIA, 2007). Datum: SAD-69, 23k.

Nome do ponto	Coordenada X	Coordenada Y
SP-SLE 03	199843	7558705
SP-SLE 04	199906	7558728

Nome do ponto	Coordenada X	Coordenada Y
PMB	199847	7558690

ANEXO 3:

Valores da resistência física a penetração dos pontos P14, P22 e P28, em solo natural. Fonte: autor.

Profundidade das camadas em cm	Resistência P14 (MPa)	Resistência P22 (MPa)	Resistência P29 (MPa)
0-5	1,38	1,06	0,81
5-10	2,07	1,63	1,50
10-15	2,14	1,75	1,50
15-20	2,16	0,99	1,68
20-25	2,11	0,99	2,13
25-30	2,06	0,99	3,75
30-35	1,90	1,00	4,55
35-40	1,88	1,01	5,09
40-45	1,80	1,01	8,83
45-50	1,98	1,09	10,21
50-55	1,97	1,13	9,83
55-60	1,86	1,15	6,63
60-65	1,79	1,22	5,06

Valores da resistência física a penetração dos pontos P1, P2, P3 e P4, em área de resíduos superficiais.

Fonte: autor.

Profundidade das camadas em cm	Resistência P1 (MPa)	Resistência P2 (MPa)	Resistência P3 (MPa)	Resistência P4 (MPa)
0-5	4,23	3,82	3,03	1,77
5-10	5,79	5,17	4,89	2,60
10-15	5,61	4,80	6,90	2,66
15-20	5,42	4,30	9,11	2,65
20-25	4,14	5,38	7,80	2,22
25-30	7,94	6,12	6,07	2,47
30-35	6,62	6,03	4,54	2,95
35-40	6,30	6,82	8,99	3,18
40-45	6,12	3,36		5,12
45-50	4,97	3,69		
50-55	4,14	6,44		
55-60	3,32	7,15		
60-65	3,32	5,12		

Valores da resistência física a penetração dos pontos P5, P13, P18 e P26, em área de resíduos superficiais. Fonte: autor.

Profundidade das camadas em cm	Resistência P5 (MPa)	Resistência P13 (MPa)	Resistência P18 (MPa)	Resistência P26 (MPa)
0-5	3,23	3,02	0,89	0,98
5-10	5,94	5,45	1,99	1,47
10-15	10,42	5,16	2,94	1,60
15-20	21,76	5,29	3,32	1,68
20-25	6,50	3,88	3,74	1,80
25-30	10,04	3,92	3,61	1,92
30-35	11,11	3,33	3,21	2,2
35-40	9,71		2,81	1,91
40-45	7,63		2,52	2,15
45-50	6,07		2,28	2,75
50-55	5,08		1,85	3,21
55-60	4,31		2,21	4,23
60-65	3,32		1,41	3,21

Valores da resistência física a penetração dos pontos P6a, P6b, P7 e P8, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

Profundidade das camadas em cm	Resistência P6a (MPa)	Resistência P6b (MPa)	Resistência P7 (MPa)	Resistência P8 (MPa)
0-5	1,33	1,42	2,89	4,17
5-10	2,02	3,62	6,14	9,17
10-15	4,87	16,97	7,41	12,66
15-20	10,68	10,06	6,45	9,78
20-25	17,98	9,90	6,15	7,55
25-30	18,14	9,90	6,02	
30-35	15,81		10,77	
35-40	31,48		17,91	
40-45			28,12	
45-50				
50-55				
55-60				
60-65				

Valores da resistência física a penetração dos pontos P9a, P9b, P9c e P10, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

Profundidade das camadas em cm	Resistência P9a (MPa)	Resistência P9b (MPa)	Resistência P9c (MPa)	Resistência P10 (MPa)
0-5	2,70	6,91	4,89	1,16
5-10	4,93		8,60	1,34
10-15	5,81		6,10	2,59
15-20	4,99		7,24	1,96
20-25	16,06		21,64	1,75
25-30				2,84
30-35				14,34
35-40				21,23
40-45				22,61
45-50				
50-55				
55-60				
60-65				

Valores da resistência física a penetração dos pontos P11, P12, P16 e P17, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

Profundidade das camadas em cm	Resistência P11 (MPa)	Resistência P12 (MPa)	Resistência P16 (MPa)	Resistência P17a (MPa)
0-5	19,85	4,48	1,84	1,74
5-10	12,22	14,28	4,63	1,48
10-15	22,14	14,60	9,80	1,91
15-20	22,02	17,12	10,38	7,84
20-25	12,00	22,18	11,33	15,72
25-30	7,19	23,04	7,10	
30-35	3,97		3,94	
35-40	3,47		4,81	
40-45	2,76		6,11	
45-50	4,01		5,26	
50-55	4,92		3,70	
55-60	5,15		3,89	
60-65	12,96			

Valores da resistência física a penetração dos pontos P17b, P17c, P17d e P19, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

Profundidade das camadas em cm	Resistência P17b (MPa)	Resistência P17c (MPa)	Resistência P17d (MPa)	Resistência P19a (MPa)
0-5	3,98	0,56	1,49	1,38
5-10	4,03	0,56	1,99	2,09
10-15	5,96	1,94	1,76	3,58
15-20	8,77		2,41	6,71
20-25	14,23		5,60	13,29
25-30			24,32	16,27
30-35				11,63
35-40				9,02
40-45				14,73
45-50				9,12
50-55				6,19
55-60				16,75
60-65				8,58

Valores da resistência física a penetração dos pontos P19b, P20a, P20b e P20c, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

Profundidade das camadas em cm	Resistência P19b (MPa)	Resistência P20a (MPa)	Resistência P20b (MPa)	Resistência P20c (MPa)
0-5	1,62	7,45	3,21	7,45
5-10	2,26	16,16	10,12	
10-15	2,78	16,04	10,21	
15-20	5,02	13,33	13,74	
20-25	8,23	13,22	22,03	
25-30	18,40			
30-35				
35-40				
40-45				
45-50				
50-55				
55-60				
60-65				

Valores da resistência física a penetração dos pontos P23, P24a, P24b e P25, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

Profundidade das camadas em cm	Resistência P23 (MPa)	Resistência P24a (MPa)	Resistência P24b (MPa)	Resistência P25 (MPa)
0-5	1,62	1,35	4,44	1,57
5-10	3,38	2,53	6,21	4,61
10-15	2,61	6,82	10,32	7,62
15-20	1,44	4,91		8,63
20-25	2,42	4,69		9,14
25-30	3,44	10,02		8,10
30-35	4,69	6,56		7,41
35-40	4,52	1,88		6,89
40-45	5,40	7,47		5,98
45-50	13,27	12,62		4,67
50-55	11,16	7,57		3,79
55-60	10,4			2,87
60-65				2,59

Valores da resistência física a penetração dos pontos P27, P28 e P31, em área de aterro de resíduos de construção civil. Fonte: autor.

Profundidade das camadas em cm	Resistência P27 (MPa)	Resistência P28 (MPa)	Resistência P31 (MPa)
0-5	4,06	0,86	1,42
5-10	4,83	1,64	2,25
10-15	12,08	2,53	2,46
15-20	7,19	2,73	2,50
20-25	10,45	3,07	1,73
25-30	7,12	2,66	1,96
30-35	5,46	2,48	4,01
35-40	6,90	2,24	5,86
40-45	8,64	2,00	4,32
45-50	10,53	1,94	2,50
50-55	9,33	1,94	5,57
55-60		1,86	0,96
60-65		1,93	4,26