



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

**Caracterização da camada de resíduos sólidos no antigo Aterro Controlado do
Jockey Clube a partir de dados sísmicos e de eletrorresistividade**

Dissertação de Mestrado
Dissertação nº 188/PPGGAG

Victória Basileu de Oliveira Lima

Brasília-DF

2022



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

Caracterização da camada de resíduos sólidos no antigo Aterro Controlado do Jockey Clube a partir de dados sísmicos e de eletrorresistividade

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Área de Concentração: Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges.

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Peres Rocha.

Brasília-DF

2022



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

**Caracterização da camada de resíduos sólidos no antigo Aterro Controlado do
Jockey Clube a partir de dados sísmicos e de eletrorresistividade**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

Prof. Dr. Jose Eloi Guimarães Campos

Prof. Dr. Vagner Roberto Elis

Brasília – DF

2022

Basileu de Oliveira Lima, Victória

Caracterização da camada de resíduos sólidos no antigo Aterro Controlado do Jockey Clube a partir de dados sísmicos e de eletrorresistividade. Orientador: Welitom Rodrigues Borges. Co-orientador: Marcelo Peres Rocha. Brasília, 2022. 126 p.

Dissertação. Mestrado em Geociências Aplicadas. Universidade de Brasília, 2022.

1. Aterro sanitário. 2. Eletrorresistividade. 3. Sísmica de refração. 4. MASW

Dedico esse trabalho aos meus pais: Edson e Ivette

AGRADECIMENTOS

Nem sei por onde começar a agradecer. Foram tantas pessoas que me ajudaram na realização desse trabalho, ou melhor, desse sonho de fazer mestrado, no meu país que tanto amo, e na Universidade que sempre cultivei enorme carinho!

Agradecer os meus pais, pelo enorme apoio, carinho e muita paciência. Aos meus irmãos mais velhos Gabriel e Mirella, por serem minha fonte de inspiração sempre.

Agradecer a minha 'dupla do lixão': Victor. Pelas marmitas compartilhadas, por me ensinar as ferramentas dos *softwares*, por tirar minhas dúvidas de programação, e por ter se tornado esse amigo muito especial.

Aos alunos da turma de PG2 (1/2019).

Ao pessoal da Phygeo, em especial ao Alamin, Brainer, Spanski, Marcus, Genesson, Yuri e Dani;

Meus amigos de longa data: Jean, Luiza, Adriano, Carlinhos, Marcelo e Lukete;

Meu querido orientador Welitom por todos os ensinamentos compartilhados e me dado a oportunidade de aprender mais sobre geofísica (o terror dos geólogos);

Meu querido coorientador Marcelo;

Ao professor Luciano Cunha por te viabilizado os dias de campo no lixão;

Motorista mais severino possível: Péricles;

A todos os funcionários do aterro que me ajudaram no campo, em especial Felipe e Galego.

Ao instituto de Geociências aplicadas da UnB, e ao Laboratório de Geofísica aplicada (LGA/UnB) pela disponibilidade dos equipamentos geofísicos para a realização deste trabalho.

A minhas amigas de sala Gabi, Carol, Giulia por compartilharem dias de felicidade e desespero em nosso ambiente de trabalho.

Ao projeto RAEESA (Universidade de Brasília/CEB Geração S.A e CEB Lajeado S.A.

POR FIM: A DEUS!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

LIMA, VBO. Caracterização da camada de resíduos sólidos no antigo Aterro Controlado do Jockey Clube a partir de dados sísmicos e de eletrorresistividade. Programa de Pós Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica (Dissertação de Mestrado), Instituto de Geociências, UnB, Brasília, 131p.

Resumo

Os aterros sanitários não controlados (ASNC) são áreas de deposição de resíduos sólidos a céu aberto, que não foram planejadas de acordo com as medidas de proteção ao meio ambiente e à saúde pública. Nesses locais, não há controle da disposição dos materiais descartados e tampouco do sistema de drenagem do chorume gerado pela decomposição dos resíduos. Para delimitar as camadas de resíduos, caracterização físicas dos materiais aterrados e evitar a percolação de chorume para camadas mais profundas utilizam-se, em sua maioria, métodos geoeletricos, e menos comum os métodos sísmicos, visto que são metodologias rápidas, não invasivas e detalhadas no estudo de aterros sanitários. Além disso, os métodos geofísicos podem contribuir com informações valiosas quanto ao mapeamento de áreas úmidas em maciços de resíduos sólidos urbanos. O presente trabalho tem por objetivo a caracterização geométrica e física dos resíduos sólidos aterrados no antigo Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília (ACJC), no Distrito Federal. Os métodos geofísicos aplicados foram a eletrorresistividade, a sísmica de refração e a sísmica de onda superficial com a técnica *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW). Os resultados obtidos com a eletrorresistividade, com diferentes arranjos eletródicos (Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Wenner e Wenner-Schlumberger) possibilitaram a geração de um modelo de espessura das camadas de resíduos e a estimativa do volume aproximado do pacote de resíduos sólidos a partir do modelo geoeletrico mais representativo do aterro. Por outro lado, com as respostas das velocidades de ondas cisalhantes (V_s) e de compressão (V_p), bem como o produto derivado dessas velocidades, como a razão de Poisson (ν), módulo de Young (E) e módulo de cisalhamento (G_0), obtidos com dados de refração e de MASW, foi possível caracterizar as diferentes camadas de uma parcela do ACJC e calcularam-se as propriedades elásticas de interesse geotécnico a partir das relações de V_p e V_s . Por fim, a utilização desses métodos geofísicos se mostrou uma ferramenta útil para a investigação de aterros, além de ter contribuído para o melhor delineamento das

camadas que compõem o ACJC, para a definição de zonas úmidas e para a determinação de parâmetros de resistência e competência mecânica dos materiais aterrados no ACJC.

Palavras-chave: Aterro sanitário, Eletrorresistividade, Sísmica de refração, MASW.

LIMA, VBO. Characterization of the solid waste layer in the Jockey Clube Controlled Landfill from seismic and electroresistivity data. Graduate Program in Applied Geosciences and Geodynamics (Master's Dissertation), Institute of Geosciences, UnB, Brasília, 131p.

Abstract

Municipal solid waste landfill (MSWL) are open deposition areas that were not planned in accordance with measures to protect the environment and public health. In these places, there is neither a control over the disposal of the discarded materials, nor a drainage system for the leachate generated from the waste composition. The historical reconstruction of waste disposal for a MSWL is a challenging task. Geoelectric methods are a quick, non-invasive and detailed way to delimit the waste layer and characterize the landfilled materials. In addition, geophysical methods can contribute with valuable information regarding the mapping of wetlands in massive urban solid waste. The present work has the characterization of landfilled solid residues and saturated zones as objective, through the geophysical methods of resistivity and seismic methods of Refraction and MASW, in an area located in the *Municipal solid waste landfill Jockey Clube de Brasília - DF (ACJC)*. By the sessions obtained through electro-resistivity, in different electrode arrays Dipole-Dipole, Pole-Dipole, Wenner and Wenner-Schlumberger, it was possible to generate a layer thickness model, and calculate the approximate volume of the package of domestic solids from the most representative geo-electric model of the landfill. By the other hand, with the wave response of shear (V_s) and compressional (V_p) waves, as well as the derived product due to the Poisson ratio (ν), Young's modulus (E), and shear modulus (G_0), obtained from data of Seismic Refraction Tomography and MASW, it was possible to characterize the different layers of a portion of the ACJC and to calculate elastic properties of geotechnical interest from the relations of V_p and V_s . Finally, the use of geophysical methods proved to be a useful tool for the investigation of landfills, and also contributed to better delineate the layers that make up the ACJC, to define wetlands, and to determine parameters of resistance and competence of the materials landfilled in the ACJC.

Key words: Landfill sites. Electro-resistivity. Seismic Refraction Tomography. MASW

.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	4
CAPÍTULO 2	5
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	5
2.1 Localização.....	5
2.2 Geologia.....	6
2.3 Pedologia.....	8
2.4 Hidrogeologia.....	9
2.5 Geomorfologia.....	12
2.6 Hidrografia.....	13
2.7 Topografia.....	14
2.8 Clima.....	14
2.9 Histórico de deposição de resíduos.....	16
2.10 Estudos geofísicos anteriores no ACJC.....	19
CAPÍTULO 3	22
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
3.1 Métodos sísmicos.....	22
3.1.1 Ondas sísmicas.....	23
3.1.2 Propagação de ondas sísmicas.....	24
3.1.3 Coeficiente de <i>Poisson</i> e Módulo de <i>Young</i>	27
3.2 Sísmica de refração.....	28
3.2.1 Princípios da sísmica de refração.....	30
3.2.2 Técnicas de aquisição de dados.....	35
3.2.3 Processamento.....	38
3.2.4 Inversão dos dados.....	39
3.3 Análise multicanal de ondas de superfície – MASW.....	41
3.3.1 Princípios da análise multicanal de ondas de superfície.....	42
3.3.2 Técnicas de aquisição de dados.....	45
3.3.3 Processamento.....	47
3.3.4 Inversão.....	48

3.4	Métodos elétricos	50
3.4.1	Eletrorresistividade	51
3.4.1.1	Fundamentos básicos.....	51
3.4.1.2	Técnicas de aquisição de dados	57
3.4.1.3	Inversão dos dados.....	64
CAPÍTULO 4	67
4	ARTIGO 1.....	67
ESTIMATIVA DA ESPESSURA DE RESÍDUOS DO ATERRO SANITÁRIO JOCKEY CLUBE A PARTIR DE UMA COMPARAÇÃO DE DIFERENTES INVERSÕES SIMULTÂNEAS DE ARRANJOS ELETRÓDICOS		67
4.1	Introdução.....	68
4.2	Área de estudo	70
4.3	Materiais e métodos.....	71
4.3.1	Aquisição de dados.....	71
4.3.2	Modelagem dos dados de resistividade	73
4.3.3	Validação dos modelos e simulação numérica	74
4.3.4	Modelo de espessura de resíduos	76
4.4	Resultados e discussões	77
4.4.1	Comparação e validação dos modelos	81
4.4.2	Modelo de espessura de resíduos	83
4.5	Conclusões	85
CAPÍTULO 5	90
5	ARTIGO 2.....	90
AVALIAÇÃO DE CAMADAS E DA SATURAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO ATERRO SANITÁRIO JOCKEY CLUBE A PARTIR DA ANÁLISE DE TOMOGRAFIA DE REFRAÇÃO SÍSMICA E ONDAS DE SUPERFÍCIE.....		90
5.1	Introdução.....	91
5.1.1	Área de estudo	92
5.2	Metodologia	94
5.2.1	Aquisição de dados.....	94
5.2.2	Fonte	96
5.2.3	MASW.....	99
5.2.4	<i>Seismic Refraction Tomography</i>	100
5.2.5	Propriedades elásticas	101
5.2.6	Resultados e discussão	103
5.3	Conclusões	108

CAPÍTULO 6.....	116
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	116
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do Aterro Jockey Clube e principais acessos locais. Fonte: original da autora.	5
Figura 2 – Coluna estratigráfica do topo da sequência deposicional do Grupo Paranoá, de maior ocorrência do DF. Fonte: modificado de Campos et al. (2013).....	7
Figura 3 - Mapa pedológico do ACJC e entorno. Fonte: ZEE-DF 2011.....	9
Figura 4 – Mapa hidrogeológico do ACJC e entorno. Fonte: ZEE-DF 2011.....	12
Figura 5 – Mapa Geomorfológico do ACJC e entorno. Fonte: ZEE-DF 2011.....	13
Figura 6 – Série histórica 1961 – 2020 da precipitação relativa média mensal e os respectivos coeficientes de variação da Estação Meteorológica de Brasília (EMB) (Cód.83377). Fonte: INMET (2020).....	15
Figura 7 – Série histórica 1961 - 2019 da temperatura relativa média mensal e os respectivos coeficientes de variação da EMB (Cod.83377). Fonte: INMET (2020).....	16
Figura 8 – Histórico de deposição de resíduos no ACJC de 2002 a 2019. Fonte: Google Earth.....	19
Figura 9 – Trajetória de partículas associado a diferentes tipos de onda. Fonte: adaptado de Science Learning Hub (2021). Disponível em: https://www.sciencelearn.org.nz/images/353-earth-waves . Acesso em: 20 out 2021.	24
Figura 10 – Representação gráfica simplificada da trajetória de raios sísmicos descritos na "Lei de Snell". Adaptado de Kearey et al. (2009).....	31
Figura 11 - Demonstração do maior ângulo de incidência possível que ainda resulta em um raio refratado (ângulo crítico).....	31
Figura 12 - Frente de emissão de ondas diretas e refratadas para um modelo de duas camadas. Fonte: adaptado de Kearey et al. (2009).	33
Figura 13 - Curva Tempo x Distância para onda direta quando interceptadas por até dois refletores horizontais. Fonte: adaptado de Kearey et al. (2009).....	34
Figura 14 - Modelo esquemático para cálculo do tempo de percurso. Fonte: adaptado de Hayashi e Takahashi (2001).....	40
Figura 15 - Fluxograma do método MASW, em que H é a espessura das camadas e V_s é a velocidade da onda S. Fonte: adaptado de Strobbia (2003).....	42
Figura 16 - Exemplificação esquemática do caráter dispersivo das ondas de superfície. Fonte: Strobbia (2003).....	44
Figura 17 - Gráfico representando diferentes modos de propagação associados a diferentes velocidades de fase a cada frequência. Fonte: Strobbia (2003).....	45
Figura 18 - Processamentos dos dados de MASW. A) Sismograma multicanal no domínio do tempo. B) Gráfico de Velocidade de fase x Frequência obtido após a etapa de processamentos dos traços sísmicos. Fonte: Adaptado de Hayashi (2008).	48
Figura 19 - Processo de inversão implementado no software Seisimager-SW, utilizado no presente trabalho. A) Seleção da curva de velocidade de fase no gráfico de dispersão e cálculo da velocidade de onda S. B) Modelo inicial de velocidade baseado em 1/3 da transformação do comprimento de onda. C) Comparação entre a curva de dispersão entre o modelo inicial e o modelo observado. Fonte: Adaptado de Hayashi (2008).....	49
Figura 20 - Cilindro condutor utilizado para exemplificar a relação de resistência e resistividade elétrica. Fonte: adaptado de Braga (2006).	52
Figura 21 - Modelo representativo de fluxo de corrente em meio homogêneo. A) Campo potencial semiesférico gerado a partir de um ponto de corrente elétrica, localizado em meio homogêneo. B) Gradiente do potencial nas proximidades do eletrodo de corrente pontual. Fonte: adaptado de Reynolds (1997) apud Borges (2007).....	54

Figura 22 - Linhas de fluxo de corrente e equipotenciais, para dois eletrodos de corrente em um meio homogêneo. A) Vista planar e seção vertical. B) Variação do potencial na superfície. Fonte: adaptado de Loke, 2004.....	56
Figura 23 - Ilustração dos principais arranjos eletródicos utilizados em aquisições de eletrorresistividade e seus respectivos fatores geoeletricos. Fonte: Adaptado de Borges (2007).....	58
Figura 24 - Arranjo de eletrodos Wenner para uma investigação 2D com 20 eletrodos. Adaptado de LOKE (2004).....	61
Figura 25 - Ilustração do Arranjo de eletrodos Wenner Schlumberger para metodologia do caminhamento elétrico, com utilização de 20 eletrodos. Adaptado de LOKE (2004).....	62
Figura 26 - Ilustração do Arranjo de eletrodos Dipolo – Dipolo para metodologia do caminhamento elétrico, com utilização de 20 eletrodos. Adaptado de LOKE (2004).....	63
Figura 27 - Ilustração do Arranjo de eletrodos Polo–Dipolo para metodologia do caminhamento elétrico com utilização de 20 eletrodos. Adaptado de LOKE (2004).	64
Figura 28 - Modelo de bloco inicial utilizado no presente estudo pelo programa ResD2Inv (versão 3.53).....	65
Figura 29 - Mapa do Aterro Controlado Jockey Clube e adjacências.....	72
Figura 30 – Fotos evidenciam a aquisição de dados de resistividade elétrica no ACJC. A) Foto atual da parte do aterro conhecida como “Bolo de Noiva”, ainda em operação. B) O Sistema de aquisição conhecido como Syscal Pro. C) Multi-eletrodo instalado no solo durante a aquisição de dados.....	73
Figura 31 - Modelos numéricos da seção 1 para 15 arranjos múltiplos. Simulação realizada a partir da reconstrução histórica do ACJC e das informações diretas furo de sondagem PG1. Fonte: original dos autores.....	76
Figura 32 - Comparação entre seções de resistividade para linha 1 obtida para os 4 arranjos e 11 combinações de inversão, associados aos furos de sondagem PG1, PG2 e SP-04. Fonte: original dos autores.	78
Figura 33 - Comparação entre seções de resistividade para linha 2 obtida para os 4 arranjos e 11 combinações de inversão. Fonte: original dos autores.....	79
Figura 34 - Comparação entre seções de resistividade para linha 3 obtida para os 4 arranjos e 11 combinações de inversão, associado ao furo de sondagem SP-07. Fonte: original dos autores.....	80
Figura 35 - Comparação entre seções de resistividade para linha 4 obtida para os 4 arranjos e 11 combinações de inversão, associado ao furo de sondagem SP-03. Fonte: original dos autores.....	81
Figura 36 - Análise estatística dos perfis resistividade das seções de resistividade (1, 2 e 4 e modelo numérico), ao longo dos furos de sondagem (PG1, SP-03, SP-04, SP-07). A) Perfis de resistividade por profundidade ao longo dos furos de sondagem, contendo o perfil de resistividade a respeito da seção de cada combinação de arranjo invertido. B) Valores de β_1 e range referentes os valores de resistividade ao longo dos furos de sondagem, intervalo de 10 metros do topo e de base do aterro. Em verde, estão destacadas as combinações de arranjos com melhores resultados dos parâmetros estatísticos. Fonte: original dos autores.	82
Figura 37 - Modelo de resistividade elétrica das linhas 1 a 4 obtidos pela inversão simultânea dos arranjos WN-DD com a projeção das sondagens geológicas. As linhas pretas e cinza representam os isovalores de resistividade utilizados para interpolação da superfície. Fonte: original dos autores.....	83
Figura 38 - O modelo interpolado da espessura de resíduos da área investigada do ACJC. A) Mapa da espessura da camada de resíduos para área investigada do aterro ACJC. B)	

Modelo 3D da espessura da camada de resíduos do ACJC. C) Perfil 2D da camada de resíduos (NW-SE) da área investigada. D) Histograma de erro relativo aos valores reais e medidos para a base e topo da camada de resíduos, e os valores de RMSE (root mean squared error) e coeficiente de correlação de Pearson (φ) calculados. E) Semivariograma dos dados de base e topo do aterro ajustado ao modelo exponencial, bem como os parâmetros da função teórica Sill e Range utilizados. Fonte: original dos autores.	84
Figura 39 - A) Vista em planta do ACJC com a localização da seção representativa das camadas do aterro. B) Modelo simplificado da disposição dos diferentes materiais que compõem o ACJC, resumido em três camadas principais: resíduos de construção civil (WCC), resíduos sólidos e superfície natural (latossol).....	94
Figura 40 - A) Mapa de localização da aquisição da linha sísmica (Linha verde). B) Localização da fonte (tiro 1 em 156 m, tiro 2 em 142 m, tiro 3 em -15 m, tiro 4 em -1 m e tiro 5 em 70,5 m).....	95
Figura 41 - Fotos da aquisição sísmica. A) Posicionamento dos geofones em linha reta; B) Estação base do computador controlador da aquisição de dados; C) Preparo da queda de peso para registro sísmico na posição de tiro 5.....	96
Figura 42 - Seleção de primeiras chegadas de 3 sismogramas processados. A) Sismograma referente ao tiro 1 (fonte em 142 m). B) Sismograma referente ao tiro 2 (fonte em -15 m). C) Sismograma referente ao tiro 3 (fonte em 70,5 m).....	98
Figura 43 - Sismograma utilizado para obtenção para cálculo de perfil de velocidade S.....	99
Figura 44 - Síntese das principais etapas de aquisição e processamento de MASW para se obter o perfil de onda de cisalhamento (V_s). Primeiramente, registro das ondas sísmicas em um sistema de multicanais, após o impacto do peso em queda. Em seguida, obtenção do fenômeno da dispersão por meio de uma transformação de cada traço do sismograma do domínio do tempo para o domínio da frequência. Por fim, as curvas de dispersão são extraídas de forma que no processo de inversão obtém-se o perfil de velocidade V_s	100
Figura 45 - Síntese das principais etapas de aquisição e processamento da Tomografia de refração, para obter-se o perfil 2D de onda P (V_p). Primeiramente, registro das ondas sísmicas em um sistema de multicanais, após o impacto do peso em queda. Em seguida, demarcações de primeiras chegadas para cada traço dos sismogramas. Por fim, Modelagem dos traçados de raios para o cálculo de tempos de percurso teóricos e caminhos de raio e obtenção do tomograma de V_p	101
Figura 46 - A) Tomograma de V_p obtido a partir da sísmica de refração, juntamente ao perfil de velocidade V_s obtido pelo método MASW; B) V_p , V_s Parâmetros elásticos calculados em profundidade para zona central do perfil analisado. Fonte:	106
Figura 47 - Comparação de variação de Velocidade de onda P e S obtidos em outros trabalhos e o presente estudo utilizando métodos sísmicos em aterros sanitários.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistemas e subsistemas do domínio Intergranular, Fraturado, e fissuro-Carstico do Distrito Federal. Fonte: adaptado de Campos (2013).	10
Tabela 2 - Importantes características de algumas fontes sísmicas mais utilizadas em pesquisas de ondas sísmicas. Fonte: adaptado de Everett (2013).	36
Tabela 3 - Parâmetros de aquisição para cada configuração eletródica utilizada: Dipolo-Dipolo (DD), Polo-Dipolo (PD), Wenner (WN), Wenner-Schlumberger (WS). Fonte: original dos autores.	73
Tabela 4 - Materiais e parâmetros utilizados na aquisição sísmica. Fonte: original dos autores.	96
Tabela 5 - Mínimo, máximo referentes aos valores de V_s , V_p e u , E e G_0 calculados no presente estudo.	106
Tabela 6 - Valores de V_s , V_p calculados em investigações sísmicas em aterros. Fonte: adaptado de Abreu et al. (2016) e Aranda et al. (2019).	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACJC	Aterro Controlado do Jockey Clube
ASNC	Aterro Sanitário Não Controlado
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
CODEPLAN	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
CX	Cambissolo háplico
DD	Dipolo-Dipolo
DF	Distrito Federal
EMB	Estação Meteorológica de Brasília
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPCL	Estrada Parque Ceilândia
ETR	Tomografia de Eletrorresistividade (<i>Electro-resistivity Tomography</i>)
Fm.	Formação
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
SI	Solos indiscriminados
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JCB	Jockey Clube de Brasília
KGS	<i>Kansas Geological Survey</i> (Serviço Geológico de Kansas)
LV	Latossolo vermelho
LVA	Latossolo vermelho-amarelo
MASW	Análise Multicanal de Ondas de Superfície (<i>Multichannel Analysis of Surface Waves</i>)
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
NE	Nordeste
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PD	Polo-Dipolo

PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEP	Perfilagem Elétrica de Poços
PI	Polarização induzida no domínio do tempo
PNB	Parque Nacional de Brasília
RA	Região Administrativa
RCC	Resíduos de Construção Civil
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i> (Raiz quadrada da média do erro)
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SASW	Análise Espectral de Ondas de Superfície (<i>Spectral Analysis of Surface Waves</i>)
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
SIBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIRT	<i>Simulation Iterative Reconstruction Technique</i>
SLU	Serviço de Limpeza Urbana
TE	Tomografia Elétrica
URE	Unidade Recolhedora de Entulhos
WN	Wenner
WS	Wenner-Schlumberger

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Os lixões a céu aberto são áreas de disposição de resíduos sólidos em contato direto com a superfície do solo ou seu interior (Zanta et al., 2003). Nessas áreas, o controle de materiais descartados é inadequado e sem os sistemas de drenagem do chorume gerado a partir da composição dos resíduos orgânicos.

Os impactos globais dos resíduos sólidos são visíveis em um curto período de tempo, como inundações, poluição do ar e impactos na saúde pública, aumento nos casos de diarreia e doenças relacionadas, além de epidemias de dengue (Hoornweg and Bhada-tata, 2012; Paixão Filho and Miguel, 2017). Estima-se que no Brasil, 40.9% dos resíduos sólidos coletados sejam descartados de forma inadequada em aterros e/ou lixões a céu aberto (Alfaia et al., 2017).

Tais práticas são gradualmente substituídas devido ao reconhecimento do prejuízo ambiental e contra a saúde humana que causam. Nesse cenário transformador, foi formulada a lei federal nº12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que estabelece princípios e objetivos para um marco na gestão de resíduos sólidos no Brasil. O PNRS apresenta diferentes problemas para sua efetiva aplicação, entre os quais se destacam a baixa disponibilidade orçamentária e a fraca capacidade institucional e de gerenciamento de muitos municípios brasileiros, especialmente os de pequeno porte (Heber and Silva, 2014; Maiello et al., 2018).

Nesses aterros a céu aberto, não há controle da disposição dos materiais descartados e tampouco do sistema de drenagem do chorume gerado da composição dos resíduos (Hoornweg and Bhada-tata, 2012). A investigação de aterros sanitários e a reconstrução histórica de deposição de resíduos para um aterro a céu aberto é uma tarefa desafiadora visto que não há registro das disposições. O antigo Aterro Controlado do Jockey Club (ACJC), localizado em Brasília-DF, é um exemplo disso.

O ACJC foi desativado em 2018 como o maior lixão a céu aberto em extensão da América Latina (Campos, 2018), com um histórico de disposição inadequada de resíduos sólidos por décadas e, somando-se a isso, uma problemática de ocupação urbana de suas adjacências que perdura até o presente. Nesse sentido, faz-se necessário uma caracterização do local para contribuir com possíveis soluções para a remediação dessa área. Pouco se sabe sobre as características físicas dos materiais descartados e dos limites verticais e horizontais das camadas de resíduos aterrados no ACJC (Franco, 1996; Cavalcanti et al., 2014; Nisiyama, 2019). Além disso, devido à falta de impermeabilização da fundação, o fluxo de chorume no interior do maciço de resíduos é uma das principais preocupações de equipes técnicas do aterro.

Dessa maneira, a investigação de aterros sanitários com métodos geofísicos tem sido amplamente utilizada como uma ferramenta indireta, não invasiva, e rápida na solução para investigação em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos, desde a identificação de plumas de contaminação (Osella and Lascano, 2002; Clément et al., 2010; Rosqvist et al., 2011; Cavalcanti et al., 2014; Helene et al., 2018; Bacha et al., 2021; Brahmi et al., 2021; Odiá et al., 2021) até para a delimitação dos diferentes estratos do aterro (Dahlin et al., 2000; Soupios et al., 2007; Bernstone et al., 2016; Aziz et al., 2019). Embora vários métodos geofísicos tenham potencial aplicabilidade para investigações de aterro sanitários, os métodos sísmicos, elétricos e eletromagnéticos são os mais frequentemente aplicados com maior sucesso (Aristodemou, 2000; Zonge et al., 2005; Bergamo et al., 2016; Bernstone et al., 2016; Donno and Cardarelli, 2017; Frid e Israel, 2017; Gaël et al., 2017). Os métodos geoeletricos como a Tomografia de Eletrorresistividade (ETR) e a Polarização induzida no domínio do tempo (IP) são rotineiramente aplicados na caracterização de aterros, devido ao forte efeito de polarização induzida e contraste de resistividade entre os diferentes materiais que compõem os depósitos de resíduos sólidos (Aristodemou, 2000; Donno e Cardarelli, 2017; Frid e Israel, 2017).

Os métodos sísmicos são uma opção muito eficiente no estudo de aterros devido à ótima resposta da impedância sísmica entre as camadas geotécnicas. Esses métodos, como a sísmica de refração e a *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) fornecem modelos de velocidade da onda compressiva (V_p) e da onda cisalhante (V_s), respectivamente (Carey et al., 1993; De Iaco et al., 2003; Carpenter et al., 2013; A.E.S. Abreu et al., 2016; Anbazhagan and Lakshmiathan, 2016;

Uhlemann et al., 2016; Alam and Jaiswal, 2017; Aranda et al., 2019). A relação entre essas velocidades e a densidade dos materiais, possibilita o cálculo de propriedades mecânicas de módulo de cisalhamento (G_0), a Razão de Poisson (ν) e módulo de Young (E)(Alam e Jaiswal, 2017; Aranda et al., 2019). Ademais, auxiliam na determinação do fluxo de chorume no interior do maciço de resíduos com a identificação de zonas úmidas em subsuperfície, uma vez que as velocidades das ondas P e S e a razão entre elas respondem de maneiras características à presença de chorume no solo (Konstantaki et al., 2016).

Com esse trabalho, espera-se disponibilizar, para a sociedade e partes interessadas na temática aqui tratada, uma ferramenta que contribua para a remediação de áreas contaminadas por resíduos sólidos urbanos, segundo uma metodologia científica consolidada na comunidade científica internacional.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo geral a caracterização geofísica do Aterro Sanitário Jockey Clube com os métodos geofísicos de eletrorresistividade, sísmica de refração e MASW.

1.2 Objetivos específicos

a) Comparar os resultados obtidos da eletrorresistividade com diferentes arranjos em todas as possíveis combinações de inversões simultâneas para os arranjos Dipolo-Dipolo (DD), Polo-Dipolo (PD), Wenner (WN) e Wenner-Schlumberger (WS).

b) Determinar um modelo de espessura e volume aproximado do pacote de resíduos sólidos domésticos a partir do modelo geoeletrico mais representativo do aterro.

c) Avaliar a utilização integrada da sísmica de refração e MASW na caracterização das diferentes camadas geotécnicas de uma parcela do ACJC e o cálculo de propriedades elásticas de interesse geotécnico a partir das relações de V_p e V_s .

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos. O presente Capítulo 1 aborda a contextualização da pesquisa, os objetivos e a área de estudo. O Capítulo 2 descreve os fundamentos teóricos dos métodos geofísicos utilizados. Os Capítulos 3 e 4 apresentam os textos de dois artigos científicos desenvolvidos ao decorrer do trabalho, nos quais os resultados obtidos são discutidos. Por fim, o Capítulo 5 discorre sobre as considerações finais observadas com o desenvolvimento geral da pesquisa. As referências bibliográficas citadas nos Capítulos 3 e 4 são apresentadas em seus respectivos subtópicos de referências, enquanto referências bibliográficas citadas nos Capítulos 1 e 2 serão apresentadas no tópico de referências gerais.

CAPÍTULO 2

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

A área de estudo se localiza na porção centro-sul do Distrito Federal. A principal via de acesso ao Aterro do Jockey Clube de Brasília (JCB) é a Rodovia DF-095, também conhecida como Estrada Parque Ceilândia (EPCL) ou Via Estrutural. Nasce na DF-003, entre as regiões administrativas (RA) do Cruzeiro, do Setor de Indústria e Abastecimento SIA, e termina em Taguatinga, de onde se tem acesso à DF-001, ou se segue no sentido Ceilândia, tornando-se a BR-070, que liga Brasília a Cuiabá (Figura 1).

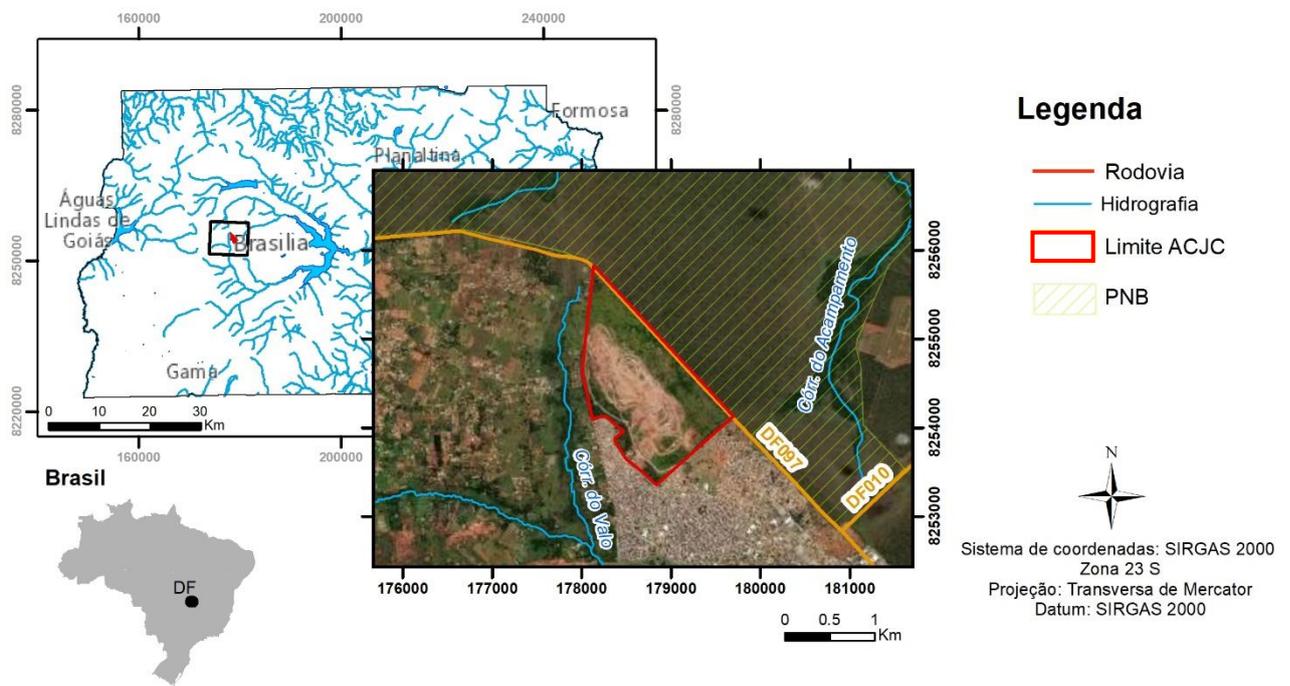


Figura 1 - Localização do Aterro Jockey Clube e principais acessos locais. Fonte: original da autora.

O Aterro JCB tem área total de aproximadamente 2.5 km² na forma de um trapézio, com vértice de topo triangular apontando para noroeste. Ao Sul encontra-se uma porção de terra, que no passado fez parte do Aterro, que hoje está habitada por famílias de baixa renda. A oeste do Aterro está o córrego Cabeceira do Valo e a região administrativa Cidade Estrutural. A norte e a leste está o córrego do Acampamento e a área do Parque Nacional de Brasília (PNB).

2.2 Geologia

O Distrito Federal está inserido no contexto geológico da porção oeste da Província Estrutural do Tocantins (Almeida, 1977) mais especificamente na porção central da faixa de Dobramentos e Cavalgamentos Brasília (Dardenne et al., 1995) na transição das porções internas (de maior grau metamórfico) e externas (de menor grau metamórfico) (Campos, 2004). A estruturação brasileira no geral é bastante complexa com superimposição de dobras isoclinais, recumbentes, com foliação de transposição, falhas inversas e cavalgamentos.

Quatro conjuntos litológicos compõem o arcabouço geológico do Distrito Federal: Grupo Paranoá e Canastra (idade Mesoproterozoica), Grupos Bambuí e Araxá (idade Neoproterozoica) e as coberturas de solos residuais ou coluvionares (Campos, 2004). Localmente, a área do ACJC é composta pelas rochas do Grupo Paranoá, mais especificamente a formação Ribeirão do Torto.

O Grupo Paranoá corresponde a uma sequência psamo-pelito-carbonatada que aflora desde o Distrito Federal até o Sul do Tocantins. Tem sua formação a partir de uma sequência de preenchimento de bacia de primeira ordem que se estende para o interior do Cratón São Francisco. O Grupo foi recoberto pelas unidades do Grupo Bambuí e posteriormente afetado pelos dobramentos da faixa Brasília (Campos et al., 2013). Faria (1995); Freitas-Silva e Campos (1998) descreveram 11 litotipos para o Grupo Paranoá, sendo possível observar a ocorrência de 7 deles no Distrito Federal. São denominados informalmente por letras-código da base para o topo: SM, R1, Q1, R2, Q2, S, A, R3, R4 e PC. Campos et al., 2013 formalizaram a estratigrafia do Grupo Paranoá na sua área-tipo em formações, então o litotipo "A" foi denominado como Formação Ribeirão do Torto (Figura 2).

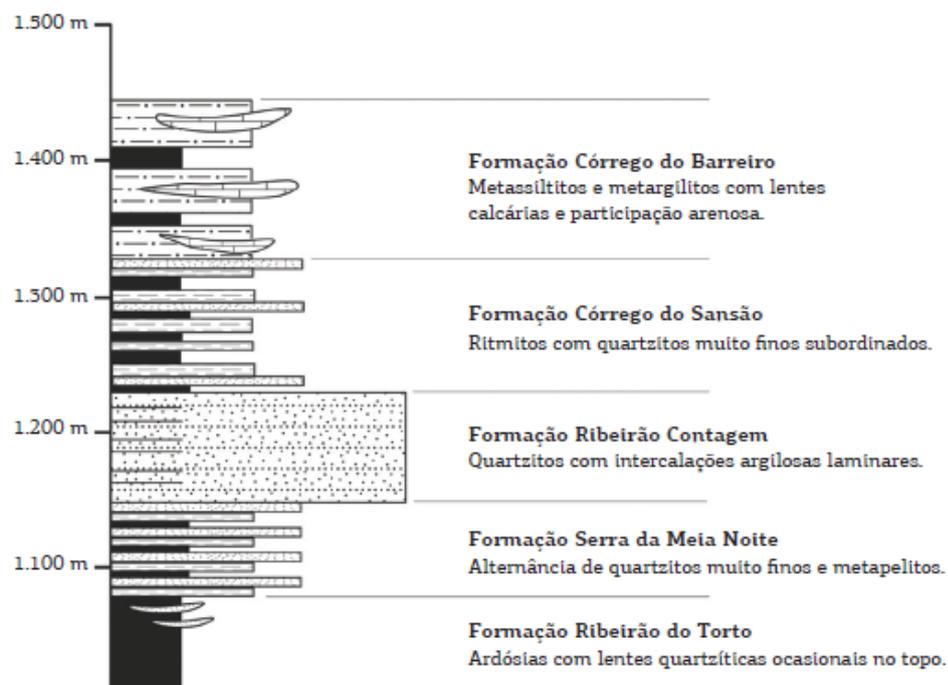


Figura 2 – Coluna estratigráfica do topo da sequência deposicional do Grupo Paranoá, de maior ocorrência do DF. Fonte: modificado de Campos et al. (2013).

A Formação Ribeirão do Torto, que embarca a área de estudo, é composta por ardósias de coloração cinza esverdeada e, quando alteradas pela ação do intemperismo, possuem uma coloração roxa avermelhada. Nesse conjunto, são observadas duas foliações penetrativas que representam as clivagens ardosianas e configuram o caráter da rocha friável e quebradiça. Associado a esse litotipo, são descritas lentes ocasionais de quartzitos branco-amarelados no topo da formação, de extensão decamétrica a métrica, geralmente irregulares e maciças.

Pereira et al. (1997); Campos et al. (2007) caracterizaram geologicamente o interior do domínio ACJC. Pereira et al. (1997), por meio de furos de sondagem realizada na área, puderam verificar, em uma sondagem mista, uma camada de latossolo de até 27 m de profundidade e o topo do substrato rochoso, que pode alcançar a profundidade de 37,5 m. Ainda no mesmo furo, foi possível identificar uma camada de quartzito de espessura de aproximadamente 2,2 m. Segundo os autores, o substrato rochoso do ACJC se encontra falhado na direção NE, situação muito comum no contexto geológico em questão e que justifica o fato de alguns furos de sondagem não atingirem o topo rochoso mesmo em maiores profundidades. Além

disso, isso também possivelmente condicionou o direcionamento de alguns rios, como o Córrego do Acampamento (Santos, 2004).

2.3 Pedologia

A EMBRAPA (1978) formalizou a primeira classificação de solos do DF de acordo com características químicas, estruturais e mineralógicas dos solos. Posteriormente, tal definição foi retificada por Reatto et al., 2004 de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS).

Os solos existentes no DF são predominantemente da classe dos latossolos (54,47%), seguidos pelos cambissolos (31,02%) e podzólicos (4,09%), além de outras classes em menores proporções, tais como nitossolos, neossolos flúvicos, neossolos quartzarênicos e plintossolos (Martins, 1998; Martins e Baptista, 1998; Reatto et al., 2004).

Na área de estudo em questão, estão presentes os solos latossolo vermelho (LV), Latossolo vermelho-amarelo (LVA), cambissolo háplico (CX) e a classe de solos indiscriminados (Hi) (Reatto et al., 2004; EMBRAPA, 2018)(Figura 3). De forma geral, as classes de latossolo ocorrem nas porções mais planas, são mais desenvolvidos, apresentam maiores espessuras e recobrem toda área do ACJC, sendo que os LV estão concentrados na porção sudoeste do aterro e o LVA, na porção noroeste dele. Associado às drenagens nas proximidades do aterro, foram mapeados os solos Hi e, em algumas porções de maior declividade, estão localizados os solos CX.

Os estudos pedológicos realizados no interior do ACJC convergem em descrever solos representados por horizontes latossólicos desde espessuras de poucos metros até 25 metros. Essas camadas estão sobrepostas a saprólitos que correspondem a ardósias altamente intemperizadas da Formação Ribeirão do Torto de no máximo 4 metros de espessura (Franco, 1996). Campos et al. (2007) realizaram perfis de sondagem mecânica e manual nos limites do ACJC, com profundidade dos furos de até 37 metros de profundidade, sendo identificado um regolito de aproximadamente 20 m de profundidade, sem muita variabilidade de cor, composição e estrutura entre os horizontes do perfil descrito.

Em contrapartida, Pereira et al. (1997), através de campanha de sondagem mista, identificou cinco tipos de solo no ACJC por meio da descrição táctil visual e classificação expedita (MCT). Além das camadas de LVA e LV descrita em diversos

trabalhos (Franco, 1996; Santos, 1996; Pereira et al., 1997; Água e Terra, 2006), o autor descreveu camadas de cascalho laterítico (com espessura da ordem de 2 metros), além de solo saprolítico de quartzito e solo residual coluvionar.

As características geotécnicas apontam para um solo muito homogêneo, alta porosidade (> 60%), altamente permeável, e com elevado teor da fração argila (> 50%). Estudos indicam a presença de frações granulométricas referentes à areia, entretanto isso não representa a dimensão real dos grãos, mas sim, a existência de um estado de agregação das partículas de menor diâmetro, fruto da presença abundante de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Santos, 1996). Parte dos solos está contaminada com metais e outros materiais derivados da decomposição do lixo, contudo, na maior parte da área, os espessos latossolos apresentam suas feições naturais preservadas. (Campos, 2007).

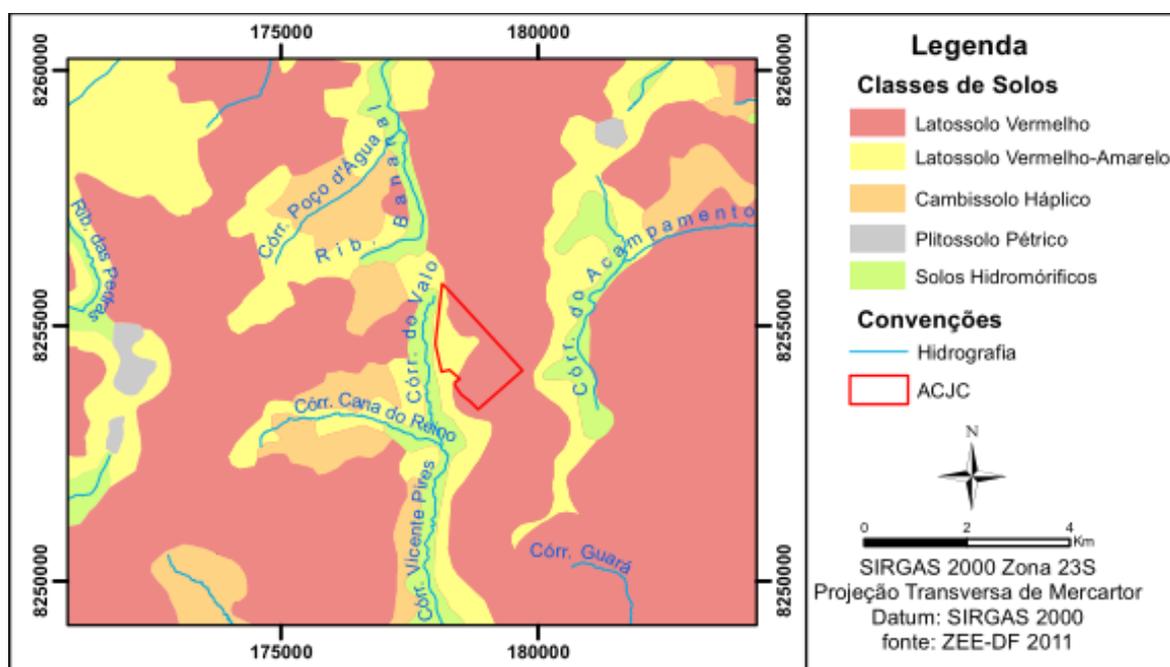


Figura 3 - Mapa pedológico do ACJC e entorno. Fonte: ZEE-DF 2011.

2.4 Hidrogeologia

A hidrogeologia do Distrito Federal por ser subdividida em dois grupos de aquíferos, freático e profundo (Campos, 2004). No grupo profundo, inclui-se não só o domínio fraturado, caracterizado por reservatórios em fraturas de rochas metassedimentares, mas também algumas porções cársticas restritas, denominadas domínio Físsuro-cárstico. Já o grupo freático inclui o domínio intergranular,

caracterizado por espessos perfis de solo, fruto do intemperismo das rochas do corpo rochoso. A divisão dos domínios em sistemas e subsistemas, bem como as características hidráulicas e geológicas, podem ser sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Sistemas e subsistemas do domínio Intergranular, Fraturado, e fissuro-Cárstico do Distrito Federal. Fonte: adaptado de Campos (2013).

GRUPO	DOMÍNIO	SISTEMA	SUBSISTEMA	ESPESSURA (m)	VAZÃO MÉDIA (m ³ /h)	CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (m/s)	COMPOSIÇÃO	
Freático	Intergranular	Sistema P ₁		>20	<0.8	> 10 ⁻⁶	Latossolos Arenosos e Neossolos Quartzarênicos	
		Sistema P ₂	-	>20	<0.5	> 10 ⁻⁶	Latossolos argilosos	
		Sistema P ₃		<10		10 ⁻⁶	Plintossolos e Argissolos	
		Sistema P ₄		1 a 2.5	<0.3	< 10 ⁻⁷	Cambissolo e Neossolo Litólico	
Profundo	Fraturado		S/A		12.5		Metassiltitos	
			A		4.5		Ardósias	
		Paranoá	R3/Q3		12		quartzitos e metarritmitos arenosos	
			R4	<250	6.5	-	Metarritmitos argilosos	
		Canastra	F		7.5		Filitos micáceos	
		Bambuí	-		6		Siltitos e arcóseos	
		Araxá	-		3.5		Mica xistos	
	Fissuro-Cárstico	Paranoá	PPC			9		Metassiltitos e lentes de mármore
		Canastra	F/Q/M	<250		33		Calcifilitos, quartzitos e mármore
		Bambuí (base)	-					Lentes de Calcáreos

Nas circunstâncias da área de estudo, foram cartografados no domínio poroso os sistemas P1, P3 e P4, que correspondem as classes de solos LV/LVA, CX, Hi, respectivamente. Dentro do perímetro do ACJC, a classificação é por inteira no subsistema P1 (Figura 4). Os latossolos que compõem o subsistema P1 na área de estudo são definidos como heterogêneos e anisotrópicos, espessos, altamente permeáveis e argilosos. Apresentam espessura saturada da ordem de 30 metros e zona não saturada variando de 3 metros (no período chuvoso) até mais de 10 metros (nos meses secos) (Campos, 2007). Santos (1996) relata valores de condutividade hidráulica verticais de 2x10⁻⁵ a 4x10⁻⁵ m/s enquanto Pereira (1997) relata valores de condutividade ligeiramente menores da ordem de 10⁻⁶ m/s. Campos (2007) relata valores de condutividade hidráulica menores ainda, da ordem de 10⁻⁶ a 10⁻⁷ m/s,

devido a estruturação granular e grumosa que modifica o comportamento do funcionamento hídrico dos latossolos em questão.

No âmbito de grupo profundo para o ACJC, foi cartografado o subsistema A do domínio fraturado, o que condiz com a litologia mapeada de Ardósias da Fm. Ribeirão do Torto. As grandes espessuras do domínio poroso, sobreposto ao domínio fraturado, servem como principal zona de recarga para o subsistema A. Campos (2007) relata o subsistema fraturado no perímetro do ACJC como fortemente anisotrópico e heterogêneo, condutividade hidráulica média da ordem de 10^{-7} m/s, vazões médias de 4.500 L/h (com alta incidência de poços secos) e restrita continuidade lateral. O autor ainda considera o aquífero com reduzida vocação hidrogeológica e com vulnerabilidade baixa a muito baixa.

Pereira (1997), através de uma campanha de sondagens mecânicas e geofísicas associadas a ensaios de infiltração, elaborou um modelo hidrogeológico para o ACJC. O autor afirma que as camadas de solo laterítico e o saprólito possuem comportamentos hidráulicos similares, isto é, as águas superficiais – essencialmente pluviais – infiltram e escoam por ambas camadas permeáveis. Além disso, o modelo hidrogeológico consiste em um sistema de grábens formados por falhamentos na direção NE dentro do pacote de rochas ardosianas, das quais serve como barreira hidráulica, o que favorece o fluxo das águas subterrâneas para o vale no sentido dos grábens, ou seja, com direção NE.

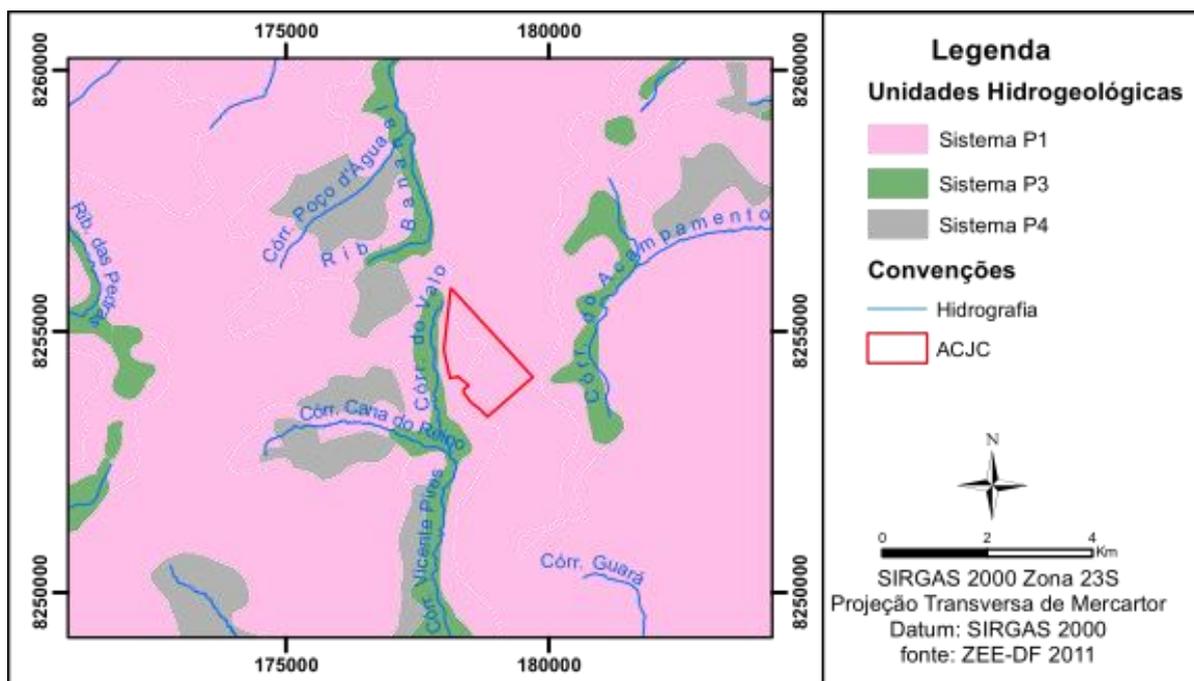


Figura 4– Mapa hidrogeológico do ACJC e entorno. Fonte: ZEE-DF 2011.

2.5 Geomorfologia

Novaes Pinto (1994) descreveu a paisagem do DF em 13 unidades geomorfológicas agrupadas em 3 macro unidades características do bioma Cerrado: região de chapada, área de dissecação intermediária e região dissecada de vale. Segundo o autor, a área onde se localiza o ACJC corresponde a unidade Depressão do Paranoá, inserida na macro unidade de dissecação intermediária. Já Martins e Baptista (1988), compartimentaram o DF em 5 unidades geomorfológicas: Chapadas elevadas, Rebordos, Planos intermediários, Escarpas e Planícies. (ZEE, 2011) realizou uma proposta de compartimentação que integra os estudos de Novais Pinto (1994) e Martins e Baptista (1998). A Figura 5 apresenta tal proposta para a região onde se localiza ACJC.

O ACJC está localizado no Plano intermediário da compartimentação geomorfológica, que representa uma região residual de aplainamento do semi domo de Brasília, controlado pelas rochas pelíticas de maior erodibilidade. A oeste do Aterro, o relevo muda para uma região de chapada elevada, mais especificamente denominada Chapada da Contagem, que configura grande parte do semi domo de Brasília, composta por quartzitos resistentes.

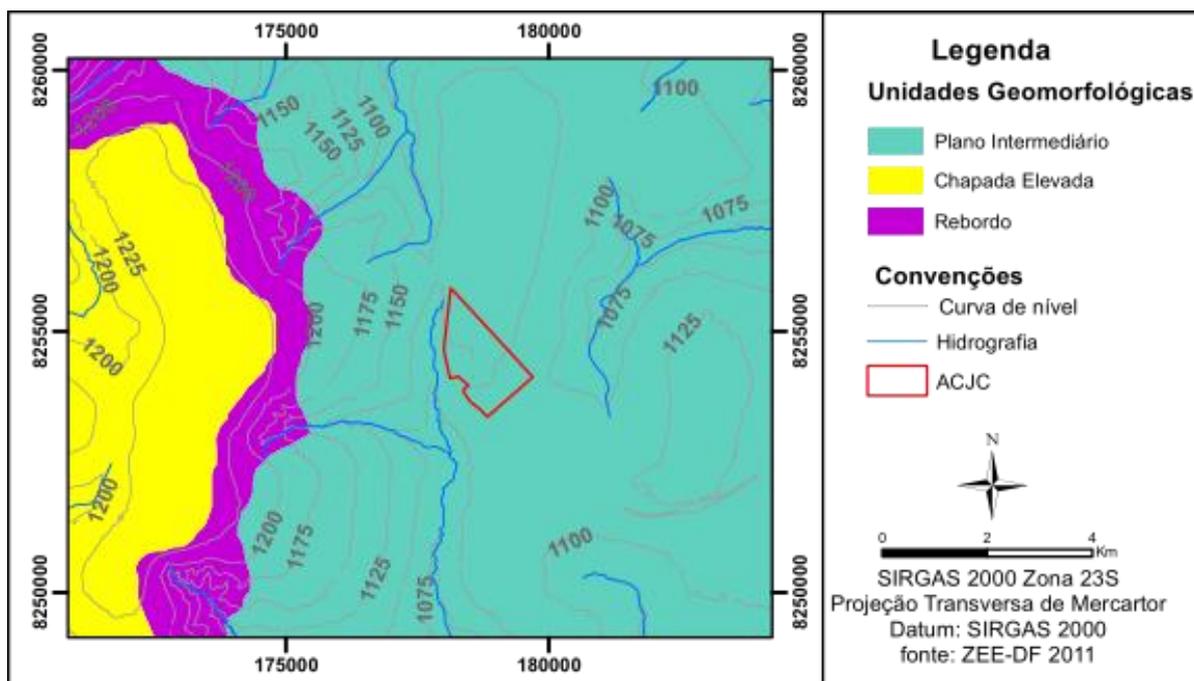


Figura 5 – Mapa Geomorfológico do ACJC e entorno. Fonte: ZEE-DF 2011.

2.6 Hidrografia

O Distrito Federal é irrigado por três grandes Regiões Hidrográficas do Brasil, quais sejam a do São Francisco, do Tocantins/Araguaia e do Paraná. No território distrital, encontram-se cinco bacias hidrográficas: São Bartolomeu, Paranoá, Descoberto, Corumbá e São Marcos. O ACJC está compreendido na região da Bacia do Paranoá.

A Bacia do Paranoá é a única entre as seis bacias que está inserida totalmente no território do Distrito Federal. Abrange uma área de aproximadamente 1004 km², que abarca as regiões administrativas de Brasília, Lago Norte, Lago Sul, Núcleo Bandeirante, Riacho Fundo, Candangolândia, Cruzeiro e Guará, além de parte da Região Administrativa de Taguatinga. 5% da bacia é composta por corpos hídricos como o Lago Paranoá, fruto do barramento do Rio Paranoá no ano 1959; e o Lago Santa Maria, importante manancial para o consumo de água no DF. Outros 30% da ocupação da bacia são áreas urbanas, 26% de formações savânicas e os 25% restantes, de formações campestres.

Pela análise da topografia da área de estudo, pode-se afirmar que o ACJC é um divisor de águas entre as unidades hidrográficas do Córrego Bananal e do Riacho Fundo, ambas pertencentes à Bacia do Paranoá. A sudeste do limite do ACJC, onde

está localizado o Parque Nacional de Brasília (PNB), encontra-se o Córrego do Acampamento, que desagua no córrego Ribeirão Bananal, localizado a norte do limite do Aterro. A oeste do ACJC, paralelamente ao limite do aterro e à cidade Estrutural, desagua o córrego Cabeceira do Valo.

2.7 Topografia

O relevo predominante na região de estudo é plano a suave ondulado, com declividades inferiores a 10% e cotas superiores a 1100 m, e cobertura vegetal cerrado campo limpo e campo sujo, típico de terrenos aplainados. No âmbito da área de estudo, a topografia natural foi intensamente modificada desde o início do funcionamento do ACJC.

Atualmente, o local foi modificado de tal forma que o centro do aterro é um alto topográfico conhecido informalmente como “Bolo de Noiva”. A topografia atual da área, utilizada nesse trabalho, é o resultado de pesquisas de Diniz (2019), obtida por meio de uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) e o levantamento de coordenadas de pontos de controle, o que resultou num produto que atende o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) Classe A, para uma escala planimétrica de 1:2000 e equidistância de curvas de nível de 2 m (Diniz et al., 2019).

2.8 Clima

O Distrito Federal está localizado no Planalto Central, cuja maior parte é incluída no domínio morfoclimático do Cerrado (Ab’Saber, 1964). O Cerrado é composto por um mosaico de diferentes vegetações resultantes da diversidade de solos, variação da topografia e a diversidade de clima existente nessa região (Cardoso et al. 2014). Apesar da dificuldade de correlacionar as características fitofisiológicas do bioma Cerrado com o clima, sabe-se que esse é caracterizado por áreas onde predominam climas tropicais úmidos com duas estações bem definidas, isto é, por invernos secos no meio do ano e verões chuvosos, no final e no início do ano (Nimer, 1989). Além disso, em função da influência da massa de ar tropical marinha e equatorial, as temperaturas são elevadas durante todo o ano (Cardoso et al., 2014).

O Distrito Federal apresenta apenas o tipo Aw de clima segundo a classificação de Köppen-Geiger, que corresponde à região com clima tropical com estação seca no inverno. A precipitação anual média oscila entre 1200 a 1750 mm. A estação seca se

estende de maio a setembro e a estação chuvosa de outubro a abril, com maior pluviosidade no verão (dezembro a março). A temperatura média anual é de 21,8 °C.

A Figura 6 representa a normal climatológica precipitação relativa média e os respectivos coeficientes de variação de cada mês. Os dados foram obtidos por uma estação meteorológica pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e distante de aproximadamente 7 quilômetros do ACJC (Latitude: -15.789343°; Longitude: -47.925756°). A organização Meteorológica Mundial (OMM) define normais como “valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas”. Para o gráfico em questão, foram utilizados dados de precipitação média mensal do período de 1960 a 2019. A soma das precipitações totais mensais médias do período de estudo foi aproximadamente 1492,69 mm. Os meses do período chuvoso (novembro a março) tiveram a média de precipitação mensal variando de 200 mm a 250 mm, com coeficiente de variação elevado (> 30%), indicando relativa dispersão dos valores de precipitação entre os anos analisados. Já nos meses que compreendem o período da estação seca (maio a setembro), a média de precipitação mensal variou de 10 mm a 40 mm, com coeficiente de variação muito alto (> 100%), o que indica grande imprevisibilidade com relação a precipitação mensal durante o período analisado.

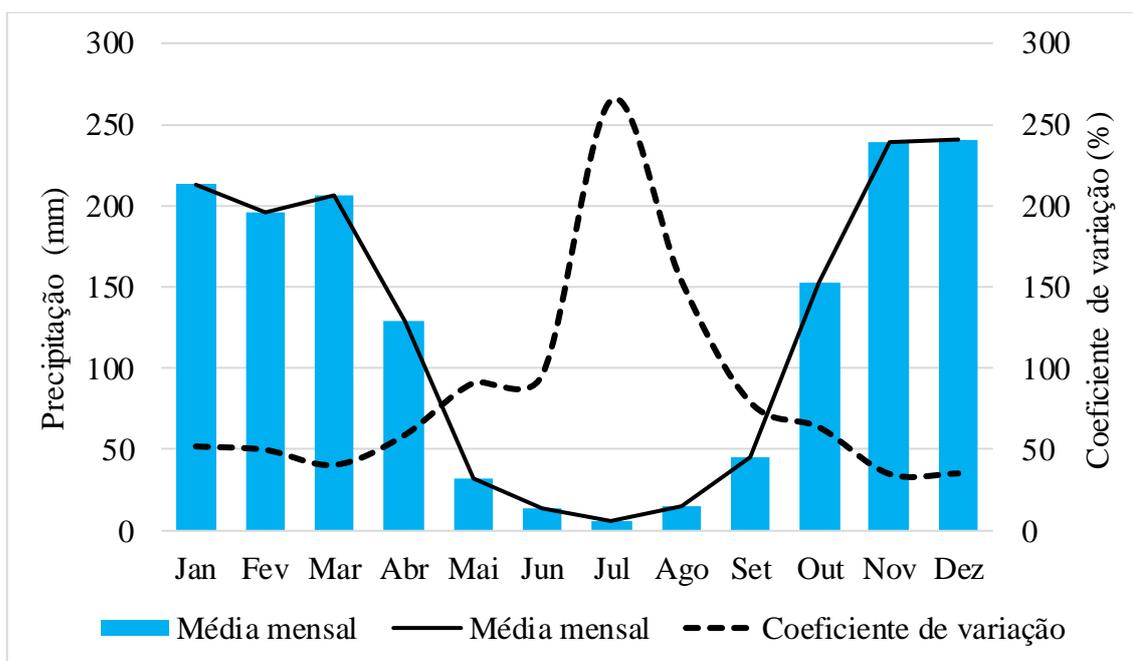


Figura 6 – Série histórica 1961 – 2020 da precipitação relativa média mensal e os respectivos coeficientes de variação da Estação Meteorológica de Brasília (EMB) (Cód.83377). Fonte: INMET (2020).

A Figura 7 representa a temperatura média mensal do período de 1960 a 2019, segundo os dados pertencente ao INMET. Nos meses mais secos, a temperatura média oscila entre 19,5 a 21,2 °C. Em contrapartida, nos meses mais úmidos, a temperatura varia de 21,8 a 22,5 °C, em média. A temperatura mensal média apresenta baixa variabilidade (< 8%), com exceção dos meses chuvosos de fevereiro (14%) e outubro (11%).

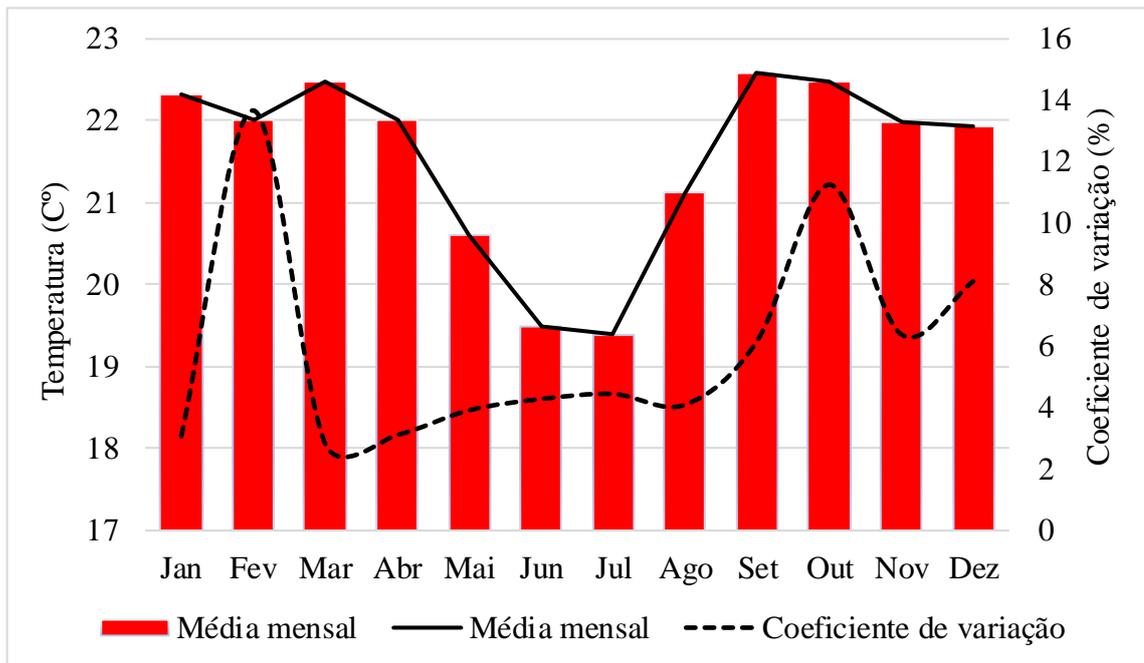


Figura 7– Série histórica 1961 - 2019 da temperatura relativa média mensal e os respectivos coeficientes de variação da EMB (Cod.83377). Fonte: INMET (2020).

2.9 Histórico de deposição de resíduos

O início da deposição de resíduos no ACJC se deu no final da década de 1960 e se estendeu até início de 2018, quando o aterro foi oficialmente fechado no dia 20/01/2018. Atualmente, o local funciona como uma Unidade de Recebimento de Entulhos (URE) na parte central do antigo aterro.

Em meados da década de 1960, foi inaugurada uma usina de tratamento de lixo situada na porção sul do Plano Piloto. Essa usina recebia a maior parte do lixo produzido no DF e foi construída para transformar o lixo biodegradável em composto orgânico, além de fazer a separação de materiais inertes reaproveitáveis. Por questões de manejo e logística, a outra parte dos resíduos produzidos no DF eram depositados em cinco vazadouros distribuídos fora da área metropolitana: Planaltina,

Sobradinho, Taguatinga, Brazlândia e Gama. Além dessas, havia também um vazadouro a sul do ACJC, onde hoje está situado o Parque Nacional, que também recebia os rejeitos da usina e parte do lixo produzido nessa área.

Com o aumento progressivo da população do Distrito Federal e a preocupação com a destinação e manejo dos resíduos produzidos na cidade na década de 1970, foi elaborado o 1º Plano Diretor de Limpeza Urbana Do Distrito Federal (Codeplan, 1979). O plano tinha por objetivos melhorar a destinação final do lixo produzido no DF e implantar novas usinas de tratamento a fim de substituir a crescente prática de despejo de resíduos a céu aberto. A partir de então, os vazadouros foram gradualmente desativados e a usina de tratamento a sul do Plano Piloto foi ampliada para suprir as demandas de processamento de resíduos até que, em 1985, o ACJC ficou como a única opção oficial de aterramento de lixo.

Em 1996, a área onde se encontra a URE hoje foi completamente coberta de resíduos para atender a alta demanda de descarte. Santos (1996) relata que os resíduos eram descartados em trincheiras de até 6 m de profundidade, 100 m de comprimento e 20 m de largura pelo método de rampa, em que o próprio solo retirado da escavação é utilizado para recobrir a trincheira de lixo. Vale ressaltar que o método de deposição era bastante simples, não apresenta controle de drenagem de chorume superficial ou subterrâneo. A compactação dos resíduos era insuficiente, e não existia sistema de drenagem de gases (LM, 1998).

Em algumas porções do aterro, o descarte dos resíduos ocorria de forma totalmente aleatória sobre o solo natural. Grandes quantidades de lixo que não participavam da célula aterrada, como ferragens, plásticos, entulhos, madeira, vidro, etc., formavam verdadeiros lixões. Associado a esses locais de lixo a céu aberto, havia inúmeros “catadores” ilegais, que viviam da comercialização de resíduos triados manualmente, fato que prejudicava o manejo e o aterramento dos resíduos em superfície. Além disso, essa situação contrariava totalmente as diretrizes do sistema de saúde pública e de saneamento básico (Nisiyama, 2019). Ademais, o descarte inadequado, aliado à falta de monitoramento, favorecia a proliferação de vetores de doenças como os insetos, os pequenos roedores, os animais de estimação, os bovinos, os equinos e as aves.

Tendo em vista os diversos problemas relacionados a gestão do ACJC, o Governo do Distrito Federal firmou, em 1992, o Projeto do Aterro Sanitário a fim de remediar os impactos gerados e promover a adequação do ACJC.

Concomitantemente, vários estudos, como os de Franco (1996) e Pereira et al. (1998), foram realizados pela Universidade de Brasília e propuseram diversas ações de remediação ambiental do sítio degradado levando em consideração os aspectos físico-químicos e biológicos, a fim de implantar um aterro sanitário conforme as recomendações do termo de referência estabelecido. O projeto do Aterro Sanitário nunca chegou a ser executado e o padrão de disposição continuou a ser mantido conforme os anos anteriores.

Pela observação de imagens de satélite disponíveis pela plataforma *Google Earth*, é possível afirmar que, do ano 2002 a 2012, a deposição de resíduos se deu majoritariamente no terço central do ACJC e pequenas porções a sudoeste e a nordeste, no limite entre o aterro e o Parque Nacional (Figura 8). A partir de 2013, a região de deposição entre o Parque e o Aterro foram progressivamente substituídas pela área a norte do ACJC, até que o local foi abandonado e embargado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) (Nisiyama, 2019). Tal fato é observado a partir de imagens de satélite em que o crescimento da vegetação limítrofe ao Parque cresceu em direção ao centro do aterro nos anos de 2013 até 2017, até que, no ano 2017, é possível observar uma faixa contínua e aglutinada de deposição N-S. Após o fechamento oficial do ACJC em 2018, o local foi completamente aterrado por material terroso, não sendo possível distinguir por imagem de satélite a região disponibilizada para descarte de entulho de 2018 e 2019. Entretanto, pelas visitas ao aterro e relatos dos funcionários, sabe-se que a deposição de resíduos se concentrou na parte centro sul do ACJC.

Nos anos finais de funcionamento do ACJC, algumas medidas foram realizadas que permitiram enquadrar o local como aterro controlado e não lixão. Dentre as medidas, pode-se citar: recuperação do sistema de drenagem, instalação de queimadores de gases, controle do acesso de pessoas ao local, e instalação de cercas em torno dos limites (SLU, 2016).

Projetos recentes foram conduzidos com objetivo a descomissionamento do antigo lixão, e remediação ambiental das áreas cominadas pelo descarte de resíduos sólidos Urbanos. Dentre eles, podemos citar o projeto Raeesa (2018 a 2020), em parceria com a Universidade de Brasília e convênio da CEB GERAÇÃO S.A e CEB Lajeado S.A, intitulado como “Hibridização de Fontes de Geração de Energia elétrica como Alternativa Tecnológica de Remediação Ambiental de Áreas Degradadas por Resíduos Sólidos Urbanos – Estudo de Caso: Aterro Controlado do Jockey Clube

(Lixão da Estrutural – Brasília-DF).” Além desse, o projeto parceria com Universidade de Brasília em andamento até o presente momento, tem como objetivo caracterização Hidrogeológica e elaboração de um modelo conceitual da contaminação dos solos pelo antigo ACJC (Campos et al., 2021).

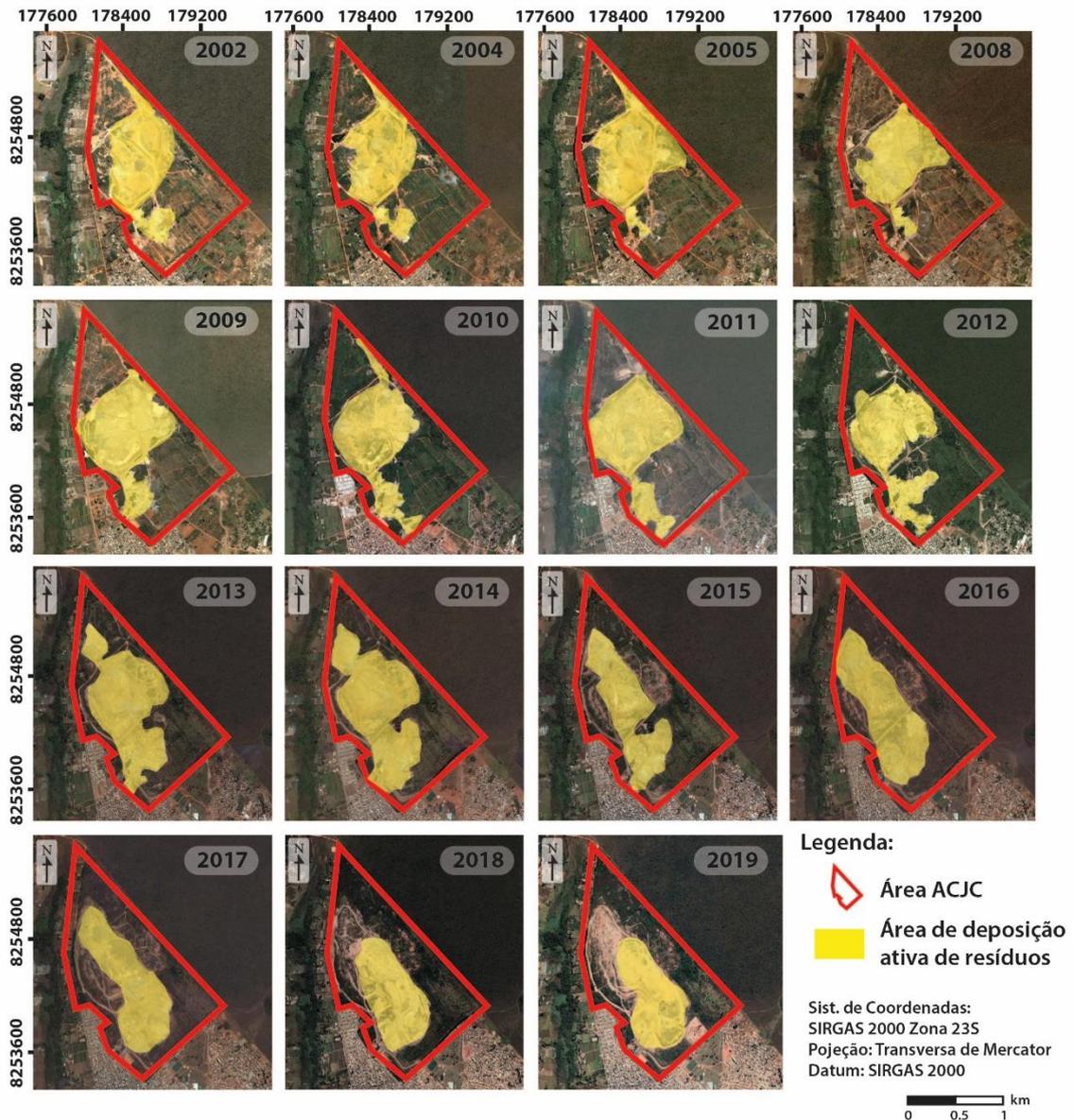


Figura 8 – Histórico de deposição de resíduos no ACJC de 2002 a 2019. Fonte: *Google Earth*.

2.10 Estudos geofísicos anteriores no ACJC

Alguns estudos geofísicos foram realizados nos limites do ACJC, estando principalmente relacionados a trabalhos de eletrorresistividade 2D, *Ground Penetrating Radar (Simulation Interactive Reconstruction Technique)*, sondagem elétrica vertical (SEV) e sísmica de refração.

Na tentativa de determinar a espessura do solo, da camada de lixo aterrada e da profundidade do nível freático, Franco (1996) adquiriu cinco perfis sísmicos de refração de 49 m e 12 m, respectivamente. Devido a pequena espessura da camada de lixo e do pequeno comprimento do arranjo de geofones, apenas a profundidade do nível freático de aproximadamente 7,5 m foi determinada pelo método da refração. Ainda no trabalho de Franco (1996), um total de 86 SEV's foram compiladas na avaliação do aquífero superficial. Os resultados apontaram para uma espessura de solo de até 16 a 18 metros sobre as ardósias. Além disso, as SEV's definiram dois *trends* preferenciais de baixa resistividade. O primeiro do aterro em direção a Vicente Pires e o outro associado à nascente do Córrego do Acampamento. Mapas de contornos de isovalores de condutividade elaborados com dados de perfilagem eletromagnéticas no mesmo estudo também confirmaram o *trend* de dispersão no sentido da nascente. Nestes mapas de contorno, à medida que se investiga em profundidade, os *trends* de propagação ficam mais estreitos. Sobre isso, o autor sugere estar condicionado a um sistema de falhas e fraturas da rocha do embasamento do aterro.

Cavalcanti et al. (2014) realizaram um estudo da evolução da pluma de contaminação gerada pela percolação de chorume nos limites do parque utilizando os métodos da eletrorresistividade e GPR. Este trabalho permitiu delinear o fluxo preferencial da pluma de contaminação nos sentidos sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste do aterro JCB. No estudo de Cavalcanti et al. (2014), foram obtidas 15 seções de eletrorresistividade com a influência da pluma de contaminação e uma seção geométrica de *background* (sem influência da contaminação). A seção de *background* obteve resistividade elétrica de acima de 2000 *ohm.m* para o latossolo e embasamento (provável ardósia – Formação Ribeirão do Torto) e 700 a 2000 *ohm.m* para o saprólito da ardósia. O estudo afirma também pelos resultados geofísicos que a profundidade do topo rochoso está mais rasa a leste, sugerindo um aprofundamento para oeste.

A partir da análise histórica dos estudos realizados no ACJC, os métodos geofísicos se revelam os mais aplicados neste tipo de investigação em áreas para disposição de resíduos sólidos. Tais métodos mostram eficiência e confirmam ser ferramentas versáteis e de qualidade, com baixo custo de aplicação quando comparados com os demais métodos diretos de investigação.

CAPÍTULO 3

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Métodos sísmicos

Os métodos sísmicos se baseiam no estudo da propagação de ondas elásticas em subsuperfície ocasionadas por uma fonte controlada ativa, ou passiva em superfície. Os levantamentos sísmicos são amplamente aplicados na indústria de óleo e gás. Correspondem a mais de 90% do investimento no mundo em geofísica aplicada (Milsom, 2003), devido à confiabilidade em delinear estruturas sedimentares a milhares de metros em profundidade. Outra aplicação dos métodos sísmicos é no delineamento de estruturas próximas à superfície para engenharia e na exploração de carvão e minerais em até 1 km de profundidade. Esse estudo é conhecido como engenharia sismológica (Reynolds, 2011). Além disso, os levantamentos sísmicos podem ser aplicados na investigação da crosta terrestre dentro de uma profundidade de 100 km, conhecida como sismologia de terremotos (Yilmaz, 2001).

Os principais métodos sísmicos na geofísica aplicada são a Sísmica de Refração, a Reflexão e, menos comumente, a Análise de Ondas de Superfície (MASW e SASW), sendo a Reflexão mais utilizada para investigações mais profundas em subsuperfície como na indústria do óleo e gás, enquanto a sísmica de refração e a MASW para investigações mais próximas à superfície, como nas investigações de engenharia. Sendo assim, o presente trabalho se utiliza dos métodos de investigações para interfaces mais rasas, como por exemplo na aplicação para aterros sanitários: a Sísmica de Refração e a MASW.

Nessa pesquisa, serão apresentados os fundamentos básicos da propagação de ondas sísmicas. Posteriormente, serão abordados separadamente os princípios dos métodos de sísmica de refração e MASW e uma simples rotina de aquisição, processamento e inversão dos dados. Além disso, serão apresentados exemplos de trabalhos de aplicação desses métodos envolvendo aterros sanitários.

3.1.1 Ondas sísmicas

As ondas sísmicas são pacotes de energia que se propagam radialmente a partir de uma fonte sísmica, como um terremoto ou uma explosão. Essas fontes geram um pacote de ondas conhecidos como pulsos, que contêm uma ampla gama de frequências (Reynolds, 2011). Existem vários tipos de movimentos de ondas elásticas geradas após um distúrbio sísmico que permitem subdividir o pacote de ondas em ondas de Corpo ou de Superfície (Figura 9). As ondas de Corpo podem ser compressionais P (Primárias), que se propagam por deformação uniaxial (compressão e expansão) e alinhadas à direção de propagação, ou podem ser cisalhantes S (Secundárias), alinhadas a uma direção perpendicular à direção de propagação. Os principais métodos que se apropriam dos estudos das ondas de corpo, principalmente das ondas P, são os métodos de refração e reflexão, sendo o último não abordado nesse trabalho.

As ondas de superfície ou *Ground roll*, em contrapartida, são ondas que se deslocam mais lentamente que as ondas de corpo e possuem maior energia. Por essa razão, são predominantes em registros físicos e normalmente desconsideradas em análises de estudos de refração e reflexão. Existe enorme variedade de ondas superficiais: *Rayleigh*, *Love*, *Scholte*, *Lamb* e *Stoneley*, sendo as duas primeiras as principais. As ondas *Rayleigh* resultam da interação das ondas P com as ondas Sv (componente vertical da onda cisalhante). Essas se propagam em uma superfície livre necessariamente sólida e as partículas afetadas têm movimentos elípticos retrógrados num plano perpendicular à direção de propagação da onda. Em um semiespaço homogêneo, a velocidade de propagação da onda *Rayleigh* é de aproximadamente 90% da velocidade da onda S ($V_r = 0,9V_s$) (Strobbia, 2003). As ondas *Love* são igualmente ondas de cisalhamento (só se propagam em meios sólidos) e as partículas afetadas se movimentam paralelamente à superfície e perpendicularmente à direção de propagação da onda.

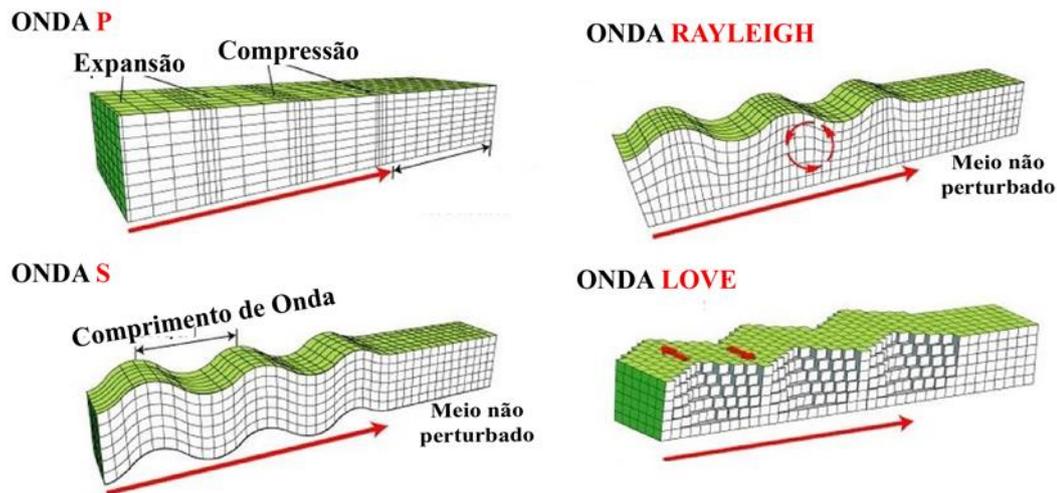


Figura 9 – Trajetória de partículas associado a diferentes tipos de onda. Fonte: adaptado de Science Learning Hub (2021). Disponível em: <https://www.sciencelearn.org.nz/images/353-earth-waves>. Acesso em: 20 out 2021.

As ondas superficiais possuem um caráter dispersivo (seção 3.3.1), diferentemente das ondas de corpo. Isso impulsionou o desenvolvimento do método de análise espectral de ondas de superfície (SASW) e, posteriormente, da análise multicanal de ondas superficiais (MASW), sendo o último, utilizado no presente estudo.

3.1.2 Propagação de ondas sísmicas

- **Propagação de ondas de corpo**

Suponha-se um plano cartesiano como referência, em que o eixo x é paralelo à direção de propagação da onda plana e os eixos y e z são o plano da frente de onda. Por consequência, a passagem da onda produz uma sequência de compressões e expansões na direção x .

Em uma posição arbitrária do eixo x , a passagem da onda sísmica produz o deslocamento u e a força F_x na direção x . Já na posição $x + dx$, o deslocamento será de $u + du$ e a força será de $F_x + dF_x$. Assim, dx é o comprimento infinitesimal de um pequeno elemento de volume que tem massa $\rho dx A$. A força resultante que atua sobre esse elemento na direção x é dada por:

$$dF_x = \frac{\partial F_x}{\partial x} dx$$

(1)

Para determinar o movimento causado pela tensão “resultante”, aplica-se a 2ª Lei de Newton ($F = m \cdot a$) e, posteriormente, o conceito de tensão uniaxial em que $F = v_{xx} A_x$. Assim, é possível reescrever a equação unidimensional do movimento:

$$(\rho dx A_x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = dx A_x \frac{\delta v_{xx}}{\delta x} \quad (2)$$

A deformação longitudinal ϵ_{xx} é proporcional ao componente de tensão no eixo x ou seja v_{xx} , e ao módulo de Young E , isto é, $v_{xx} = E \epsilon_{xx}$. Também pode ser reescrita dessa forma:

$$v_{xx} = E \epsilon_{xx} = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

Substituindo a eq. (3) na eq. (2), é possível obter a equação da onda unidimensional:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4)$$

Em que V é a velocidade de onda de corpo num material homogêneo, isotrópico, é dada por:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

Essa representação unidimensional é restritiva à compressão e à expansão na direção x , ou seja, não considera os efeitos da tensão nas direções y e z . Dobrin e Savit (1988) desenvolveram uma versão tridimensional da equação de onda compressional que considera as tensões resultantes em todas as direções. Os autores consideraram a dilatação e compressão volumétrica ($\Delta V/V = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$), em vez de compressão e extensão unidimensional. Ao invés de olhar para os deslocamentos em apenas uma direção, todos os três eixos foram considerados. Desse modo, a equação da velocidade da onda compressional resultante na direção x pode ser reescrita como:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{3}{4}\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1 - \nu)E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}} \quad (6)$$

Em que λ é o módulo de compressibilidade ou o primeiro parâmetro de Lamé, μ é módulo de rigidez (*shear modulus*) ou segundo parâmetro de lamé, e K expressa a incompressibilidade ou módulo de volume (*bulk modulus*).

Da mesma forma, a equação da velocidade da onda de corpo cisalhante na direção x , que envolve o cisalhamento puro, é dada por:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (7)$$

O módulo de rigidez μ é a única propriedade elástica que determina a velocidade da onda cisalhante. Em gases e líquidos, o $\mu = 0$ e a onda S não se propaga. Pela análise das equações (6) e (7), a velocidade da onda P sempre excede a velocidade da onda S, $V_p > V_s$, uma vez que materiais sólidos apresentam maior resistência a forças de compressão em relação a forças de cisalhamento. V_s é normalmente de 40 a 60%, mas nunca excede cerca 70%, da V_p (Everett, 2013). A relação entre a V_p/V_s pode ser expressa por:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu}} \quad (8)$$

Pela análise da eq. (8), é possível afirmar que a razão de Poisson pode ser estimada a partir de uma análise *in situ* das velocidades V_p e V_s de uma determinada superfície. Com isso, os métodos geofísicos de obtenção de V_p e V_s se mostram extremamente aplicáveis na engenharia geotécnica.

- **Propagação de ondas de superfície**

As ondas de superfície se propagam paralelamente à superfície da terra. A amplitude dessas ondas decai exponencialmente com a profundidade. Além disso, a maior parte da energia gerada por elas se dispersa em uma zona de baixa profundidade, ou seja, possuem um caráter dispersivo das ondas. O pacote de ondas

de diferentes frequências se propaga em velocidades de fase distintas e tem sua forma alterada durante a propagação.

A velocidade de propagação das ondas de superfície depende da velocidade da onda P e onda S, porém principalmente a onda S (Strobia, 2003). Para um semiespaço homogêneo, por exemplo, a velocidade de propagação da onda *Rayleigh* é de aproximadamente 90% da velocidade da onda S ($V_R \approx 0,9V_S$) (Strobbia, 2003). Mais detalhes sobre o modo de propagação de ondas de superfície será descrito na seção 3.3.1.

3.1.3 Coeficiente de *Poisson* e Módulo de *Young*

A relação de deformação quando aplicada uma tensão em um determinado local (por exemplo, um aterro) depende de diversos fatores, como a composição do material aterrado, a relação de vazios, a história de esforços e a forma como se aplicou o esforço. Uma forma de expressar matematicamente a relação de esforço-deformação se torna muito complexa ao considerar todos esses fatores. Por essa razão, é útil recorrer a conceitos e fórmulas da teoria da elasticidade. Isso significa que as curvas reais não-lineares de esforço-deformação se linearizam ao implementar coeficientes de magnitude que descrevem o comportamento elástico de um determinado material para uma combinação particular de esforços. Esses coeficientes são conhecidos por *módulo de elasticidade* ou *Young* (E) e *coeficiente de Poisson* (ν).

O coeficiente de Poisson é a razão da deformação transversal em relação a deformação longitudinal. A relação estabelecida pode ser expressa como:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (9)$$

Em que ν é o coeficiente de *Poisson*, ε_x , ε_z e ε_y são as extensões nas três direções. O sinal negativo expressa extensões e o oposto expressa contração.

Pode-se ainda escrever o coeficiente de *Poisson* baseado nos valores das velocidades da onda P (V_p) e onda S (V_s) conforme a equação:

$$\nu = \frac{V_p^2/V_s^2 - 2}{2 \cdot V_p^2/V_s^2 - 1} \quad (10)$$

Ao efetuar um rearranjo da eq. (10), obtém-se a relação V_p/V_s apenas pelo valor do coeficiente de *Poisson*, conforme a equação:

$$\frac{V_p}{V_s} = \left[\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

O módulo de Young E expressa o esforço uniaxial σ_z e produzirá uma deformação vertical, conforme a equação:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \quad (12)$$

Pode-se escrever o *Módulo de Young dinâmico* (E_{din}), ou seja, um módulo que corresponde a uma deformação instantânea e muito pequena a partir da relação da onda P (V_p), da densidade (ρ) e do coeficiente de *Poisson* (ν), expresso matematicamente como:

$$E_{din} = \rho \cdot V_p^2 \cdot \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \quad (13)$$

3.2 Sísmica de refração

Um pulso sísmico se propaga radialmente a partir de uma frente de onda causada por uma determinada fonte sísmica. A velocidade com que o pulso sísmico se propaga depende das propriedades físicas do meio o qual a onda percorre. Em cenários de meios homogêneos, a velocidade de propagação será única durante todo o percurso. Já em meios estratificados, quando a onda encontra uma mudança nas propriedades elásticas dos materiais, parte da energia do pulso sísmico é refletido ou refratado (Yilmaz, 2001; Kearey et al., 2009; Reynolds, 2011).

A sísmica de refração é um método geofísico que se concentra no estudo da trajetória dos raios direto e refratado das ondas-P em subsuperfície a partir de uma fonte artificial (marreta, explosivo, queda de peso etc.) provocado na superfície (Milsom, 2003). O raio direto percorre linearmente através da interface superior, enquanto o raio refratado percorre obliquamente à primeira interface e depois ao longo da próxima interface de propriedades físicas distintas.

O tempo percorrido pelas ondas é registrado por receptores fixados na superfície que detectam a movimentação provocada pela passagem da onda. A partir

das informações do tempo de propagação e da distância entre a fonte e os receptores, é possível obter a velocidade aparente em que as ondas se propagam no meio e calcular a profundidade das interfaces sísmicas distintas. O tempo de percurso de uma onda direta ou refratada, desde a fonte até o receptor, depende da distribuição das velocidades que representa o meio por onde essa se propaga (Kearey et al., 2009).

A sísmica de refração é um método utilizado principalmente para investigações de interfaces com profundidades rasas, de camadas aproximadamente planas, e em que a velocidade aumenta com a profundidade de cada interface. É amplamente utilizada na engenharia e na hidrogeologia para identificação de camadas geológicas, bem como para identificar suas respectivas características físicas como espessura, resistência e localidade.

O método se utiliza apenas de uma pequena proporção das informações contidas nos traços sísmicos. Por essa razão, é de se esperar que a interpretação do método esteja sujeita a algumas limitações. Muitas vezes, há dúvidas sobre qual componente realmente produz as primeiras chegadas. Perto da fonte, existe energia suficiente para que as ondas P sejam mensuradas, mas, em distâncias maiores, as primeiras chegadas podem não serem identificadas. Outra limitação do método é quando a velocidade diminui em alguma interface. Dessa maneira, a refração crítica não poderá ocorrer e, conseqüentemente, a energia refratada retorna à superfície. Por fim, o método de refração foi proposto baseado em cálculos que requerem velocidades verticais, mas o que realmente é medido em campo são velocidades horizontais. Por essa razão, se houver alguma anisotropia lateral significativa no local de estudo, erros serão introduzidos (Milsom, 2003; Kearey et al., 2009).

O método sísmico de refração enfrenta muitas dificuldades de aplicação em aterros sanitários devido à forte heterogeneidade lateral do meio, resíduos sólidos pouco competentes, e forte presença de ruído ocasionado pelo maquinário (Lanz et al., 1998; De Iaco et al., 2003). A aplicação do método sísmico pode ser potencializada quando associada a outros métodos geofísicos como eletrorresistividade (Carpenter et al., 1991, 2013; Konstantaki et al., 2015; Zhao et al., 2020), que fornece uma análise qualitativa da distribuição espacial dos tipos de resíduos presentes na área de estudo. Além disso, informações suplementares de estudos sísmicos, como por exemplo de onda S, permitem a combinação de dados da onda P e S, que por sua vez fornecem informações geotécnicas importantes do meio como coeficiente de *Poisson* e o

módulo de cisalhamento (Carpenter et al., 2013; Konstantaki et al., 2015a; Zhao et al., 2020).

Diversos trabalhos aplicaram o método de sísmica de refração como uma excelente ferramenta para caracterização de aterros sanitários em subsuperfície. Bergamo et al. (2016), Syifa et al. (2020) e Syukri et al. (2020) utilizaram a sísmica de refração das onda S e onda P para determinar o limite entre o pacote de resíduos do aterro e o substrato rochoso. Cossu et al. (2005), Del Greco et al. (2007), Carpenter et al. (2013) e Abreu et al. (2016) utilizaram os valores de velocidade da onda P, em conjunto com a velocidade da onda S, para avaliar as respostas mecânicas dos resíduos sólidos municipais aterrados.

Na tentativa de determinar a espessura do solo, da camada de lixo aterrada e da profundidade do nível freático nos limites do ACJC, Franco (1996) adquiriu cinco perfis sísmicos de refração de 49 m e 12 m de extensão. Apenas a profundidade do nível freático de aproximadamente 7,5 m pôde ser determinada pelo método, visto que a espessura da camada de lixo era muito pequena na época para ser detectada na resolução dos sismogramas e o comprimento do arranjo de geofones não foi o suficiente para alcançar a profundidade almejada.

3.2.1 Princípios da sísmica de refração

A propagação de uma onda sísmica em um meio pode ser representada a partir de um raio sísmico. Um raio de incidência oblíqua em uma determinada interface forma um ângulo θ_i com a reta normal a superfície incidente (ângulo de incidência). Quando a energia se depara com a camada subjacente a anterior, de propriedades elásticas distintas, parte da energia sofrerá reflexão igual ao ângulo de incidência e outra parte sofrerá um desvio do raio, tal que o ângulo será de θ_r (ângulo de refração) em relação normal à superfície. O ângulo θ_i e θ_r se relacionam segundo a Lei de Snell (Figura 10) uma expressão que relaciona o desvio angular sofrido por um raio de luz (nesse caso um raio sísmico) com a velocidade da camada superior (V_1) e a camada inferior (V_2). Pode ser expressa pela equação:

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{V_1} = \frac{\text{sen}\theta_r}{V_2} \quad (14)$$

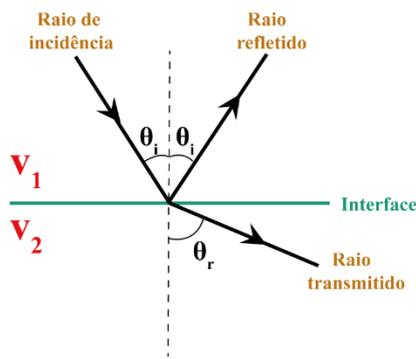


Figura 10 – Representação gráfica simplificada da trajetória de raios sísmicos descritos na "Lei de Snell". Adaptado de Kearey et al. (2009).

Quando um raio sísmico viaja de um meio de velocidade de propagação menor (V_1) para um meio de velocidade maior (V_2), existe um ângulo de incidência que resultará em um ângulo de transmissão igual a 90° , no qual o raio se move ao longo da superfície de contato entre as duas camadas. Esse ângulo é conhecido como ângulo crítico da refração (θ_c) (Figura 11). A partir da Lei de Snell, pode-se calcular o ângulo crítico pela equação:

$$\frac{\text{sen}\theta_c}{V_1} = \frac{\text{sen}90^\circ}{V_2} = \frac{1}{V_2} \quad (15)$$

Assim, que

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (16)$$

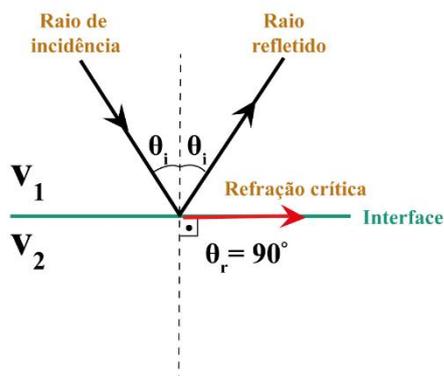


Figura 11 - Demonstração do maior ângulo de incidência possível que ainda resulta em um raio refratado (ângulo crítico).

O método da sísmica de refração se utiliza do processo de refração crítica para determinar a profundidade, o mergulho e a velocidade das camadas. De acordo com o princípio de *Huygens*, a interação da onda refratada de ângulo crítico com as interfaces produz ondas secundárias que por sua vez são transmitidas de volta à superfície e podem ser registradas por geofones na superfície de investigação. Se uma camada de menor velocidade sísmica está subjacente a uma camada de velocidade mais alta (inversão de velocidade), o ângulo de refração será menor que o ângulo de incidência, logo não ocorrerá refração no ângulo crítico, o que impossibilita a camada inferior de ser detectada.

Por meio de análise das geometrias das trajetórias dos raios sísmicos e seus tempos de percurso desde a fonte até o receptor, é possível localizar e mapear as interfaces em subsuperfície, bem como suas respectivas velocidades. Uma revisão quanto a dedução de equações para variadas configurações geométricas de camadas pode ser observada em Kearey et al. (2009). A seguir, serão analisados os métodos de estudo da refração para os principais modelos de camadas planas e de camadas irregulares.

- **Caso de duas camadas com interface horizontal**

A Figura 12 ilustra as posições percorridas por uma frente de onda, em que a fonte sísmica se encontra na posição *A*. A energia se desloca através de uma camada superior de profundidade *Z* e velocidade V_1 e é criticamente refratada numa camada inferior de velocidade V_2 . A trajetória *A – D* corresponde, a uma distância *x* da fonte, à trajetória do raio direto. O tempo de percurso da onda direta é dada pela equação:

$$T_{dir} = \frac{x}{V_1} \quad (17)$$

Em que T_{dir} é o tempo de percurso do raio direto, *x* é a distância entre a fonte e o receptor e V_1 é a velocidade da camada superior.

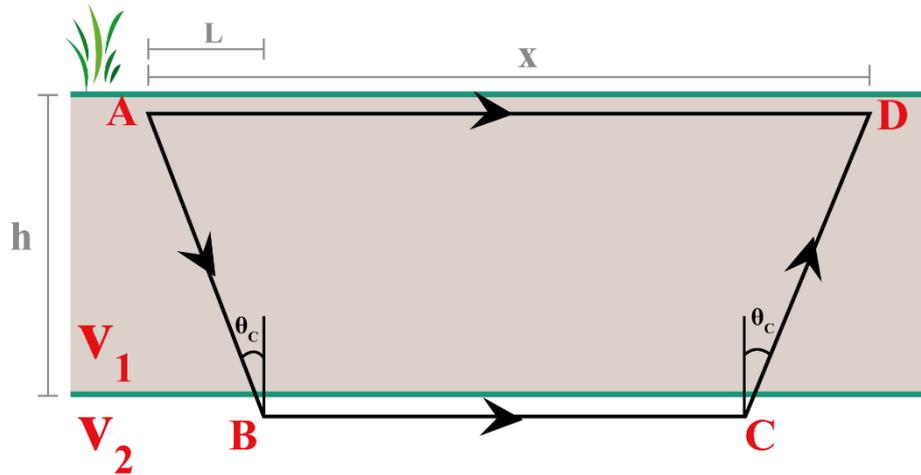


Figura 12 - Frente de emissão de ondas diretas e refratadas para um modelo de duas camadas. Fonte: adaptado de Kearey et al. (2009).

A trajetória de A para D corresponde ao caminho da onda direta. A trajetória do raio refratado se desloca para baixo na trajetória inclinada AB e CD segundo o ângulo crítico θ_c e se desloca ao longo da interface B e C a uma velocidade mais alta V_2 .

O tempo de percurso de um raio refratado para duas camadas distintas é obtido a partir da soma dos tempos dos segmentos percorridos pelos raios refratados $ABCD$. Pode ser expresso pela equação:

$$T_{refr} = t_{ab} + t_{bc} + t_{cd} = \frac{z}{V_1 \cos \theta} + \frac{(x - 2z \tan \theta)}{V_2} + \frac{z}{V_2 \cos \theta} \quad (18)$$

Ao aplicar a Lei de Snell tal que $\theta = V_1/V_2$, tem-se;

$$T_{refr} = \frac{x}{V_2} + \frac{2z \cos \theta}{V_1} \quad (19)$$

Ou também pode ser expresso por:

$$T_{refr} = \frac{x}{V_2} + T_i \quad (20)$$

Essa representa uma equação de primeiro grau, em que T_i é o coeficiente linear da reta e $1/V_2$ é o coeficiente angular. Em um gráfico de tempo (t) versus distância (x) (Figura 13), T_i é a interceptação sobre o eixo t com um gradiente $1/V_2$, ou seja, o tempo em que a onda refratada foi detectada pelos receptores de posição (x).

Já a reta da eq. 20 da onda direta intercepta no tempo inicial = 0 com um gradiente $1/V_1$. O cruzamento entre as retas das chegadas da onda direta e refratada fornecem a distância $x_{crossover}$, que representa o momento em que as ondas direta e refratada chegaram ao mesmo tempo. A distância $x_{crossover}$ pode ser expressa pela equação:

$$x_{cros} = 2z \left[\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Dessa equação, é possível ver que x_{cros} será sempre maior que duas vezes a profundidade do refrator z e que a mesma também fornece uma maneira alternativa de calcular z . Ao realizar um rearranjo da eq. 21, é possível obter a espessura da primeira camada z em função das velocidades sísmicas para um modelo de duas camadas horizontais de propriedades elásticas distintas:

$$z = \frac{T_i V_1 V_2}{2 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad (22)$$

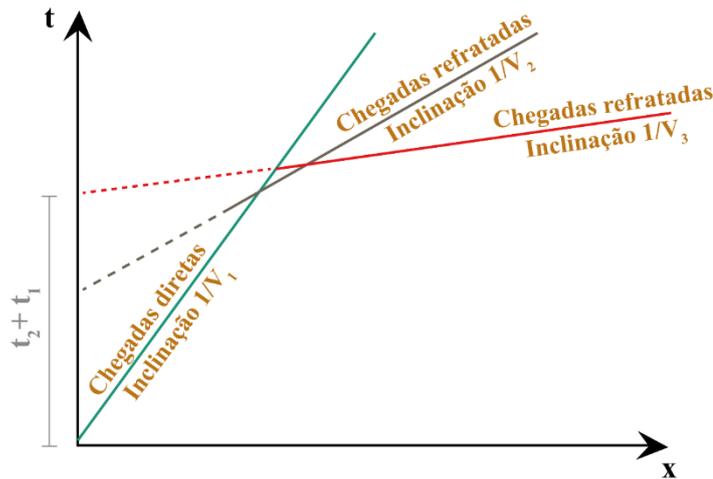


Figura 13 - Curva Tempo x Distância para onda direta quando interceptadas por até dois refletores horizontais. Fonte: adaptado de Kearey et al. (2009).

- **Caso de interfaces irregulares**

Os modelos apresentados desde o início da seção 3.2.1 foram todos adequados para camadas planas. Sabe-se que, na natureza, existem diversas

situações em que é pouco provável que as interfaces sejam planas, como exemplo a forma da superfície do embasamento rochoso sob uma camada de aterro de entulhos ou de solo. Tal superfície é improvável seja adequadamente modelada por um refrator plano. Por essa razão, são empregados diferentes métodos para determinar a geometria de um refrator não plano, a saber: o método **plus-minus** (Hagedoorn, 1959), o método recíproco generalizado (Palmer, 2001), o método de tempos de atrasos (Willmore e Bancroft, 1960) e a tomografia de tempos de percurso. Essa última é o método que considera um aumento gradual de velocidade com a profundidade e de variações laterais. Em geral, a tomografia é uma excelente aplicação para cenários complexos de camadas irregulares (Hayashi e Takahashi, 2001).

- **Subsuperfícies não ideais**

Existem diversos cenários geológicos em que as camadas não serão detectadas pela refração das primeiras chegadas. Dentre esses cenários que limitam o método, pode-se citar o caso da *camada oculta* ou *hidden layer*, que consiste em quando os raios de uma camada profunda são detectados pelos receptores a um tempo mais rápido do que os raios refratados na camada superior devido a uma fina espessura dela. Outro caso é o cenário da *camada cega*, quando a velocidade da camada superior é maior que da camada inferior, ou seja, quando ocorre a diminuição de velocidade com a profundidade. Dessa maneira, a refração crítica não poderá ocorrer e, conseqüentemente, a energia refratada retorna à superfície. Por fim, uma situação geológica em que ocorra uma mudança lateral abrupta de material, tal como a interdigitação entre rochas sedimentares ou falhas, acarretará um erro na análise conhecido como *variação lateral da velocidade*. Nesses casos, os produtos podem ser mal interpretados, o que produz uma solução errônea do cenário real de estudo.

3.2.2 Técnicas de aquisição de dados

A aquisição dos dados sísmicos da refração consiste em uma etapa de campo para registrar a passagem das ondas de corpo P geradas por fontes ativas pelo arranjo de receptores (geofones) dispostos linearmente. O produto em que se pretende obter em campo é o sismograma. Já o produto em que se almeja produzir ao final do processamento é um modelo bidimensional de velocidade por profundidade do perfil na área de estudo.

- **Equipamentos**

Os equipamentos necessários para aquisição dos dados de refração podem ser resumidos basicamente por: Unidade de controle (notebook); Sismógrafo (Geode no caso do presente estudo); Receptores sísmicos verticais (geofones) acoplados ao solo; Fonte sísmica; Base de impacto (caso necessário para fonte ativa); Sensor de gatilho (trigger sensor); Cabos de energias, de rede, sísmicos e de sensor de gatilho.

O registro do sinal dos geofones é feito pelo sismógrafo em campo, que por sua vez é convertido em um formato digital legível ao *software* de aquisição instalado no *notebook*. Existem sismógrafos com diferentes quantidades de canais, sendo cada canal ligado a um geofone por meio de um cabo sísmico. No caso do equipamento usado (Geode), ele suportava até 24 canais. Para aumentar o número de canais de registro se necessário, deve-se conectar outro *Geode* em série com o primeiro.

Para geração do sinal, é utilizada uma fonte ativa como o impacto da marreta, explosivo, queda de peso, *Vibroscis*, entre outros. Para qualquer que seja o tipo de fonte, é necessário que a energia gerada seja na banda de frequência que atenda aos objetivos da pesquisa. A energia por banda de frequência gerada por uma determinada fonte não é muito dependente das condições do ensaio ou do meio, por isso, é denominada de assinatura da fonte. Antes de efetuar a aquisição de dados sísmicos ao longo de toda uma área, recomenda-se a realização de testes de fonte para a análise da razão sinal/ruído. A Tabela 2 sumariza as características de algumas fontes sísmicas (Everett, 2013).

Fonte	Estabilidade da fonte	Frequência (Hz)	Custo
Marreta	Muito boa	50-200	\$
Queda de peso	Boa	50-200	\$\$
Explosivos	Média	50-200	\$\$
Espingarda	Muito boa	100-300	\$\$
Vibrador	Pouca	80-120	\$\$\$

Tabela 2 - *Importantes características de algumas fontes sísmicas mais utilizadas em pesquisas de ondas sísmicas.* Fonte: adaptado de Everett (2013).

O sensor de gatilho (*trigger*) deve ser acoplado juntamente à fonte (ex. marreta) para ativar o sismógrafo para gravação no exato instante da geração da onda (impacto

da marreta). As ondas geradas por uma fonte de impacto necessitam de uma base metálica junto à superfície do terreno para que a maior parte da energia do impacto seja transformada em deformação elástica (reversível) e não plástica (irreversível) no local do impacto. Portanto, a área da base de impacto deve ser grande o bastante para distribuir a força no local, o que gera uma menor pressão (Eikmeier, 2018). Fontes como o compactador de solo, por exemplo, já possuem a sua própria base de impacto.

- **Parâmetros de aquisição**

Algumas questões devem ser decididas ao planejar uma aquisição de campo de refração sísmica como a geometria do arranjo, o espaçamento entre geofones, a quantidade de geofones, o intervalo de amostragem e o tempo de gravação. O arranjo de abertura de geofones para uma investigação sísmica de refração é normalmente linear, conhecido como *spread*. Uma regra prática de campo, afirma que o comprimento do *spread* deve ser oito vezes a profundidade esperada do refrator, ou três vezes a distância de *crossover* (Milsom, 2003). O espaçamento entre geofone é constante e os pontos de tiros são dispostos antes, após e ao longo do arranjo sísmico.

O intervalo de amostragem (Δt) é o tempo entre as amostras de dados. Está diretamente relacionado com a frequência de Nyquist f_n , conforme a equação:

$$f_n = \frac{1}{2\Delta t} \quad (23)$$

A frequência de Nyquist é a máxima frequência que pode ser recuperada de um sinal a um intervalo de amostragem Δt sem que ocorra falseamento (*aliasing*) (Xiao, 2017). O Δt é selecionado conforme a investigação em questão. Em aquisições sísmicas de refração em substratos complexos e rasos, normalmente se utiliza Δt entre 0,128 ms a 0,5 ms (um intervalo de amostragem menor). Em grandes levantamentos de aquisição de refração, com menor detalhamento na investigação, utilizam-se intervalos de amostragem maiores, entre 1 a 2 ms.

A Janela de amostragem temporal (T) deve ser determinado a partir do tempo necessário para que o pacote de ondas a ser investigado percorra o arranjo sísmico. Na prática, é necessária uma inspeção do sismograma em campo para determinar se

o T está adequado. Normalmente, o tempo de 0,2 a 0,5 s são o suficiente para que o pacote de ondas de corpo percorra por todo arranjo sísmico.

Em muitos casos, as atividades externas provocam um ruído ambiental de alta frequência impresso nos sismogramas, o que dificulta a visualização das primeiras chegadas. Para aumentar a razão sinal/ruído dos dados, utiliza-se a técnica de empilhamento vertical de sismogramas (*vertical stacking*). O empilhamento dos dados de cada impacto da fonte permite realçar o sinal pela soma das fases coerentes e anular o ruído de caráter aleatório. Dessa forma, o sismograma resultante registrado é a soma dos sismogramas obtidos a cada impacto da fonte.

3.2.3 Processamento

O processamento dos dados de sísmica de refração visa à obtenção das primeiras chegadas das ondas diretas e refratadas em um gráfico Distância x Tempo a partir do sismograma de campo. No presente trabalho, foram utilizados os programas de processamento do pacote *Seisimager 2D*, *PICKWIN* e *PLOTREFA* (Geometrics Inc. versão 4.2). Assim, o que será abordado em termos de processamento está relacionado ao uso desses programas.

Para melhor visualização dos sismogramas, foi aplicado a normalização da amplitude dos traços sísmicos dos sismogramas de tal forma que otimizou a visualização da continuidade do traço sísmico. Além disso, aplicou-se o ganho de amplitude do sinal. Posto isso, foi necessário a aplicação de alguns filtros, como *passa baixa* ou *passa banda* para remover ruídos de alta frequência que dificultam a visualização das primeiras chegadas. A escolha das bandas de frequência utilizadas nos filtros é baseada no aspecto visual dos sismogramas.

Depois de processados os sismogramas, foram realizadas, então, as demarcações de primeiras chegadas para cada traço dos sismogramas, conhecido também como *picking*. Essas informações são agrupadas em um gráfico de Tempo x Distância e compõem a matriz de dados no cálculo do problema inverso de geração do modelo de velocidades com relação a profundidade. A rotina de inversão mais utilizada nos *softwares* de processamento de dados sísmicos será descrita na seção 3.2.4.

3.2.4 Inversão dos dados

As rotinas de inversão implementada na maioria dos pacotes de *softwares* disponíveis no mercado, tais como *REFLEW X* (Sandmeier, 2020), *SeisOpt* (Optim LLC, 2006), *Seisimager* (OYO Cooperation/Geometrics) e *REFRACT* (Leung et al., 2015), utilizam o método *Tomografia de tempos de percurso* para geração do modelo de velocidade por profundidade.

O método de *Tomografia de tempos de percurso* consiste em um tempo de percurso de traçado de raio menor entre a posição da fonte até a posição do receptor a partir de uma rede de nós com conexão pré-definida (Figura 14). O tempo de viagem e os caminhos de raio são calculados pelo método *shortest path* (Moser, 1991), e refinados pelo método *Simulation Iterative Reconstruction Technique (SIRT)*. O processo de inversão pode ser sumarizado nas seguintes etapas:

- 1) Seleção dos tempos de primeiras chegadas pela análise dos sismogramas;
- 2) Criação de um modelo de velocidade inicial de modo a cada célula ter um valor de velocidade idêntico e que a velocidade aumente com a profundidade;
- 3) Modelagem dos traçados de raios para o cálculo de tempos de percurso teóricos e caminhos de raio;
- 4) Atualização do modelo pelo método SIRT. O valor de correção para o inverso da velocidade (ΔS_j) para J-ésima célula é dada pela seguinte equação:

$$\Delta S_j = \sum (T_i^{0-c} l_{ij} S_j / T_i^c) / \sum l_{ij} \quad (24)$$

Em que S_j é o inverso da velocidade da J-ésima célula (vagarosidade), l_{ij} o comprimento do i-ésimo raio passando pela J-ésima célula, T_i^{0-c} o tempo residual de viagem do i-ésimo raio, e T_i^c o tempo de viagem calculado para o raio i-ésimo. Durante as interações, a velocidade de cada célula é atualizada sob a condição do aumento da velocidade em profundidade.



Figura 14 - Modelo esquemático para cálculo do tempo de percurso. Fonte: adaptado de Hayashi e Takahashi (2001).

O cálculo dos caminhos de raio depende dos valores de velocidade inversa, e isso confere um problema não-linear. Assim, o problema pode ser escrito da forma matricial, tal que:

$$\overrightarrow{\Delta d} = G(\overrightarrow{M0})\overrightarrow{\Delta m} \quad (32)$$

Em que $\overrightarrow{\Delta d}$ é o vetor de resíduos ($\overrightarrow{\Delta d} = \overrightarrow{d} - \overrightarrow{d0}$) a diferença entre os tempos de percursos observados e calculados, $\overrightarrow{\Delta m}$ é o vetor de correções de parâmetros a ser estimado, conhecido como função objetivo e $G(\overrightarrow{M0})$ é a matriz jacobiana, formada pelas derivadas parciais tempos de percurso observados e calculados em relação aos valores de vagarosidade (parâmetros iniciais em $\overrightarrow{M0}$). A solução para o vetor de correção $\overrightarrow{\Delta m}$ pode ser obtida por mínimos quadrados:

$$\overrightarrow{\Delta m} = (G(\overrightarrow{m0})^T G(\overrightarrow{\Delta m}))^{-1} G(\overrightarrow{m0})^T \overrightarrow{\Delta d} \quad (33)$$

Na prática, o cálculo do vetor de correção $\overrightarrow{\Delta m}$ não possui solução única devido ao problema de inversão geofísico mal posto. Dessa forma, o autor utiliza a técnica de regularização por mínimos quadrados amortecido (damped least-squares), tal que os parâmetros do modelo variam de forma suave em profundidade. Um termo β é adicionado diagonalmente à matriz identidade I de $(G(\overrightarrow{m0})^T G(\overrightarrow{\Delta m}))$. A Eq. 33 pode ser reescrita como:

$$\overline{\Delta \mathbf{m}} = (G(\overline{\mathbf{m}0})^T G(\overline{\Delta \mathbf{m}}) + \beta \mathbf{I})^{-1} G(\overline{\mathbf{m}0})^T \overline{\Delta \mathbf{d}}$$

(34)

3.3 Análise multicanal de ondas de superfície – MASW

A análise multicanal de ondas de superfície (MASW) é um método geofísico para investigações rasas em que o produto final é um perfil 1D de velocidade da onda de cisalhamento S (V_s) em profundidade, obtido através da análise da propriedade de dispersão geométrica das ondas de superfície *Rayleigh (Ground roll)* (Park e Miller, 1997; Strobbia, 2003; Foti et al., 2018). O perfil V_s obtido pela análise do *Ground roll* possui diversas utilidades para diferentes áreas de estudo e aplicações. Entre elas: (1) identificação do topo do embasamento; (2) estimativa da *rigidez* do material investigado, já que a velocidade da onda de cisalhamento S é diretamente proporcional ao módulo de cisalhamento. Pode ser aplicado para obter os parâmetros geotécnicos: (3) coeficiente de *Poisson* e o (4) módulo de *Young*. Esses parâmetros de elasticidades dos materiais obtidos através do perfil V_s fazem com que o método MASW seja de extrema relevância nos projetos da engenharia geotécnica (Prado e Mendes, 2012; Wilson, 2017).

A análise do método MASW pode ser feita a partir de ondas *Rayleigh* (mais comum) e também de ondas *Love*. As ondas *Rayleigh* são registradas por um arranjo linear de receptores de componente vertical, enquanto as ondas *Love* são registradas por componente transversal. Apesar da análise das ondas *Love* ser mais simples (Xia et al., 2012), o presente estudo tem como foco a dispersão das Ondas *Rayleigh* devido a facilidade de execução do arranjo sísmico e da fonte de impacto vertical e sensores uniaxiais disponíveis para execução deste estudo.

O método MASW com foco nas ondas *Rayleigh* pode ser com fonte ativa A-MASW (impacto vertical e arranjo sísmico linear), fonte passiva P-MASW (ruído ambiental e arranjo sísmico 2D), ou *Passive Roadside* (Park e Miller, 2008). Apenas o A-MASW será abordado no presente estudo, que se concentra na dispersão das ondas de frequências mais altas, portanto com foco na caracterização mais detalhada da superfície. O P-MASW se concentra nas frequências mais baixas, o que permite uma caracterização mais profunda em subsuperfície. A combinação das duas técnicas

fornece uma maior abrangência do espectro de frequência analisado e identifica melhor a natureza dos modos de propagação das ondas.

Independentemente da técnica MASW escolhida, do arranjo utilizado e da fonte, o método MASW pode ser resumido em três etapas (Figura 15). A etapa de aquisição consiste na obtenção de um sismograma. Na etapa de processamento, obtém-se o gráfico de velocidade de fase V vs frequência, e interpreta-se as curvas de dispersão dos diferentes modos de propagação da onda *Rayleigh*. E por fim, a etapa de inversão consiste em obter perfis de velocidades 1D ou 2D (gráficos de velocidade pela profundidade), que caracterizam a subsuperfície investigada a partir da velocidade de propagação das ondas S.

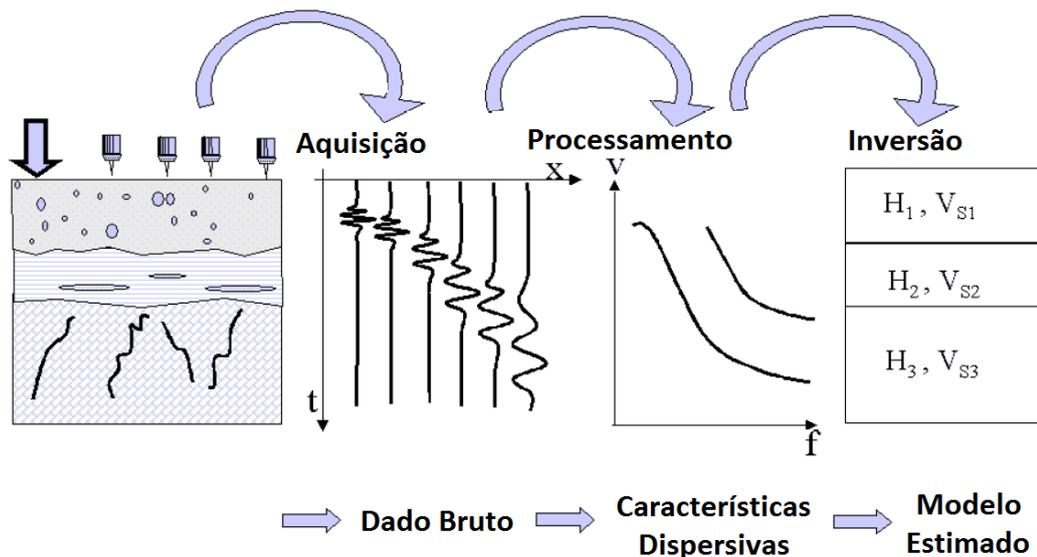


Figura 15 - Fluxograma do método MASW, em que H é a espessura das camadas e V_s é a velocidade da onda S. Fonte: adaptado de Strobbia (2003).

3.3.1 Princípios da análise multicanal de ondas de superfície

- **Velocidade de grupo e velocidade de fase**

Um pulso sísmico é composto por um grupo de ondas de diferentes frequências superpostas. A velocidade correspondente a esse pacote de ondas é denominada como **velocidade de Grupo** (V_G). A amplitude da onda resultante está modulada por uma função cossenoidal. Cada espectro de frequência em um pacote de ondas *Rayleigh* está associado a uma velocidade de fase. Ou seja, a **velocidade de fase** (V_f) é a velocidade de uma onda harmônica de frequência única.

Matematicamente, a velocidade de grupo V_G é definida como:

$$V_G = \frac{d\omega}{dk} \quad (25)$$

E a velocidade de fase V_f como:

$$V_f = \frac{\bar{\omega}}{\bar{k}} \quad (26)$$

Em que $\bar{\omega}$ representa a frequência angular média e \bar{k} o número de onda médio de um pulso sísmico.

A velocidade de um pacote de ondas, composta por vários sinais de frequência única, é a velocidade de grupo. Enquanto as velocidades de fase são relacionadas a cada frequência. No contexto do método MASW, sempre quando dito *velocidade de fase* nos referimos à velocidade de propagação de onda de uma frequência específica e não à velocidade de fase do pacote de ondas.

• **Dispersão**

Em meios heterogêneos, como na grande maioria dos ambientes naturais, a propagação das ondas de superfície sofre o fenômeno da dispersão. *Dispersão* significa que dado um pacote de ondas de diferentes frequências ou diferentes comprimentos de onda, a velocidade de fase também será diferente. Isso implica que o pacote de ondas terá sua forma alterada durante a propagação (Park et al., 1998; Strobbia, 2003; Zhang et al., 2003).

O movimento das partículas em profundidade é afetado pela propagação de onda igual a cerca de um comprimento de onda. Logo, quanto maior o comprimento de onda ou menor a frequência, maior a profundidade de penetração das ondas de superfície. Já em meios homogêneos, os diferentes comprimentos de onda alcançam profundidades diferentes, porém como são do mesmo material, a velocidade de fase será a mesma (Figura 16).

Portanto, a onda de superfície não possui uma velocidade única, mas uma velocidade de fase que é calculada em função da frequência. A relação entre

frequência e velocidade de fase é chamada de *curva de dispersão*. A obtenção da curva de dispersão é uma importante etapa no método MASW.

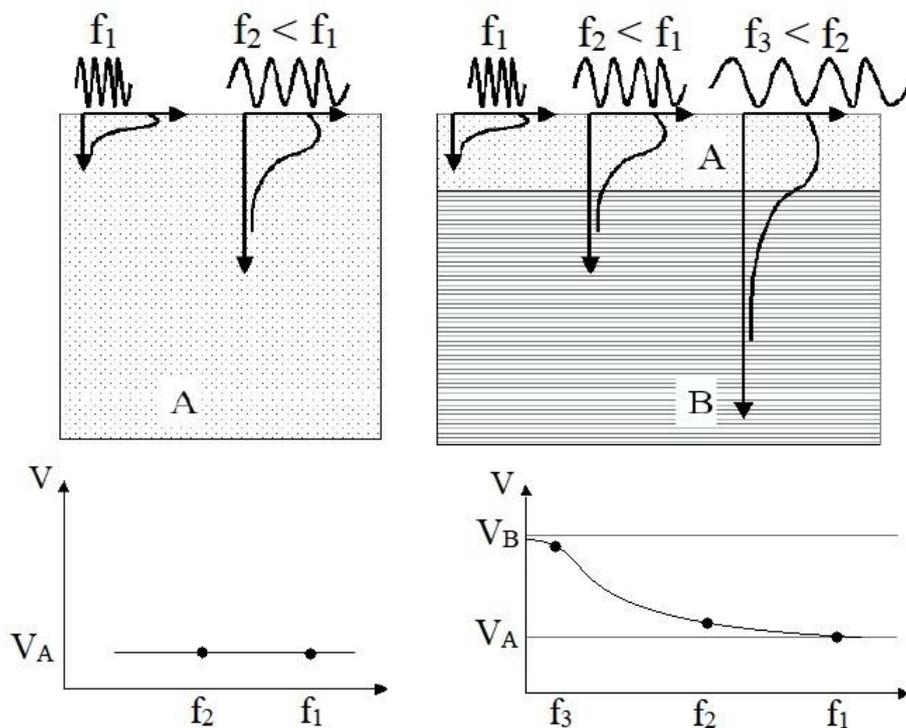


Figura 16 - Exemplificação esquemática do caráter dispersivo das ondas de superfície. Fonte: Strobbia (2003).

À esquerda, observa-se que, em meio homogêneo, todos os comprimentos de onda resultam em uma velocidade de fase constante. À direita, tem-se que, em meios heterogêneos, cujas propriedades físicas mudam com a profundidade, a velocidade de fase depende do comprimento de onda.

- **Modos de propagação**

Outra característica importante específica da propagação de ondas de superfície é a existência de vários *modos de propagação* (Figura 17). Isso significa que, para uma dada frequência, existem diferentes modos de vibração. O fenômeno pode ser explicado fisicamente pelo fato de existir uma interferência construtiva entre ondas que sofrem múltiplas reflexões nas interfaces das camadas (Xia et al., 2003).

Quando existe forte contraste de rigidez de camadas, é difícil dizer a princípio qual modo de propagação domina no perfil. Entretanto, em perfis dispersivos sem

saltos de rigidez, a velocidade de fase efetiva coincide com a velocidade da fase do primeiro modo, conhecido como *modo fundamental*. Os próximos modos são primeiro modo superior, segundo modo superior e assim por diante. Cada modo é caracterizado por um aumento de velocidade de propagação do modo fundamental para o superior e só existe a partir de uma certa frequência, denominada frequência de corte. Os modos de propagação podem coexistir simultaneamente, sendo o primeiro modo, o modo fundamental.

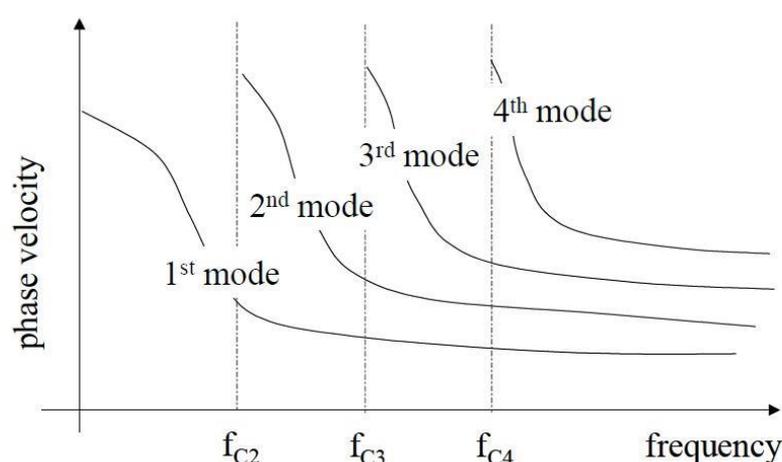


Figura 17 - Gráfico representando diferentes modos de propagação associados a diferentes velocidades de fase a cada frequência. Fonte: Strobbia (2003).

Se na curva de dispersão os modos forem interpretados de forma errada, obtém-se como resultado uma curva de dispersão aparente. Interpretar uma curva de dispersão aparente pode levar a erros grosseiros no perfil de velocidade recuperados (geralmente superestimados). Por esse motivo, a interpretação dos dados de ondas de superfície requerem um julgamento manual e os procedimentos totalmente automáticos para análise são difíceis de implementar (Foti et al., 2018).

3.3.2 Técnicas de aquisição de dados

A etapa de aquisição de ondas de superfície se assemelha em muitos aspectos à etapa de aquisição de dados de sísmica de refração. Os equipamentos utilizados em aquisições MASW são os mesmos descritos na seção 3.2.2. Entretanto, o que

diferencia a aquisição entre esses dois métodos são os parâmetros de gravação, o arranjo sísmico e a fonte no caso específico do P-MASW.

Para A-MASW de estudo das ondas *Rayleigh*, devem-se utilizar os geofones verticais, a fim de registrar somente a componente vertical das ondas de superfície. Outra característica importante no geofone é sua frequência natural. Em ensaios de MASW, a banda de frequência registrada no estudo é, no geral, menor. Portanto, geofones de menor frequência natural (e.g. 4,5 Hz) são necessários para esse tipo de estudo.

Ao planejar o comprimento do arranjo sísmico (L) e o espaçamento entre os geofones (Δx) da aquisição de MASW, Foti et al. (2018) recomendam que o comprimento do arranjo L seja pelo menos igual ao máximo do comprimento de onda desejado (λ) e que corresponde a mais ou menos o dobro da profundidade de investigação desejada (p). De tal forma que:

$$L \approx \lambda \approx \frac{V_{\max}}{f_{\min}} \approx 2p \quad (27)$$

Já para o espaçamento entre geofones (Δx), o autor recomenda utilizar um valor menor que $\lambda/2$ para evitar o fenômeno de *aliasing* no processamento das curvas de dispersão de maiores frequências, em específico os maiores modos de propagação. O Δx pode ser inferido segundo a equação:

$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{2} \approx \frac{V_{\min}}{2f_{\max}} \quad (28)$$

A seguir, algumas questões específicas da técnica A-MASW serão discutidas separadamente.

- **Fonte**

A fonte ativa nos estudos de A-MASW deve gerar energia suficiente para que a razão sinal/ruído esteja na faixa de frequência necessária, dada a profundidade de investigação alvo. Como o comprimento de onda (λ) está relacionado à frequência (f) e à velocidade de fase (v), é necessário estimar a faixa de velocidade esperada para as camadas de estudo e assim definir a banda de frequência necessária da fonte.

A geometria do arranjo em aquisições A-MASW é normalmente linear com espaçamento entre geofones constante. Os pontos de tiros são nas extremidades da linha para o A-MASW-1D e entre os geofones para A-MASW-2D.

A definição do intervalo de amostragem (Δt) para A-MASW está relacionada à frequência de Nyquist (f_n), assim também nas aquisições de sísmica de refração (eq. 23). Se o sinal de interesse estiver entre a banda de frequência de Nyquist de até 500 Hz, um intervalo de amostragem de no máximo 0,25 ms será o suficiente para aquisição, conforme a equação 23.

Para aquisições de A-MASW, o tempo de gravação T deve ser escolhido para que todo o pacote de ondas de superfície seja registrado no sismograma. No geral, um valor de 2 s para aquisições de engenharia é suficiente.

3.3.3 Processamento

O processamento dos dados de A-MASW consiste na obtenção da velocidade de fase, segundo o algoritmo do *software* utilizado (*Seisimager/SW* nesse trabalho). As etapas de processamento e inversão é descrito a seguir segundo Hayashi (2008):

- 1) O cálculo de velocidade de fase pode ser obtido a partir da transformação de cada traço do sismograma do domínio do tempo para o domínio da frequência pela rápida transformada de Fourier:

$$F(x, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, t) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (29)$$

Onde x é a distância, t o tempo, ω a frequência, $f(x, t)$ a seção de dados sísmicos no domínio do tempo e $F(x, \omega)$ a seção sísmica no domínio da frequência;

- 2) A seção sísmica no domínio da frequência é integrada sobre o espaçamento em relação às velocidades aparentes (c = velocidade de fase), como:

$$F(c, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F(x, \omega)}{|F(x, \omega)|} e^{i\omega \frac{x}{c}} dx \quad (30)$$

- 3) A integral é então repetida em todas as velocidades aparentes a serem calculadas;
- 4) O valor absoluto é calculado e plotado em uma imagem de velocidade de fase V s frequência (Figura 18);

- 5) Por fim, as velocidades de fase são determinadas com a amplitude máxima em cada frequência.

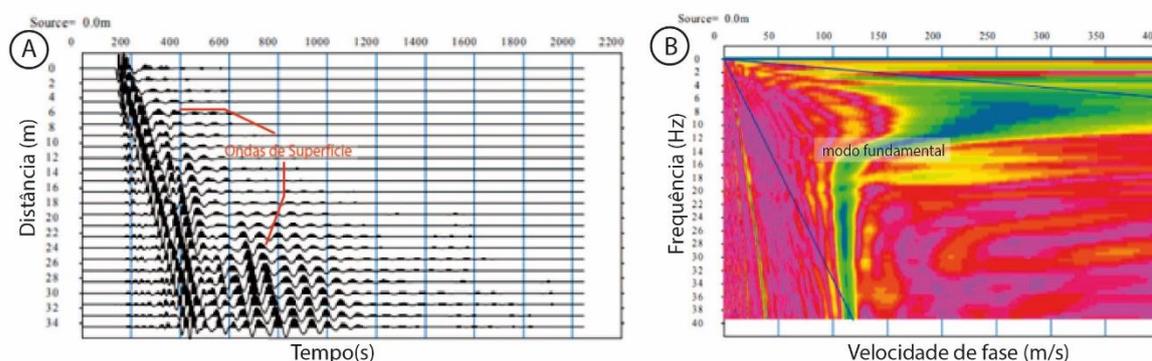


Figura 18 - Processamentos dos dados de MASW. A) Sismograma multicanal no domínio do tempo. B) Gráfico de Velocidade de fase x Frequência obtido após a etapa de processamentos dos traços sísmicos. Fonte: Adaptado de Hayashi (2008).

3.3.4 Inversão

O processo de inversão descrito será referente à obtenção do modelo unidimensional de velocidade da onda S, segundo algoritmo do *software* utilizado nesse trabalho (*Seisimager/SW*; Figura 19):

- 1) Seleção das curvas de velocidade de fase do modo fundamental e modo superiores (dado observado);
- 2) Cálculo do modelo inicial de velocidade, com a definição do número e espessura de camadas;
- 3) Modelagem direta a partir do cálculo de velocidade de fase teórica da onda *Rayleigh* (modelo teórico);
- 4) Comparação entre a curva de dispersão do dado teórico e dado observado;
- 5) Cálculo da mitigação de erros, a partir do método de mínimos quadrados, a cada interação.

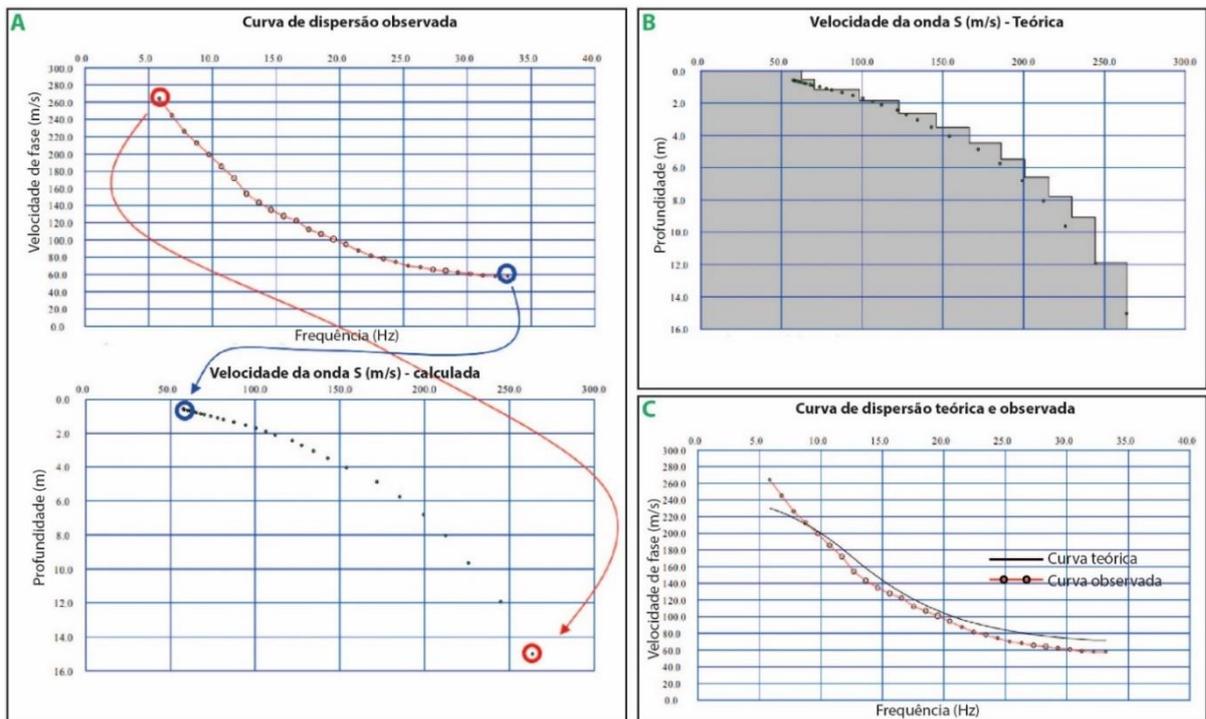


Figura 19 - Processo de inversão implementado no software *Seisimager-SW*, utilizado no presente trabalho. A) Seleção da curva de velocidade de fase no gráfico de dispersão e cálculo da velocidade de onda S. B) Modelo inicial de velocidade baseado em 1/3 da transformação do comprimento de onda. C) Comparação entre a curva de dispersão entre o modelo inicial e o modelo observado. Fonte: Adaptado de Hayashi (2008).

O processo de inversão das curvas de dispersão não é linear, por esse motivo, deve-se considerar um modelo inicial como ponto de partida. A velocidade de fase da onda *Rayleigh* equivale aproximadamente a velocidade média da onda S até a profundidade de 1/2 a 1/4 do comprimento de onda, conhecido como “comprimento de onda transformação” em termos da espessura aparente (D_A) e velocidade da onda *Rayleigh* (Hayashi, 2008). Por esse motivo, o autor utilizou a profundidade do modelo inicial como 1/3 do comprimento de onda, calculado a partir da frequência e velocidade de fase, conforme as equações:

$$D_A = a * \lambda = a * \frac{c}{f}$$

$$VR = c = b * V_S \quad (31)$$

Em que c é a velocidade de fase, f a frequência, λ é o comprimento de onda e b definido com base na relação entre velocidade da onda S e velocidade de fase da onda *Rayleigh* em meio espaço homogêneo.

Calculado o modelo inicial, e a seleção das curvas de velocidade de fase, o problema pode ser escrito da forma matricial, tal que:

A obtenção da curva de velocidade exige uma regularização para estabilidade da solução para minimizar os erros obtidos no cálculo dos parâmetros, conhecida como função objetivo, que pode ser obtida:

Calculado o modelo inicial, e a seleção das curvas de velocidade de fase, o problema pode ser escrito da forma matricial, tal que $\overrightarrow{\Delta d} = G(\overrightarrow{m0})\overrightarrow{\Delta m}$. Em que $\overrightarrow{\Delta d}$ é o vetor de resíduos ($\overrightarrow{\Delta d} = \overrightarrow{d} - \overrightarrow{d0}$) a diferença entre a velocidade de fase observada e a velocidade teórica calculada, $\overrightarrow{\Delta m}$ é o vetor de correções de parâmetros a ser estimado, conhecido como função objetivo e $G(\overrightarrow{m0})$ é a matriz jacobiana, formada pelas derivadas parciais de primeira ordem da função vetorial das velocidades de fase da onda *Rayleigh* em relação aos valores de V_s (parâmetros iniciais em $\overrightarrow{m0}$). A solução para o vetor de correção $\overrightarrow{\Delta m}$ pode ser obtida por mínimos quadrados:

$$\overrightarrow{\Delta m} = (G(\overrightarrow{m0})^T G(\overrightarrow{\Delta m}))^{-1} G(\overrightarrow{\Delta m})^T \overrightarrow{\Delta d} \quad (32)$$

Na prática, o cálculo do vetor de correção $\overrightarrow{\Delta m}$ não possui solução única devido ao problema de inversão geofísico mal posto. Dessa forma, o autor utiliza a técnica de regularização por mínimos quadrados amortecido com regularização vertical, tal que os parâmetros do modelo variam de forma suave em profundidade. Para isso, é adicionado o termo β diagonalmente à matriz identidade I de $(G(\overrightarrow{m0})^T G(\overrightarrow{\Delta m}))$, e o peso de suavização da regularização espacial no sentido vertical r_v . A Eq. 33 pode ser reescrita como:

$$\overrightarrow{\Delta m} = (G(\overrightarrow{m0})^T G(\overrightarrow{\Delta m}) + \beta r_v^T r_v + \beta I)^{-1} G(\overrightarrow{m0})^T \overrightarrow{\Delta d} \quad (33)$$

3.4 Métodos elétricos

3.4.1 Eletrorresistividade

A proposta das investigações pelo método da eletrorresistividade consiste em determinar a resistividade aparente (ρ_a) dos materiais a partir da diferença de potencial gerada em subsuperfície (V), quando injetado uma corrente elétrica (I) direta na superfície.

A eletrorresistividade é um método extremamente difundido na geofísica aplicada com uma longa história de aplicações do método desde o início do século XX. Autores como Conrad Schlumberger da “escola francesa” e Frank Wenner da “escola americana” contribuíram para o desenvolvimento do método (Schlumberger, 1912 *apud* Everett, 2013). Em meados de 1990, o método avançou em termos de rapidez e custo na instrumentação, aquisição de dados, modelagem direta e inversão (Loke et al., 1995; Dahlin, 1998; Bernstone *et al.*, 2000; Zonge et al., 2005).

Atualmente, o método é utilizado em diversas áreas de aplicação da geologia como prospecção mineral (Bery et al., 2012; Martinez-Pagán et al., 2013), e variações estratigráficas (Bábek et al., 2018; Pedrazaz et al., 2021). Há também aplicação na hidrogeologia e captação de águas subterrâneas, e no estudo da contaminação de solos, rochas e águas subterrâneas. A medida da resistividade elétrica pode ser feita em diferentes arranjos eletródicos a depender do objetivo de investigação. Os fatores como a profundidade, o tempo de aquisição e a geometria das estruturas investigadas devem ser considerados ao eleger o arranjo eletródico utilizado no estudo. Nesse subcapítulo, serão apresentados os fundamentos básicos do método da eletrorresistividade, os principais arranjos eletródicos aplicados no estudo de aterros sanitários e exemplos de trabalhos da aplicação do método envolvendo áreas de deposição de resíduos urbanos.

3.4.1.1 Fundamentos básicos

A condutividade elétrica é a propriedade física que influencia diretamente o fluxo de corrente elétrica no meio. A eletricidade pode ser conduzida de três modos: 1) condução eletrônica 2) eletrolítica e 3) dielétrica. Os metais e a maioria de sulfetos metálicos são bons condutores eletrônicos. Entretanto, a maioria dos minerais formadores de rochas são condutores muito fracos, portanto a corrente elétrica é transportada principalmente por íons na água presente nos poros das rochas. Essa condução é conhecida como condução eletrolítica ou iônica.

A corrente elétrica (I) que flui em um condutor é proporcional à tensão (V) através dele, ou seja:

$$V = IR \tag{34}$$

A eq. (34) é conhecida como a *1ª Lei de Ohm*. A constante de proporcionalidade, R , é conhecida como a resistência do condutor. Pode ser medida em *ohm*, quando a corrente I está em *Ampères* e a tensão V em *Volts*.

A resistência de um cilindro condutor à passagem de corrente entre as faces opostas desse cilindro é conhecida como a resistividade (ρ), medida em *ohm.m* no SI (Figura 20). Para um cilindro condutor de resistência R , comprimento L e área de seção transversal A , a resistividade pode ser expressa por:

$$\rho = \frac{RA}{L} \tag{35}$$

O inverso da resistividade é conhecido como condutividade, cuja a unidade de medida é *Siemens (S) por metro*, $S\text{m}^{-1}$.

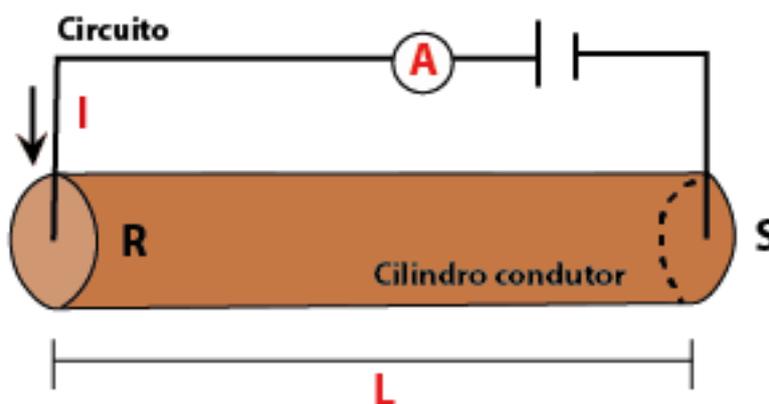


Figura 20 - Cilindro condutor utilizado para exemplificar a relação de resistência e resistividade elétrica. Fonte: adaptado de Braga (2006).

Em medições de resistividade de um solo ou rocha, é difícil separar os potenciais relacionados à passagem de corrente elétrica por condução eletrônica dos minerais constituintes e por condução eletrolítica dos fluidos dos poros/fraturas das rochas/solos. Sabe-se que as rochas conduzem eletricidade por processos

eletrolíticos mais que por processos eletrônicos. Portanto, a água dentro dos poros é o principal fator controlador de resistividade nas investigações de eletrorresistividade. Além disso, fraturas e quantidades de sais dissolvidos nos fluidos dos poros também influenciam no valor de resistividade (Borges, 2007).

Em estudos de aterro sanitário, a quantidade de chorume produzida pelos resíduos domésticos aumenta salinidade no substrato de tal forma que os fluídos que preenchem o solo estão extremamente condutivos (Helene e Moreira, 2018). Por essa razão, o método da eletrorresistividade é muito utilizado para determinar presença de chorume, que se mostram como anomalias de baixa resistividade nas análises elétricas. Assim, é possível determinar, a título de exemplo, a localização de uma pluma de contaminação, o nível de lixiviados ou locais com alta concentração de fluidos como fraturas e falhas (Cavalcanti, 2013; Konstantaki et al., 2016). Além disso, o método pode ser usado para mapear estruturas internas do aterro, espessura do material de cobertura e localizar resíduos perigosos (Meju, 2000; Dahlin, 2001).

Os principais fatores que influenciam os valores de resistividade no estudo de aterros sanitários são: 1) quantidade de chorume, mobilidade do lixiviado e grau de saturação; 2) quantidade de gás; 3) temperatura interna do pacote de resíduos (em estudo de locais de clima temperado); e 4) densidade do material e variações laterais internas (Dahlin et al., 2000).

- **Fluxo de corrente no solo**

Considerando um único eletrodo implantado na superfície de resistividade uniforme, a corrente irá fluir radialmente a partir do eletrodo, de modo que a distribuição de corrente seja proporcional e uniforme à medida que se distancia da fonte (Figura 21). Uma tensão (V) será gerada a partir da diferença de voltagem de dois pontos no fluxo de corrente, dando origem a superfícies equipotenciais concêntricas e esféricas que interceptam as linhas de fluxo de corrente a 90° (Milsom, 2003; Kearey et al., 2009). Dessa forma, a densidade de corrente que percorre o meio pode ser calculada a partir da distribuição de corrente através da área correspondente da semiesfera ($A = 2\pi r^2$), de tal forma que:

$$i = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (36)$$

A partir da densidade de corrente é possível calcular o gradiente de potencial associado à estrutura semiesférica na distância r :

$$\frac{\partial V}{\partial r} = -\rho i = \frac{\rho i}{2\pi r^2} \quad (37)$$

Integrando o potencial V em relação a r , tem-se o potencial V_r em qualquer ponto até a distância r , tal que:

$$V_r = \int \partial V = - \int \frac{\rho I \partial r}{2\pi r^2} = \frac{\rho i}{2\pi r} \quad (38)$$

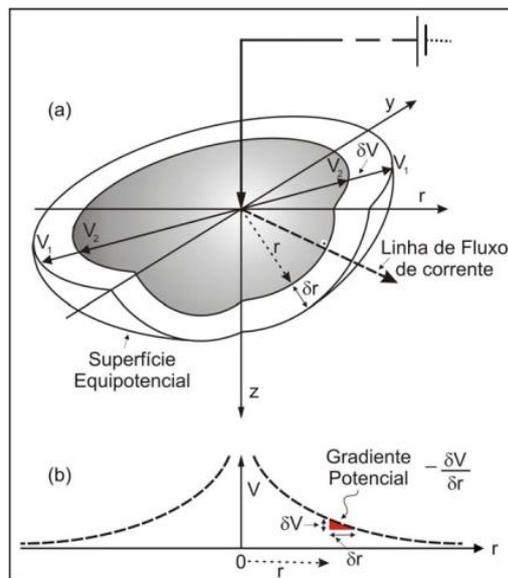


Figura 21 - Modelo representativo de fluxo de corrente em meio homogêneo. A) Campo potencial semiesférico gerado a partir de um ponto de corrente elétrica, localizado em meio homogêneo. B) Gradiente do potencial nas proximidades do eletrodo de corrente pontual. Fonte: adaptado de Reynolds (1997) apud Borges (2007).

Com o mesmo raciocínio para um caso mais próximo à realidade, tem-se que dois eletrodos de corrente A e B são implantados na superfície a uma distância conhecida entre eles (Figura 22). Entre eles, são colocados dois eletrodos de potenciais M e N . A diferença de potencial total gerada V_r será a soma das contribuições dos potenciais do primeiro eletrodo (V_a) e do segundo eletrodo (V_b), de tal forma que $V_r = V_a + V_b$. Dessa maneira, tem-se que o potencial gerado nos eletrodos de potencial M e N são:

$$V_m = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{AB} - \frac{1}{MB} \right)$$

$$V_n = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \quad (39)$$

Entretanto, os potenciais são de difícil medição, portanto, mede-se a diferença de potencial por:

$$\Delta V = V_m - V_n = \frac{\rho i}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{AB} - \frac{1}{MB} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right\} \quad (40)$$

Assim, a resistividade elétrica pode ser obtida a partir da reorganização da equação, tal que:

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{I \left\{ \left(\frac{1}{AB} - \frac{1}{MB} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right\}} \quad (41)$$

O termo entre colchetes na equação 41 é uma constante de geometria, ou Fator geométrico (k). Pode-se representa-lo da seguinte forma:

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (42)$$

Onde,

$$k = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{AB} - \frac{1}{MB} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right]} \quad (43)$$

De maneira geral, o potencial elétrico medido será inversamente proporcional ao fato geométrico K.

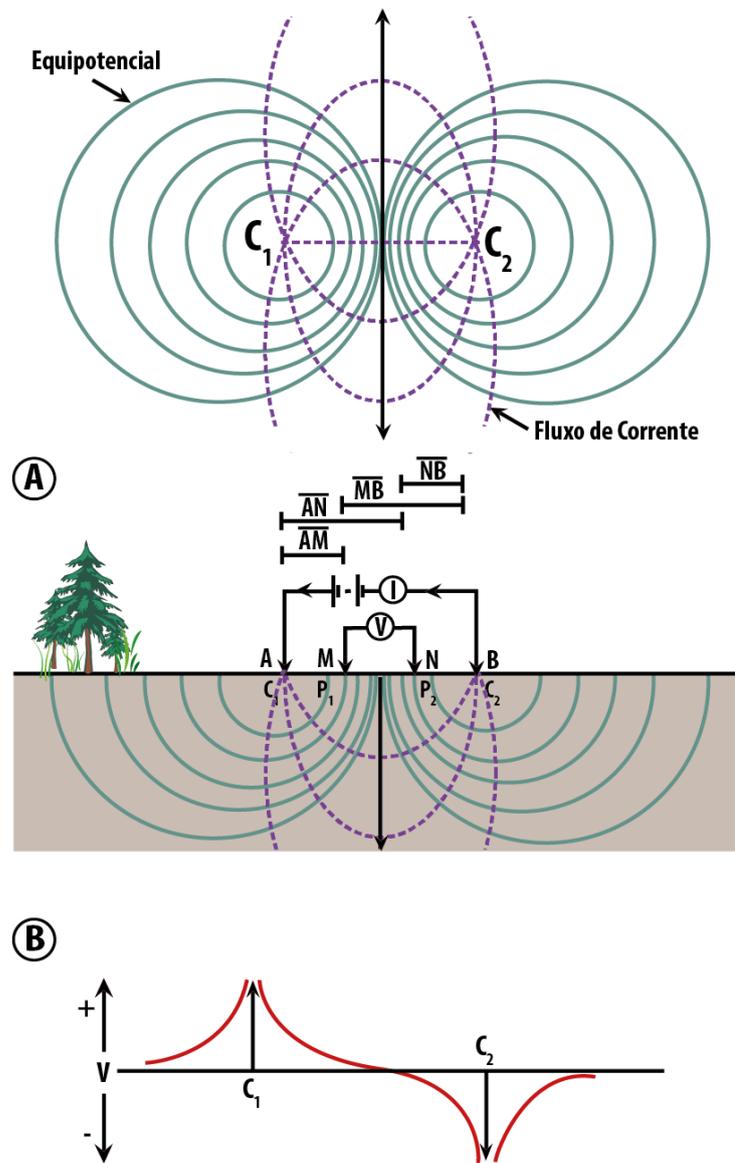


Figura 22 - Linhas de fluxo de corrente e equipotenciais, para dois eletrodos de corrente em um meio homogêneo. A) Vista planar e seção vertical. B) Variação do potencial na superfície. Fonte: adaptado de Loke, 2004.

A eq. 41 permite calcular a resistividade ρ para um solo isotrópico e homogêneo. Sabe-se que, na natureza, dificilmente é possível existir um meio que tenha tais características. Portanto, a resistividade medida é a média dos valores de porções de características distintas do meio heterogêneo, conhecido como resistividade aparente ρ_a .

É possível calcular o valor da resistividade aparente em função da resistividade média do meio e da geometria e do arranjo eletrônico escolhido, que pode ser

substituído na fórmula da resistividade por uma constante K . Assim, rearranjando a eq.41, é possível calcular a resistividade aparente como:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot K \quad (44)$$

3.4.1.2 Técnicas de aquisição de dados

Existem diversas técnicas de aquisição de dados e configurações possíveis de arranjos de eletrodos no método da eletrorresistividade. As técnicas mais utilizadas são: Sondagem Elétrica Vertical (SEV), Perfilagem Elétrica de Poços (PEP) e caminhamento elétrico (CE). O presente estudo tem como foco a técnica CE, visto que, para o estudo de aterros sanitários, é interessante obter um modelo de subsuperfície bidimensional (2D) em que a resistividade varia lateralmente, bem como na direção vertical.

As pesquisas envolvendo o imageamento elétrico 2D requerem a utilização de um grande número de eletrodos. Um sistema de conexão por cabos entre os eletrodos, controlado por um microprocessador, é comumente utilizado para selecionar automaticamente os quatro eletrodos relevantes para cada medição. Esse sistema é conhecido como *sistema multieletrodo*. No presente estudo, o resistivímetro utilizado foi o eletrorresistivímetro multieletródico *SYSCAL PRO 72* (fabricado pela *Iris Instruments*).

O comprimento da linha (L) deve ser escolhido de tal forma que o solo seja energizado até a profundidade requerida (Z). Estima-se que quando $L = Z$, cerca de 30% da corrente flui abaixo de Z . Além disso, um espaçamento deve ser constante para facilitar as aquisições e o processamento. A sequência de medições, o tipo de arranjo a ser utilizado e outros parâmetros como o tipo de corrente a ser usada também podem ser controlados pelo usuário por meio do microprocessador *SYSCAL PRO*. Ao final das medições, é gerado um arquivo contendo todas informações registradas relativas a cada eletrodo de medição (Loke, 2004)

Os equipamentos necessários para a aquisição dos dados de tomografia elétrica constam em eletrorresistivímetro multieletródico *SYSCAL PRO 72*, Eletrodos; Baterias; Cabos conectores; Switchbox para conexão entre cabos; marretas e luvas para auxiliar o acoplamento dos eletrodos na superfície.

Existem diversos arranjos eletródicos possíveis em uma aquisição de tomografia elétrica (Figura 23). Dentre os mais utilizados estão: A) Wenner B) Wenner-Schlumberger C) Dipolo-Dipolo D) Polo-Polo e E) Polo-Dipolo (Loke, 2004). O arranjo escolhido define os pontos de injeção de corrente e conseqüentemente os pontos de medida de potencial no subsolo, portanto, o imageamento 2D do subsolo será distinto para cada tipo de arranjo. A escolha do melhor arranjo para uma pesquisa de campo depende principalmente 1) do tipo de estrutura a ser mapeada; 2) da profundidade de investigação; 3) das mudanças verticais e horizontais de resistividade do subsolo; e 4) da força do sinal.

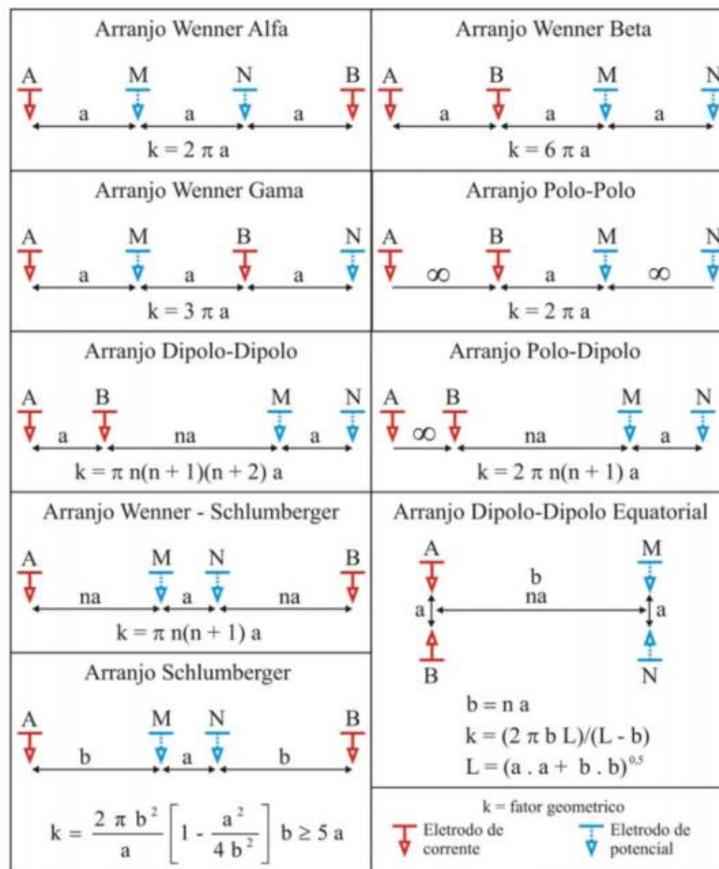


Figura 23 - Ilustração dos principais arranjos eletródicos utilizados em aquisições de eletrorresistividade e seus respectivos fatores geoeletricos. Fonte: Adaptado de Borges (2007).

Para compreender como as medições de resistividade dos eletrodos ocorrem a fim de se obter uma imagem 2D, Loke (2004) expôs a técnica utilizada para estender horizontalmente a área coberta pela pesquisa para uma seqüência de eletrodos,

conhecida como método do caminhamento elétrico (CE). Todas configurações do método CE conta com 4 eletrodos, dois fornecendo o fluxo de corrente (A e B), e dois medindo a diferença de potencial resultante (M e N). Os quatro eletrodos podem assumir qualquer disposição geométrica sobre a superfície do terreno. O que diferencia uma configuração eletródica da outra, é posição e proporção de distância entre os eletrodos, que recebem o nome de “arranjo”. O espaçamento entre eletrodos de corrente (A e B) e de Potencial (M e N), comumente fixo, é denominado de “**a**”. O fator de separação entre esses eletrodos varia em múltiplos, denominado de “**n**”. Cada afastamento corresponde a um nível de investigação, e quanto maior a distância de separação, maior a profundidade de investigação.

Para a execução do CE, o arranjo é deslocado a uma distância entre dipolos “**a**”, e assim repetir todo o procedimento anterior descrito entre os próximos 4 eletrodos, e permitindo a construção de uma pseudo-seção de resistividade elétrica aparente ao longo de toda a linha do levantamento.

O arranjo Wenner, também conhecido como Wenner- α , é configurado por dois eletrodos de corrente localizados nas extremidades, enquanto os eletrodos de potencial são fixados na posição central. Todos eletrodos possuem um espaçamento “**a**” entre si. Para aumentar a profundidade de investigação, os eletrodos são deslocados a uma distância de “**n**” fator, proporcional a “**a**”(Figura 24).

O arranjo Wenner-Schlumberger, resultado da combinação dos arranjos Wenner e Schlumberger, é configurado por dois eletrodos de corrente localizados nas extremidades, enquanto os eletrodos de potencial são fixados na posição central, todos com espaçamento “**a**” entre si, assim como o Arranjo Wenner. Entretanto, para aumentar a profundidade de investigação, apenas os eletrodos de corrente são deslocados a uma distância de “**n**” fator, proporcional “**a**” (Figura 25).

O arranjo Dipolo-Dipolo é configurado por dois eletrodos de corrente, seguidos por dois eletrodos de potencial, todos com espaçamento na entre si. Para aumentar a profundidade de investigação, os pares de eletrodos são distanciados entre si a uma distância de “**n**” fator, proporcional a “**a**” (Figura 26).

O arranjo Polo-Dipolo é caracterizado por dois pares de eletrodos de corrente e de potencial, situados cada um em uma extremidade com espaçamento “**a**” entre si. Para aumentar a profundidade de investigação, os pares de eletrodos são afastados a uma distância do fator “**n**” proporcional “**a**”. O primeiro eletrodo de corrente *A* é colocado suficientemente longe da linha de pesquisa (Figura 27).

Para obter uma imagem confiável de alta resolução, a matriz de eletrodos usada deve idealmente fornecer dados com o máximo informações sobre anomalias, cobertura razoável de dados e alta relação sinal/ruído (Dahlin, 2001). Um dos problemas envolvendo a aquisição de tomografia elétrica é determinar qual dos muitos arranjos eletródicos existentes que melhor responderão ao objetivo de investigação. A seguir, serão discutidos os principais arranjos eletródicos utilizados para investigações elétricas em aterros sanitários, bem como suas propriedades tais como profundidade de investigação, resolução vertical e horizontal e relação sinal-ruído. Além disso, serão abordadas as principais vantagens e desvantagens na escolha de utilização de cada método de acordo com a literatura.

- **Arranjo Wenner**

Diversos estudos de comparação de arranjos eletródicos concluem que a matriz Wenner é a mais indicada para investigações mais profundas do subsolo para linhas de maiores comprimentos (Dahlin e Zhou, 2004; Martorana et al., 2008; AL-Hameedawi e Thabit, 2017). É também indicado para caracterizar estruturas horizontais de baixa resistividade, devido a sua tendência à horizontalização (Zhou et al., 2002; Moreira et al., 2016). Além disso, possui um maior valor da relação sinal-ruído (Loke, 2004) e menor tempo de aquisição (Martorana et al., 2008), tendo em vista a menor cobertura de dados.

A desvantagem da matriz em relação às outras é a menor resolução espacial e a cobertura espacial relativamente baixa, ou seja, não é indicado para uma aquisição que possui um número pequeno de eletrodos (Loke, 2004; AL-Hameedawi, 2017).

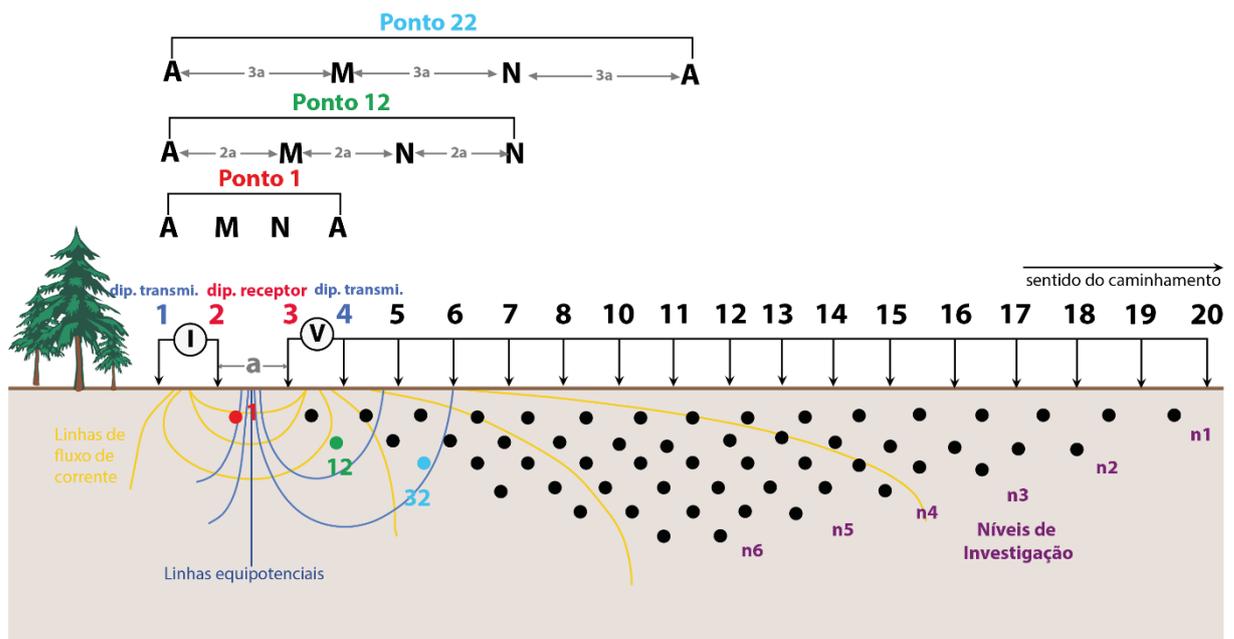


Figura 24 - Arranjo de eletrodos Wenner para uma investigação 2D com 20 eletrodos. Adaptado de LOKE (2004).

- **Arranjo Wenner-Schlumberger**

O arranjo Wenner-Schlumberger, resultado da combinação dos arranjos Wenner e Schlumberger, é configurado por dois eletrodos de corrente localizados nas extremidades, enquanto os eletrodos de potencial são fixados na posição central, todos com espaçamento a entre si, assim como o Arranjo Wenner. Entretanto, para aumentar a profundidade de investigação, apenas os eletrodos de corrente são deslocados a uma distância de n fator, proporcional a a (Figura 26).

Esse arranjo é indicado principalmente para aquisições em que seja necessária uma resolução vertical intermediária e ainda manter uma boa relação sinal/ruído. Em investigações em que se necessite delinear tanto estruturas verticais como horizontais, a escolha desse arranjo pode ser viável. Embora permita uma boa resolução relativa do modelo, o arranjo é caracterizado por uma aquisição de mais baixa velocidade e um desajuste relativamente alto do modelo final (Loke 2004; Martorana, 2008; AL-Hameedawi e Thabit, 2017).

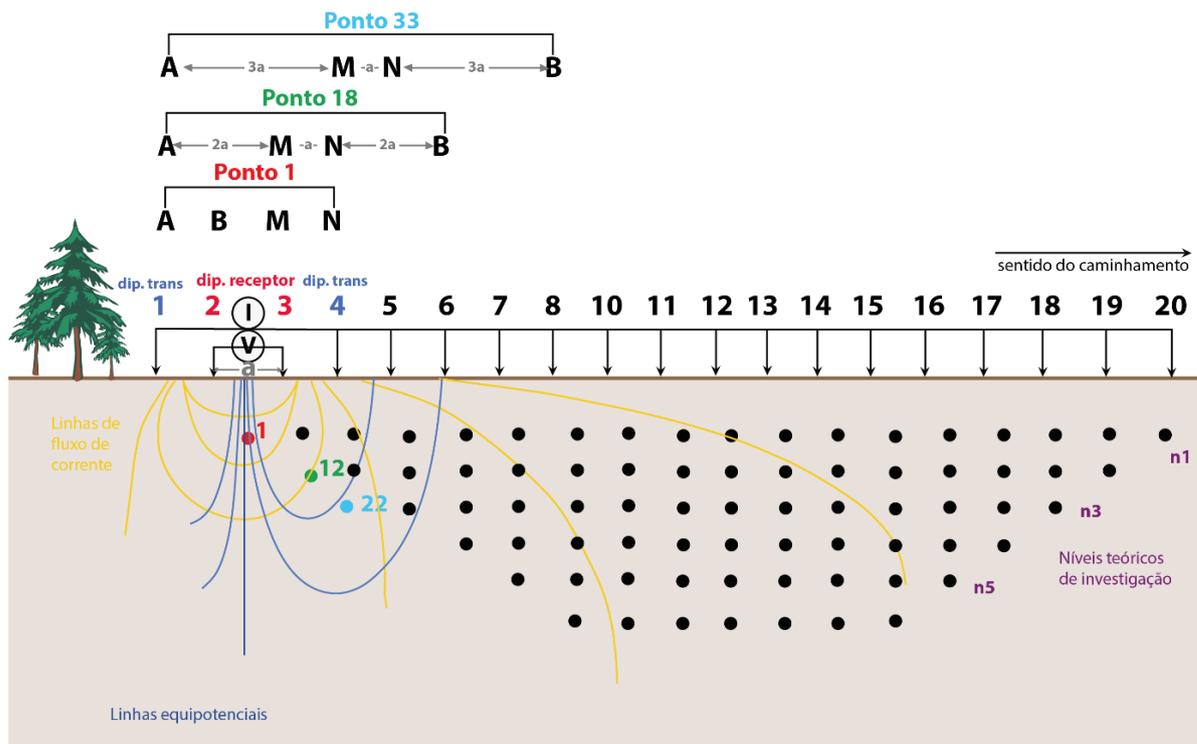


Figura 25 - Ilustração do Arranjo de eletrodos Wenner Schlumberger para metodologia do caminhamento elétrico, com utilização de 20 eletrodos. Adaptado de LOKE (2004).

- **Arranjo Dipolo-Dipolo**

A configuração Dipolo-Dipolo adequada para definir a geometria de estruturas mais complexas, especialmente para investigações superficiais (Dahlin, 2004; Martorana et al., 2008; Moreira et al., 2016; AL-Hameedawi, 2017). É indicada também para definir estruturas verticais (Zhou et al., 2002). Além disso, possui maior cobertura horizontal de dados (Loke et al., 2004; Martorana et al., 2008).

No geral, pode-se considerar o arranjo de boa sensibilidade, boa resolução, e muito sensível ao ruído, logo menor razão sinal/ruído (Gandolfo e Gallas. 2005). A força do sinal diminui à medida que se aumenta o fator n , logo a resolução vertical é menor à medida que se aumenta a profundidade (Loke et al., 2004). Possui uma baixa velocidade de aquisição de dados, dado a maior cobertura espacial de dados.

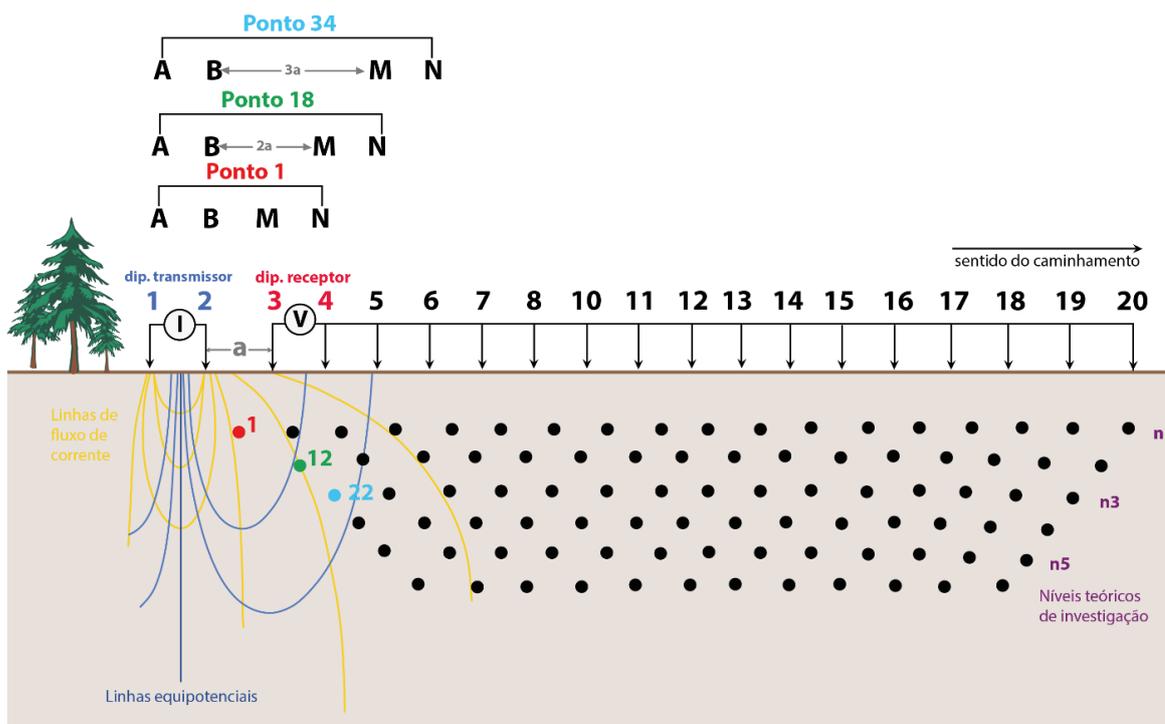


Figura 26 - Ilustração do Arranjo de eletrodos Dipolo – Dipolo para metodologia do caminhamento elétrico, com utilização de 20 eletrodos. Adaptado de LOKE (2004).

- **Arranjo Polo-Dipolo.**

Para uma mesma intensidade de corrente, o sinal recebido pelos eletrodos de potencial é maior no arranjo Polo-Dipolo, conseqüentemente favorecendo uma melhor razão sinal/ruído. Tal fato está associado ao potencial de uma fonte polar diminuir mais devagar a maiores distâncias (Gandolfo e Gallas. 2005). A força do sinal é menor quando comparado com as matrizes de Wenner e Wenner-Schlumberger, porém superiores ao arranjo Dipolo-Dipolo.

A configuração do arranjo Polo-Dipolo é indicada principalmente para aquisições em que seja necessária uma resolução horizontal relativamente boa, mas que mantenha uma boa relação sinal/ruído. Em investigações em que se necessite delinear tanto estruturas verticais como horizontais, a escolha desse arranjo pode ser viável (Sasaki, 1992; Loke, 2004). Além disso, possui maior profundidade de investigação, comparado ao arranjo Dipolo-Dipolo, por exemplo.

Outra vantagem do arranjo Polo-Dipolo é que durante a aquisições, o eletrodo de corrente fixo (“infinito”), pode ser utilizado de forma a reduzir a resistência de contato no circuito entre eletrodo/solo (Gallas, 2000).

Uma desvantagem do arranjo é possíveis problemas relacionados à presença do eletrodo remoto (Dahlin e Zhou, 2004; Martorana et al., 2017). Além disso, diferente dos outros arranjos, o arranjo Polo-Dipolo é uma matriz assimétrica, portanto as anomalias de resistividade na pseudo-seção também serão assimétricas (Loke et al., 2004) (Figura 27).

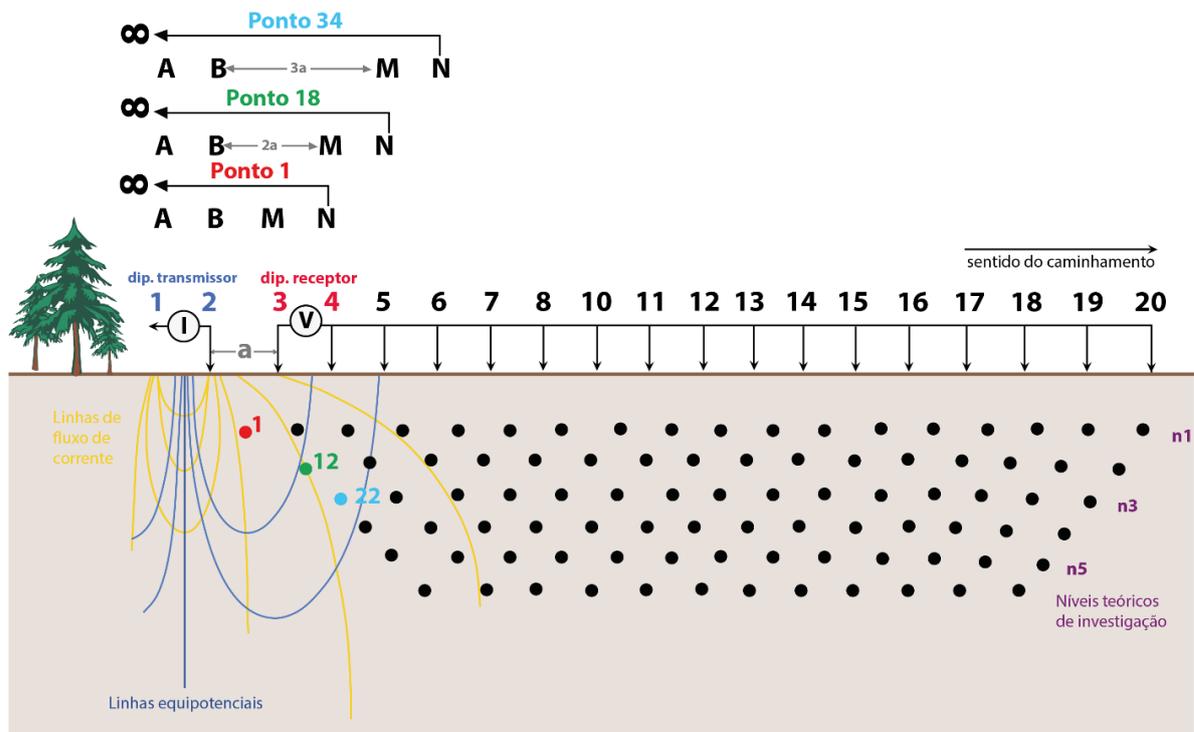


Figura 27 - Ilustração do Arranjo de eletrodos Polo-Dipolo para metodologia do caminhamento elétrico com utilização de 20 eletrodos. Adaptado de LOKE (2004).

3.4.1.3 Inversão dos dados

O processo de inversão descrito é referente à obtenção do modelo bidimensional de resistividade aparente, segundo algoritmo do *software* utilizado nesse trabalho (*ResD2Inv*). As etapas de inversão são descritas a seguir, de acordo com Loke (2004):

- 1) Cálculo das resistividades aparentes pelo método de elementos finitos;
- 2) Cálculo do modelo inicial de resistividade com definição do número de blocos e espessura de camadas;
- 3) Modelagem direta a partir do cálculo de resistividade teórica (modelo teórico);
- 4) Comparação entre o modelo teórico e modelo observado;

- 5) Cálculo da mitigação de erros, a partir do método de mínimos quadrados com fator de amortecimento (Norma 2), ou método Robusto (Norma 1) a cada iteração.

O modelo inicial utilizado consiste em um número de blocos de constante resistividade. O programa *ResD2Inv* utiliza um algoritmo para subdividir a subsuperfície de tal forma que a distribuição dos blocos esteja correlacionada com os pontos de resistividade medidos (Figura 28). O método não linear de otimização iterativa é utilizado para determinar a resistividade dos blocos.

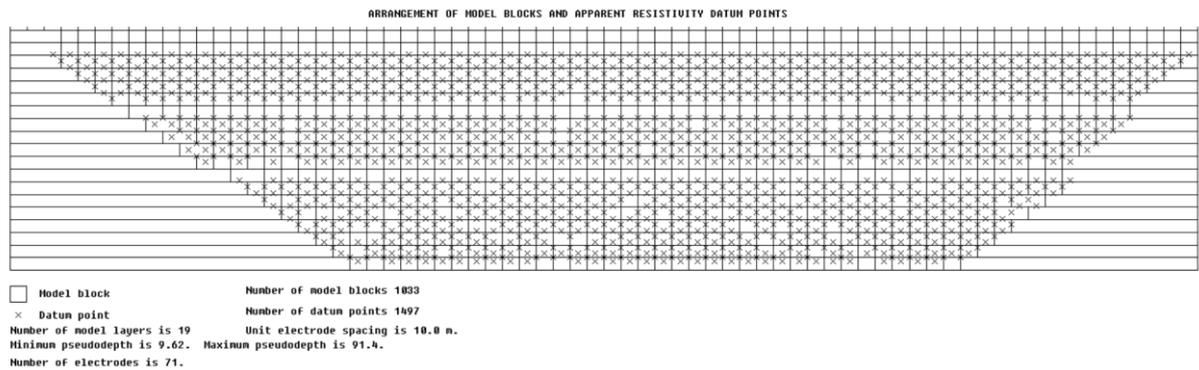


Figura 28 - Modelo de bloco inicial utilizado no presente estudo pelo programa *ResD2Inv* (versão 3.53).

A ligação matemática entre o modelo de parâmetros e a resposta do modelo para os modelos de resistividade 2D são fornecidas pelos métodos de elementos finitos (Silvester e Ferrari, 1996). Os parâmetros do modelo são os valores de resistividade das células do modelo inicial, enquanto os dados são os próprios valores de resistividade aparente medidos. A diferença entre o dado observado e a resposta do modelo inicial é dado pelo vetor de resíduos \mathbf{g} que é definido por:

$$\mathbf{g} = \mathbf{y} - \mathbf{f} \quad (45)$$

No método de otimização de mínimos quadrados, o modelo inicial é modificado de modo que a soma dos quadrados do erro E da diferença entre a resposta do modelo e os valores dos dados observados são minimizados, conforme a equação:

$$E = \mathbf{g}^T \mathbf{g} = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (46)$$

De forma a otimizar o modelo de resistividade 2D, a equação de Gauss-Newton é aplicada minimizando as variações espaciais nos parâmetros do modelo. No ajuste, é inserida uma restrição de suavidade (*smoothness constrain*), que provoca uma suavização de resistividade espacialmente no modelo. O método de mínimos quadrados com restrição de suavidade tem a seguinte fórmula matemática:

$$(J^t J + \lambda F) \Delta q = J^t g - \lambda F q \quad (47)$$

Em que J é a matriz Jacobiana de derivadas parciais, λ o fator de amortecimento (*smoothness constrain*), F é o somatório das matrizes de suavização nas três direções, q é o modelo de parâmetros e Δq é o vetor de variação dos valores do modelo de parâmetros.

Após calcular o vetor de variação do modelo de parâmetros, um novo modelo pode ser obtido da seguinte forma:

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (48)$$

A equação 46 representa uma otimização com restrição de suavidade da Norma L2. Essa inversão é mais utilizada para cenários reais em que a resistividade varia de forma suave ou gradativa. Já para cenários que apresentam limites nítidos de resistividade, é mais recomendada a aplicação do método de inversão robusta – Norma L1, em que a inversão pode ser modificada de modo a minimizar as mudanças *absolutas* nos valores de resistividade do modelo (Claerbout e Muir, 1973). A opção de inversão robusta propõe que os diferentes elementos do modelo de parâmetro e os vetores de erro dos dados tenham a mesma magnitude, de tal forma que (Loke, 2004):

$$(J^t J + \lambda F_R) \Delta q_k = J^t R_d g - \lambda F_R q_k \quad (49)$$

Em que R_d são matrizes de ponderação introduzidas para que diferentes elementos do erro dos dados e vetores de rugosidade do modelo recebam pesos iguais no processo de inversão. F_R é o somatório das matrizes de suavização nas três direções com acréscimo das matrizes de ponderação R_d .

CAPÍTULO 4

4 ARTIGO 1

ESTIMATIVA DA ESPESSURA DE RESÍDUOS DO ATERRO SANITÁRIO JOCKEY CLUBE A PARTIR DE UMA COMPARAÇÃO DE DIFERENTES INVERSÕES SIMULTÂNEAS DE ARRANJOS ELETRÓDICOS

Victória Basileu de O. Lima, Victor José Cavalcanti Bezerra Guedes, Welitom
Rodrigues Borges, Luciano Soares da Cunha
Universidade de Brasília – UnB, Instituto de Geociências

Resumo:

A tomografia de eletrorresistividade (ERT) é particularmente adequada para a caracterização estratigráfica de aterros sanitários, dada sua sensibilidade à resposta condutiva dos resíduos orgânicos aterrados. Nesse contexto, a inversão simultânea de dados de mais de um arranjo eletródico pode ser mais confiável do que a inversão única de um único conjunto desses dados. Dessa maneira, foram adquiridas 4 linhas de eletrorresistividade em quatro arranjos de eletródicos no Aterro Sanitário Jockey Clube, e realizaram-se as inversões simultâneas de todas as combinações possíveis entre os arranjos Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Wenner e Wenner-Shlumberger, e compararam-se os resultados com as informações geotécnicas de 5 furos de sondagem. A participação dos dados de matriz WN e WS obtiveram resultados semelhantes quando agrupados e as matrizes WN e DD, em inversão simultânea, favoreceram a resolução horizontal e a profundidade de investigação quando comparadas com a inversão dos arranjos separadamente. Na intenção de estimar a profundidade da camada de resíduos, foram utilizadas todas as informações

disponíveis para produzir um modelo geoeletrico a partir da interpolação de isovalores aproximados de resistividade do topo e base do aterro. O modelo aponta para uma camada de resíduos que pode variar de 30 a 65 metros de profundidade e um volume total de aproximadamente $23,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ de resíduos sólidos. Por fim, a inversão simultânea de arranjos pode ser uma ferramenta útil para investigação de aterros, especialmente se os modelos geoeletricos das matrizes forem muito distintos entre si, em que a estrutura de subsuperfície seja complicada sob pouca informação a priori.

Palavras-chave: Inversão simultânea; Tomografia de resistividade; Modelo de resolução.

4.1 Introdução

Os Aterros Sanitários Não Controlados (ASNC) são áreas de deposição de resíduos sólidos a céu aberto, que não foram planejadas de acordo com as medidas de proteção ao meio ambiente e à saúde pública. Nesses locais, não há controle da deposição dos materiais descartados e tampouco sistemas de drenagem do chorume gerados a partir da decomposição dos resíduos (Hoorweg e Brada-tata, 2012). A reconstrução histórica de deposição de resíduos para um ASNC é uma tarefa desafiadora. Os métodos geoeletricos são uma maneira rápida, não invasiva e detalhada para se obter estimativas a respeito da extensão vertical e lateral do maciço de resíduos de um aterro (Dahlin et al., 2000; Soupios et al., 2007; Konstantaki et al., 2015; Bernstone et al., 2016; Aziz et al., 2019; Guireli et al., 2020)

A tomografia de eletrorresistividade (ERT) tem sido amplamente utilizada para investigação em áreas de deposição de resíduos sólidos urbanos, desde a identificação de plumas de contaminação (Loke e Dahlin, 2002; Osella et al., 2002; Clément et al., 2010; Rosqvist et al., 2011; Lopes et al., 2012; Cavalcanti et al., 2014; Netto et al., 2020;) até a delimitação de diferentes camadas dos aterros (Bernstone et al., 2000; Soupios et al., 2007; Aziz et al., 2019). Uma forma de melhorar a aplicação dessa técnica é o balizamento das interpretações das seções de ETR com informações diretas, como furos de sondagem (Auken e Christiansen, 2004; Wisén et al., 2005; Deceuster et al., 2006; Heincke et al., 2010; AL-Hameedawi e Thabit, 2017; Aziz et al., 2019). Dessa maneira, é possível reduzir as ambiguidades da interpretação das imagens e ajustar a rotina de processamento dos dados em uma esfera real da investigação de aterros.

Diversos fatores podem influenciar na qualidade das medições em uma pesquisa de ERT, como a qualidade dos equipamentos utilizados, quantidade e espaçamento dos eletrodos e a superfície do meio investigado (Loke, 2011). A escolha do arranjo eletródico é um dos fatores de maior influência quando se trata da resolução de imagem em subsuperfície (Martorana et al., 2009; Moreira et al., 2016) e há um interesse crescente em comparar os resultados obtidos, especialmente quando invertidos separadamente e por combinações de diferentes configurações (Dahlin e Zhou, 2006; AL-Hameedawi e Thabit, 2017; Eissa et al., 2019). Para eleger uma configuração eletródica ideal, deve-se considerar alguns parâmetros como: 1) a profundidade de investigação; 2) a estrutura em que se pretende investigar (vertical ou horizontal); 3) o tempo de aquisição; 4) a intensidade do sinal; e 5) o *software* disponível para o processamento e modelagem dos dados. Na prática, há uma tendência quanto ao uso de arranjos mais tradicionais para imageamento 2D, como as configurações Wenner, Wenner-Schlumberger, Polo-Polo, Polo-Dipolo e Dipolo-Dipolo (Szalai e Szarka, 2008; Loke, 2011).

Existem controvérsias quanto à escolha do melhor arranjo eletródico para a aplicação de estudos de aterros sanitários. Dahlin e Zhou (2004) compararam dez arranjos eletródicos em cinco modelos geológicos sintéticos em termos de resolução e relação sinal/ruído. Os autores recomendaram os arranjos Polo-Dipolo, Dipolo-Dipolo, Wenner beta e gradiente para imageamento 2D de eletrorresistividade em aterros. Entretanto, AL-Hameedawi e Thabit (2017), assim como Moreira et al. (2016) afirmam que a configuração Dipolo-Dipolo não é adequada para investigações de aterros mais profundos, devido à menor razão sinal/ruído e à diminuição da resolução vertical quando há um aumento na profundidade. Os autores recomendam o conjunto de dados obtidos com os arranjos Wenner e Wenner-Schlumberger como uma alternativa satisfatória para o cálculo de modelos inversos que melhor delineiam as camadas em subsuperfície. A fim de obter uma resolução aceitável e, ao mesmo tempo, alta velocidade de aquisição dos dados, Martorana et al. (2017) afirmam que o conjunto de dados para o arranjo DD e gradiente com alta cobertura são mais indicados.

Normalmente, os dados de resistividade obtidos nas pesquisas são modelados de forma independente. Entretanto, é possível obter resultados satisfatórios quando os dados de diferentes matrizes de eletrodos são concatenados em uma inversão simultânea sobre o mesmo local (Zhou e Greenhalgh, 2000; Stummer et al., 2004;

Athanasίου et al., 2007; Candansayar, 2008; Konstantaki et al., 2015; Demirel e Candansayar, 2016; Hermans e Paepen, 2020). O uso da técnica de inversão simultânea pode amplificar os resultados ao combinar as vantagens relativas de cada matriz de eletrodos. De la Vega et al. (2003) e Konstantaki et al. (2015) utilizaram os resultados da inversão combinada dos arranjos Dipolo-Dipolo e Wenner para aumentar a profundidade de investigação em subsuperfície e melhorar a resolução das características do substrato investigado. Os autores sugeriram a inversão simultânea de WN-DD com melhor resolução lateral quando comparados com os resultados das inversões de cada matriz separadamente.

Neste trabalho, apresenta-se um procedimento experimental para estimar quais as configurações de eletrodos produziram os melhores resultados a respeito da estratigrafia de um antigo aterro controlado em Brasília, Brasil. Dessa maneira, os principais objetivos do presente trabalho são:

- a) Comparar os resultados obtidos com diferentes arranjos em todas as possíveis combinações de inversões simultâneas para os arranjos DD, PD, WN e WS;
- b) Determinar um modelo de espessura e calcular o volume aproximado do pacote de resíduos sólidos domésticos a partir do modelo geoeletrico mais representativo do aterro.

4.2 Área de estudo

O Aterro Controlado do Jockey Clube (ACJC) está localizado a cerca de 20 km do centro de Brasília, Brasil. O início de deposição de resíduos no ACJC aconteceu no final da década de 1960 e atualmente, após ter suas atividades oficialmente encerradas no início de 2018, o local funciona apenas como uma Unidade de Recebimento de Entulhos (URE) na parte central do antigo aterro. O local é conhecido como maior depósito de resíduos sólidos urbanos a céu aberto da América Latina (Figura 29; Campos et al., 2018).

Nos anos iniciais de funcionamento do aterro, Koide e Bernardes (1998) relataram que os resíduos eram descartados em trincheiras pelo método de rampa, em que o próprio solo retirado da escavação era utilizado para recobrir a trincheira de lixo. Por muitos anos, não houve qualquer controle de drenagem de chorume superficial e subterrâneo, bem como de um sistema dispersor de gases. Em algumas porções do aterro, o descarte dos resíduos ocorria de forma totalmente aleatória sobre

o solo natural. Na última década de funcionamento do ACJC, algumas medidas estruturais foram realizadas que permitiram enquadrar o local como aterro controlado, e não como um lixão.

As rochas do Grupo Paranoá, Formação Ribeirão do Torto compõe o arcabouço geológico da área de estudo. Essa unidade é composta por ardósias de coloração cinza esverdeada, em que são observadas duas foliações penetrativas que representam as clivagens ardosianas, e configuram o caráter da rocha friável e quebradiça. Associado a esse litotipo, são descritos perfis de latossolos bem desenvolvidos (mais de 20 m de profundidade) sobrepostos a saprólitos que correspondem a ardósias altamente intemperizadas (Campos et al., 2013). As características geotécnicas apontam para um solo muito homogêneo, alta porosidade (> 60%) e permeabilidade e com elevado teor da fração argila (> 50%) (Pastore et al., 1998).

O relevo predominante na região de estudo é plano a suave ondulado com declividades inferiores a 10% e cotas superiores a 1.100 m. No âmbito da área de estudo, a topografia natural foi intensamente modificada desde o início do funcionamento do ACJC.

Atualmente, o local foi modificado de tal forma que o centro do aterro é um alto topográfico conhecido informalmente como “Bolo de Noiva”. Sabe-se que o Aterro ACJC é subdividido estratigraficamente em quatro camadas: Resíduos de construção civil (RCC), resíduos sólidos, latossolo e rocha (Ardósia).

4.3 Materiais e métodos

4.3.1 Aquisição de dados

A técnica utilizada na investigação do ACJC foi a Tomografia de Eletroresistividade (ERT). Na área foram adquiridas quatro linhas de eletroresistividade em 2019 (L1 a L4) de 710 metros, na porção de maior espessura de resíduos sólidos (Figura 29). Quatro diferentes arranjos de eletrodos foram usados: WN, WS, DD, PD.

Informações diretas de três furos de sondagem rotativa (SP-03, SP-07, SP-02) (Pastore et al., 1998) e dois furos de sondagem em 2020 (PG1 e PG2) foram utilizados para contribuir com a interpretação dos modelos de resistividade. Os dados de

resistividade não foram adquiridos precisamente sobre os furos de sondagem, devido ao intenso tráfego de caminhões e máquinas das atividades diárias do aterro ou por estarem hoje em áreas embargadas pelo ICMBIO, com difícil acesso ou vegetação densa. Presume-se, para fins de correlação de informações diretas e indiretas, que não existe uma forte variação da geometria do topo do substrato rochoso, portanto sendo possível correlacionar as informações dos furos diretamente com as seções de resistividade elétrica.

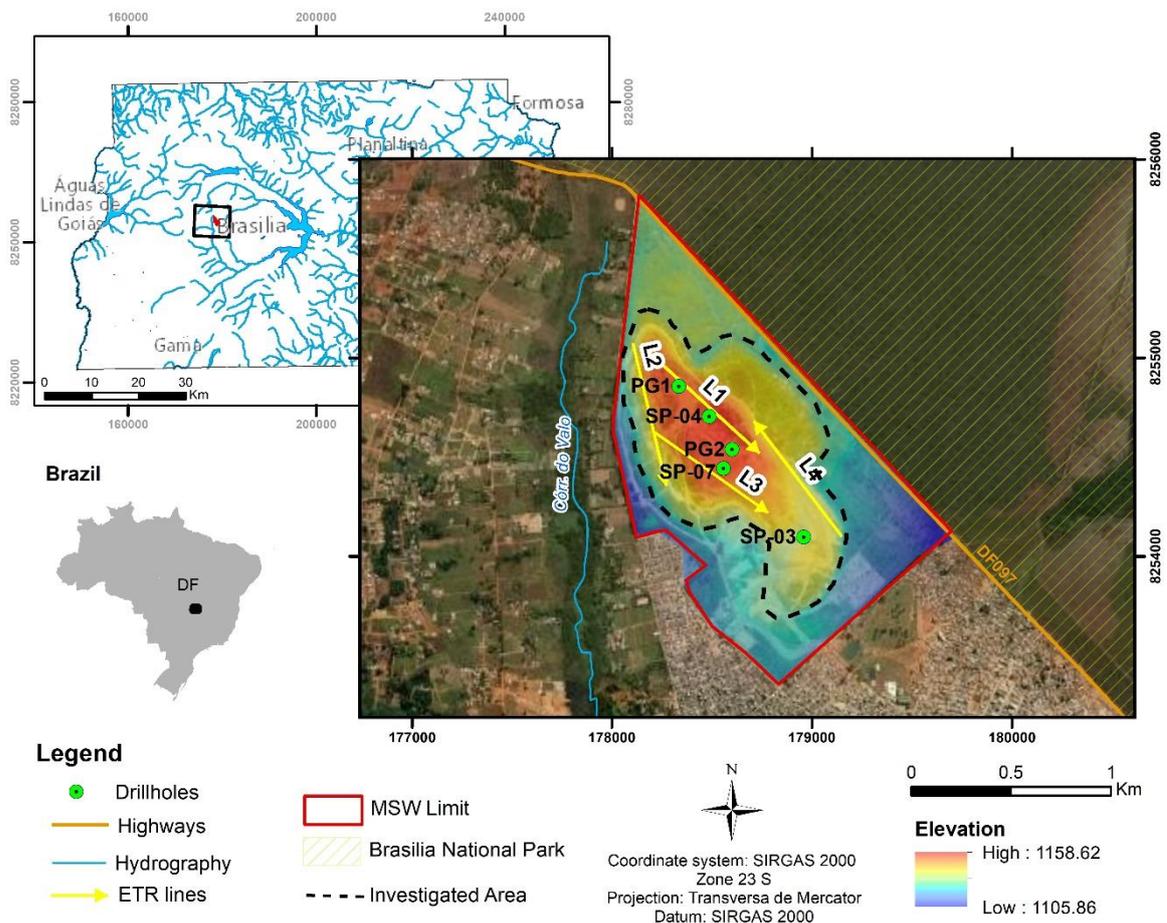


Figura 29 - Mapa do Aterro Controlado Jockey Clube e adjacências.

O sistema de aquisição utilizado foi o resistivímetro *Syscal Pro* (*IRIS Instruments*) e as sequências de cada arranjo eletródico foram configuradas antes da aquisição de dados no *software Electre II* (*IRIS Instruments*)(Figura 30). Os parâmetros utilizados na aquisição constam na Tabela 3. Após a aquisição de campo, os dados foram armazenados na memória do equipamento e transferidos para o *software Prosys III* (*IRIS Instruments*), onde foi realizada a filtragem dos dados. Os

valores de resistividade aparente calculados maiores que duas vezes o desvio padrão foram removidos durante o processo de filtragem, além da remoção de alguns *outliers*.

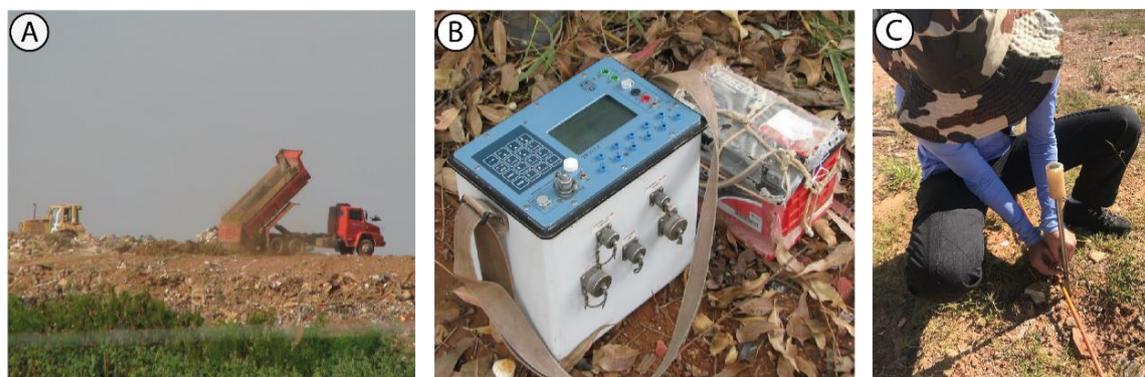


Figura 30 – Fotos evidenciam a aquisição de dados de resistividade elétrica no ACJC. A) Foto atual da parte do aterro conhecida como “Bolo de Noiva”, ainda em operação. B) O Sistema de aquisição conhecido como Syscal Pro. C) Multi-eletrodo instalado no solo durante a aquisição de dados.

Parameter	Array			
	DD	PD	W N	WS
N° of steel electrodes	72	73	72	72
N° of data	163	170	82	121
	6	5	8	6
Line lenght (m)			710	
Voltage (Vab)			400	
Injection time (ms)			250	
Approximate depth of investigation (m)	80	120	12 0	120

Tabela 3 - Parâmetros de aquisição para cada configuração eletródica utilizada: Dipolo-Dipolo (DD), Polo-Dipolo (PD), Wenner (WN), Wenner-Schlumberger (WS).

4.3.2 Modelagem dos dados de resistividade

Os dados filtrados foram exportados para o *software Res2DInv*. Os métodos de inversão robusta, ou *L1-norm* (Loke et al., 2003) e inversão por mínimos quadrados com restrição de suavidade, ou *L2-norm* (Loke e Dahlin, 2002), foram utilizados para

comparação em Guedes et al. (2020), onde a inversão robusta suavizou anomalias em forma, uma vez que os pontos espúrios têm menor peso no processo de modelagem e gerou modelos com feições mais horizontalizadas que delimitam mais satisfatoriamente a base do aterro. Portanto, a inversão robusta foi escolhida para o presente trabalho.

A partir dos valores de resistividade aparente obtidos em cada configuração eletródica, foram elaborados modelos de inversão simultânea 2D de todas combinações possíveis para as quatro medições dos arranjos adquiridos (WN, WS, DD, PD) das quatro linhas de eletroresistividade, totalizando 15 seções por linha. Para tanto, foram utilizados parâmetros de inversão de proporção do filtro de nivelamento vertical para horizontal igual a 0,3, para destacar estruturas horizontais e modelo de tamanho de grade igual ao espaçamento real entre os eletrodos.

4.3.3 Validação dos modelos e simulação numérica

Após a obtenção das seções, foram selecionadas as melhores combinações de arranjos de acordo com os valores de resistividade relativos ao contexto histórico do ACJC. O critério de seleção da melhor seção foi realizado pela análise do comportamento do valor de resistividade dos modelos calculados para cada combinação de arranjo no local onde obtivemos informações diretas dos 4 furos de sondagem. Foi analisada, principalmente, a variação dos valores de resistividade de 5 metros acima e abaixo dos limites entre RCC e lixo (topo do aterro) e do limite entre lixo e o latossolo (base aterro). Nesses limites, foi calculada a diferença entre o último elemento desse conjunto e o primeiro, conhecido como *range*. Esse parâmetro fornece uma medida da dispersão dos valores, mas não como eles estão distribuídos. Por esse motivo, foi realizada concomitantemente análise da regressão linear pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) para cada conjunto de valores de resistividades nos intervalos de topo e de base do aterro (X) em função da profundidade (μ_y) (Gujarati e Porter, 2011; Sheard, 2018), conforme o modelo:

$$\mu_y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (50)$$

Em que β_1 é o coeficiente de regressão, que expressa a inclinação da reta ou a sua forma. Quanto maior for o contraste de resistividade nos limites de topo e base do aterro, isto é, quanto menor o valor de β_1 no limite de RCC e lixo e maior o valor

de β_1 no limite de lixo e solo referente à resistividade dos modelos, mais coerente o modelo calculado é com o contexto histórico de deposição do ACJC.

Os valores de *range* e β_1 para cada perfil analisado, foram agrupados em uma tabela e, a partir dos valores, foi elaborado um *ranking* da seção que melhor define os limites de RCC, lixo e solo. Para eleger a seção mais coerente com o contexto do ACJC, também foram considerados: 1) menor erro absoluto entre o modelo observado e calculado; 2) a profundidade de investigação alcançada; 3) a correspondência com os furos de sondagem; e 4) a representatividade do aterro quando a horizontalidade das camadas e delimitação da base do aterro.

Para validar o desempenho numérico da análise estatística dos perfis de resistividade, foi realizada uma modelagem numérica da seção da linha 1 para todas combinações de arranjos e calculados o *range* e β_1 para comparar os mesmos valores com a seção da linha 1 medida em campo. Foram usados 15 modelos teóricos para avaliar os modelos da linha 1. Para construção dos modelos, utilizamos as informações do furo de sondagem PG1. Foram consideradas 3 camadas horizontais hipotéticas. A camada superficial simula o RCC, com resistividade para camada de 100 *ohm.m* e 18 metros de profundidade. A segunda camada simula as condições da camada de resíduos, com a média de resistividade de 20 *ohm.m* e 24 metros de espessura. Por fim, a terceira camada simula o substrato geológico do aterro, de resistividade média 200 *ohm.m* e 38 metros de espessura. O *software* comercial *RES2DMOD* (Barker, 1996) foi utilizado para gerar as modelos para comparação.

Em todos os modelos, foram utilizados 72 eletrodos com espaçamento de 10 metros e geometria variável, simulando as aquisições reais de campo. Quatro configurações eletródicas (WN, WS, DD, PD) foram utilizadas para gerar as resistividades aparentes de até 30 níveis. Foram concatenados os dados e invertidos no programa *Res2DInv* utilizando a inversão da norma L1. Para representar condições de campo realísticas, 5% de ruído foi adicionado na resistividade aparente, antes da inversão. As configurações de inversão para os dados dos modelos sintéticos são exatamente os mesmos que as configurações usadas para inverter os dados de campo reais. As seções invertidas do modelo numérico podem ser visualizadas na Figura 31. O erro absoluto variou de 4,13% a 5,17% para os 15 modelos.

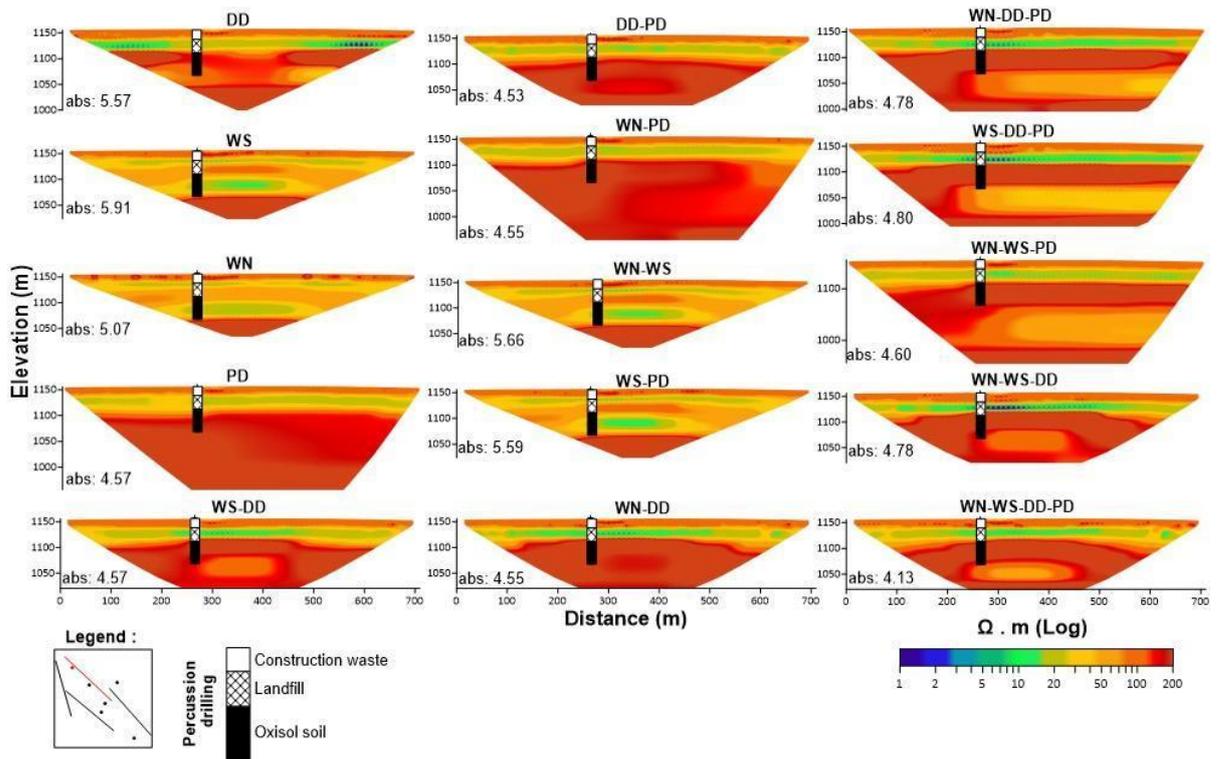


Figura 31 - Modelos numéricos da seção 1 para 15 arranjos múltiplos. Simulação realizada a partir da reconstrução histórica do ACJC e das informações diretas furo de sondagem PG1. Fonte: original dos autores.

4.3.4 Modelo de espessura de resíduos

Após escolher a seção que melhor se enquadrava nos critérios, foram extraídos os dados de elevação referentes aos isovalores de resistividade para a base e a tendência no valor de resistividade para o topo da camada de resíduos da porção central do aterro para cada imagem da combinação escolhida.

O *grid* estimado de cota do topo e base da camada de resíduos foi gerado no software *Surfer (Golden software)* pelo método da krigagem ordinária com função exponencial para o semivariograma. Os parâmetros da função teórica como *sill* e *range*, bem como os eixos de *anisotropy* foram ajustados e validados pelo método a *cross validation*. Para avaliar a qualidade dos *grids*, foi realizada a análise do histograma de erro percentual e, para avaliar acurácia e precisão, foram calculados a RMSE (*root mean squared error*) e o coeficiente de correlação de Pearson (φ).

A diferença absoluta entre ambas superfícies permitiu elaborar um modelo da espessura da camada de resíduos aterrados, bem como seu volume aproximado. O modelo de espessura limitou-se à região delimitada na Figura 1, de forma que a cota topográfica referente a este limite foi inserida como informação *a priori* durante a interpolação da superfície referente à base da camada de resíduos, uma vez que as

linhas de eletrorresistividade não amostraram essas extremidades devidamente, evitando extrapolações errôneas para o modelo final.

4.4 Resultados e discussões

Os resultados das inversões simultâneas podem ser observados nas Figuras 32, 33, 34 e 35. Em todas as seções, há um predomínio de valores de baixa resistividade, o que sugere forte influência de materiais condutivos na composição do aterro, provavelmente associados ao material lixiviado oriundo da decomposição dos resíduos orgânicos do aterro.

Todas as seções apresentam uma grande zona de baixa resistividade no corpo do aterro, entre 5 a 50 *ohm.m*. Essa zona possivelmente corresponde ao pacote de resíduos depositado ao longo dos anos. Acima dessa zona condutiva, é possível observar, nos primeiros metros das seções, uma camada irregular de mais alta resistividade, entre 40 a 180 *ohm.m*. A camada em questão pode corresponder à cobertura de resíduos de construção civil, depositados em anos mais recentes de funcionamento do aterro. Em mais altas profundidades, as seções apresentam valores mais elevados de resistividade em relação à porção intermediária condutiva do aterro, entre 100 a 200 *ohm.m*, o que pode ser associado ao substrato geológico natural existente em subsuperfície. A transição dos valores de baixa resistividade e mais alta resistividade acontece de forma gradual. Os valores de resistividade calculados para o latossolo em subsuperfícies foram bem mais baixos em relação aos valores esperados para o latossolo da região (Seimetz et al., 2013; Cavalcanti et al., 2014). A justificativa para tal fato pode estar relacionada à infiltração do material lixiviado, oriundo da decomposição dos resíduos orgânicos no latossolo em subsuperfície.

Quando analisadas as imagens dos 4 arranjos separadamente, Guedes et al. (2020) afirmam que o arranjo DD apresenta maior coerência com as informações diretas extraídas dos furos de sondagem e que os arranjos WN e WS ressaltam a característica horizontal do substrato rochoso em profundidade, apesar de não corresponderem satisfatoriamente ao nível do solo na maioria das linhas. No mesmo trabalho, os autores apontam também que as seções de PD tiveram a menor correspondência com as informações obtidas nos furos de sondagem.

As seções da L1 foram correlacionadas com os furos de sondagem PG1, PG2, SP-04 a 2, 10 e 30 m de distância entre a linha, respectivamente, e podem ser

visualizados na Figura 32. Ao correlacionar os valores de resistividade e as informações diretas dos furos, percebe-se que o modelo mais representativo do aterro, que melhor define a base do pacote de resíduos e com menor erro absoluto é o modelo gerado pela inversão simultânea WN-WS-DD, que por sua vez apresenta um valor de aproximadamente 30 *ohm.m* para a base do aterro.

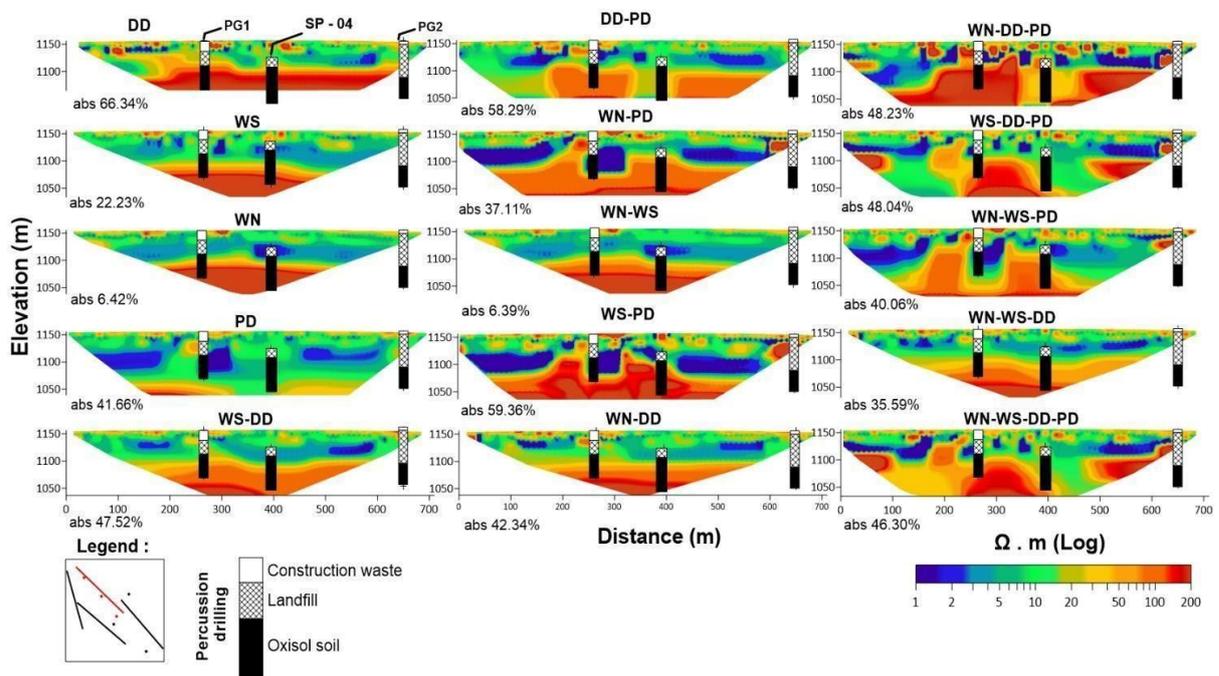


Figura 32 - Comparação entre seções de resistividade para linha 1 obtida para os 4 arranjos e 11 combinações de inversão, associados aos furos de sondagem PG1, PG2 e SP-04. Fonte: original dos autores.

Tendo em vista a baixa correspondência dos modelos após inversão com o arranjo PD com configuração esperada da subsuperfície do aterro, ao observar as inversões simultâneas da L1, é possível notar que as imagens obtidas com a inversão simultânea que apresentam dados do arranjo PD também tiveram pouca correspondência com a informação do furo de sondagem. Os modelos obtidos com os arranjos WN e WS em conjunto não apresentaram grandes diferenças.

As seções da L2 (Figura 33) não foram correlacionados com nenhum dos furos, devido à longa distância entre eles. As seções que mais se assemelham à configuração estrutural do aterro, isto é, três camadas marcantes e horizontalizadas, foram as inversões com dados de DD-PD. Entretanto, o erro absoluto associado ao modelo foi maior em relação a medidas das outras inversões, devido a maior quantidade de dados concatenados nessa composição de arranjos.

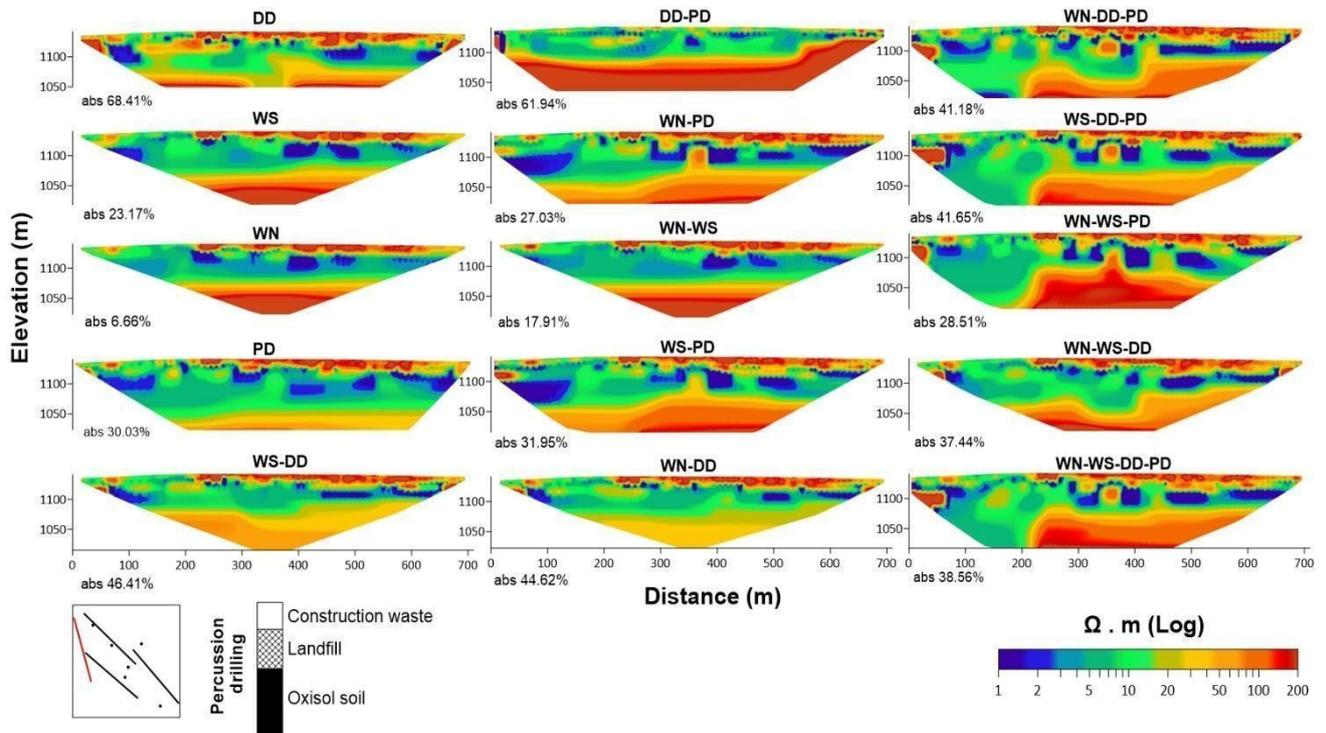


Figura 33 - Comparação entre seções de resistividade para linha 2 obtida para os 4 arranjos e 11 combinações de inversão. Fonte: original dos autores.

As seções da L3 foram correlacionadas com os furos de sondagem SP-07, a aproximadamente 75 m de distância da linha, e podem ser visualizados na Figura 34. Ao correlacionar os valores de resistividade e as informações diretas dos furos, a imagem gerada pelo arranjo DD obteve a menor correspondência com a base do aterro, enquanto os arranjos WN e WS apresentam maior semelhança. Entretanto, ao realizar a inversão simultânea dos arranjos, o modelo gerado pela inversão simultânea WN-DD e WN-DD-PD se apresentaram como os mais coerentes, devido à correspondência com o furo de sondagem e à maior investigação lateral da superfície da base do aterro. O valor aproximado de resistividade aparente para base do aterro é de aproximadamente de 40 *ohm.m*.

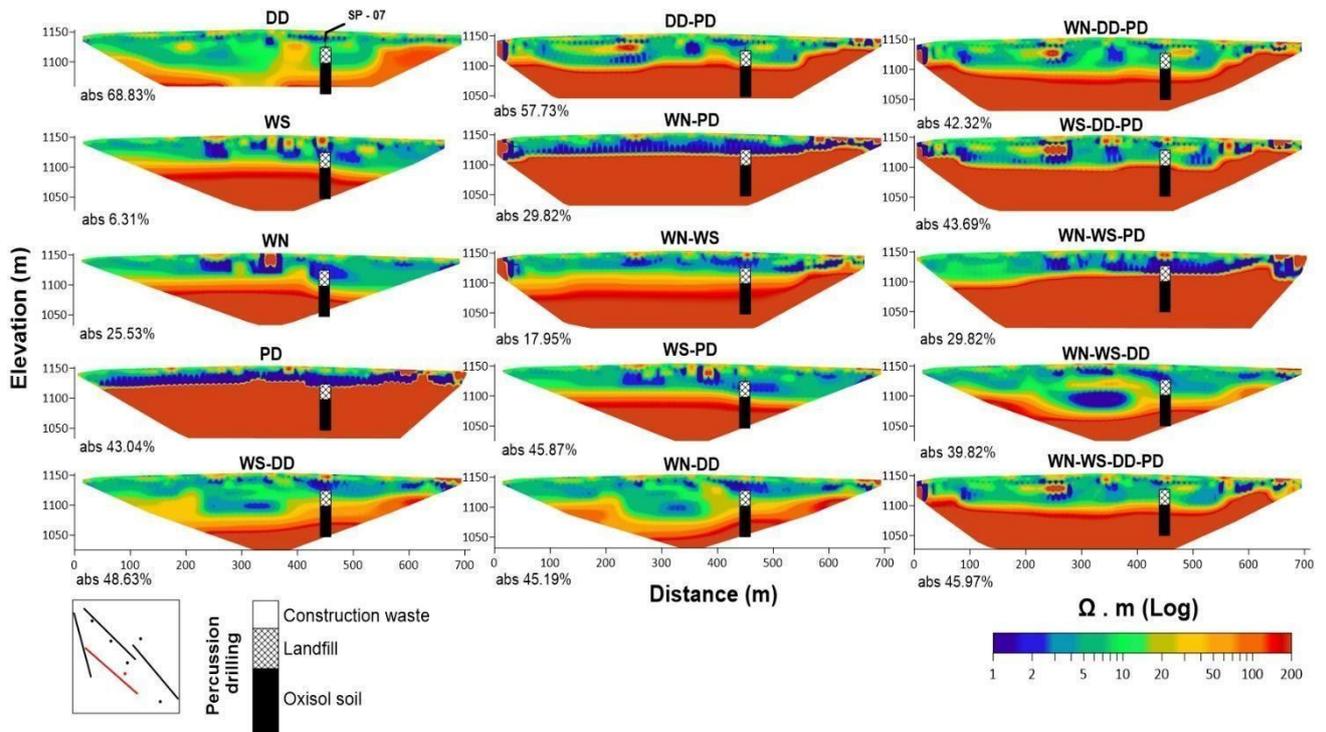


Figura 34 - Comparação entre seções de resistividade para linha 3 obtida para os 4 arranjos e 11 combinações de inversão, associado ao furo de sondagem SP-07. Fonte: original dos autores.

As seções da L4 foram correlacionadas com os furos de sondagem SP-07 a cerca de 150 m da linha e podem ser visualizados na Figura 35. Observa-se que os modelos gerados pelos arranjos DD, WS e WS possuem uma tendência à inclinação da camada mais resistiva e a base do aterro, de acordo com a informação direta do furo, aponta para valores mais baixos de resistividade (aproximadamente 10 ohm.m). Quando esses arranjos são concatenados entre si, o padrão de inclinação da camada resistiva e o valor das resistividades no geral se mantêm. Já nas seções após inversão com dados do arranjo PD, predominam o padrão de camadas mais horizontalizadas e valores de resistividade para a base do aterro mais altas (acima de 150 ohm.m).

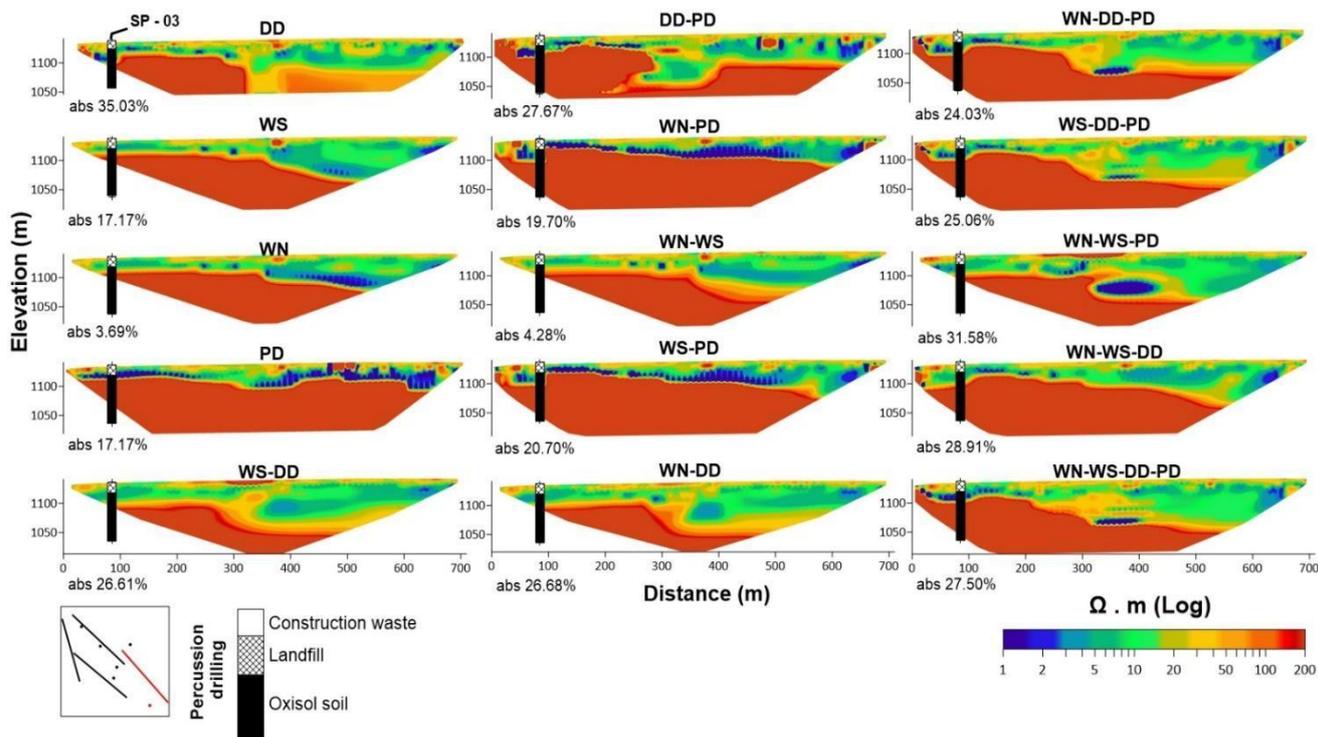


Figura 35 - Comparação entre seções de resistividade para linha 4 obtida para os 4 arranjos e 11 combinações de inversão, associado ao furo de sondagem SP-03. Fonte: original dos autores.

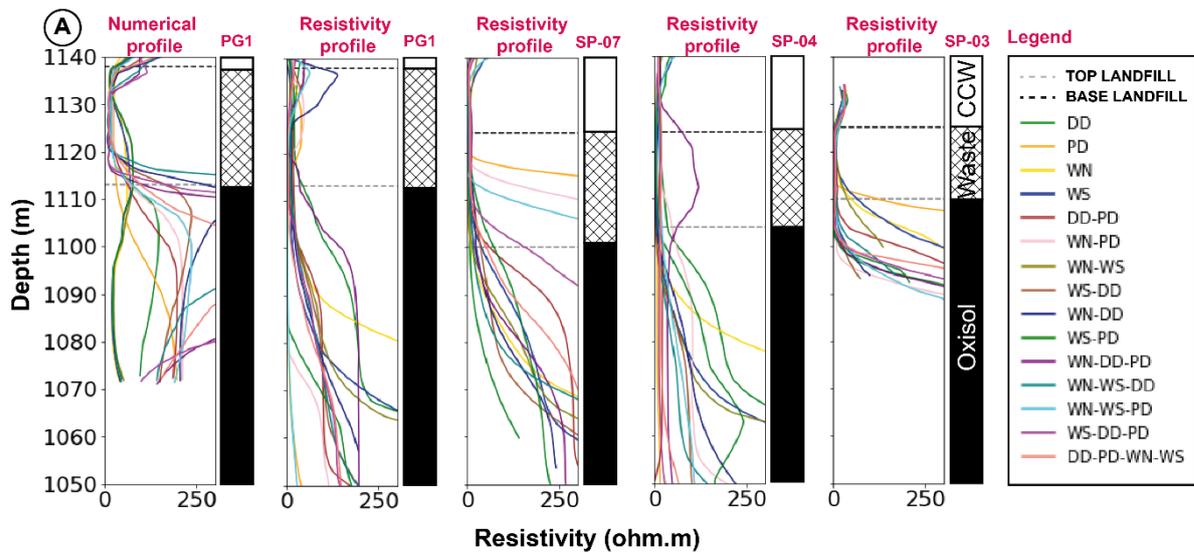
4.4.1 Comparação e validação dos modelos

Após a análise dos perfis de resistividade do modelo calculado ao longo do posicionamento do furo de sondagem, foi possível observar o comportamento numérico de variação dos valores de resistividade em profundidade. Além disso, foram analisados para cada arranjo múltiplo os contrastes de resistividades nos intervalos de 5 metros acima e abaixo do RCC e Lixo (topo do aterro) e lixo e solo (base do aterro). Os perfis de resistividade do modelo calculado e do modelo numérico podem ser observados na Figura 36a.

Pela análise estatística, foi elaborado um *ranking* dos arranjos combinados com os melhores valores de β_1 e *range* para todos perfis de resistividade. A combinação de arranjos WN-PD, WN-DD-PD, DD-PD obtiveram os melhores resultados respectivamente (Figura 36b). Ao observar as seções de resistividade do arranjo WN-PD como um todo e não apenas onde está localizado o furo de sondagem, é possível afirmar que as seções apresentam a horizontalidade esperada para as camadas de aterro e a profundidade de investigação alcançada pela combinação do arranjo WN-DD foi maior em relação aos arranjos WN e DD separadamente. O erro absoluto entre

o modelo observado e o calculado diminuiu em relação ao arranjo DD, porém segue sendo uma das combinações de arranjo com erros maiores. Apesar disso, foram escolhidas as imagens da inversão simultânea de WN-DD para gerar o modelo de espessura da camada de resíduos do ACJC, tendo em visto os vários fatores positivos que apontam a combinação de arranjo WN-DD como adequada.

Pelo *ranking* do perfil de resistividade da análise numérica, os arranjos WN-DD, WN-DD-PD também obtiveram as maiores variações nos limites do aterro, o que reafirma a escolha do arranjo WN-DD para elaboração do modelo de espessura de resíduos e valida as análises estatísticas realizadas anteriormente.



ARRAY	Numerical Model				Measured Model - PG1				Measured Model- SP-04				Measured Model - SP-03				Measured Model - SP-07				Ranking
	Top landfill		Ranking	Base landfill		Ranking	Top landfill		Ranking	Base landfill		Ranking	Top landfill		Ranking	Base landfill		Ranking			
	β_1	Range		β_1	Range		β_1	Range		β_1	Range		β_1	Range		β_1	Range		β_1	Range	
DD	0.1	3.78	5	0.43	12.98	8	0.06	1.82	2.4	51.2	1.71	39.72	-0.28	-21.3	0.61	37	-0.01	-9.16	0	0.16	8
PD	0.05	2.06	3	2.01	51.65	7	-0.26	-10	-0.01	-0.6	-0.08	-2.25	-0.78	-26.65	29	846.3	0	11.01	15	237.2	7
WN	0.75	22.38	12	-0.71	-19.61	12	-0.07	-2.01	1.1	25.01	0.41	8.01	-0.1	-8.96	4.72	235.1	7E-04	0.01	0.44	8.89	6
WS	1.23	33.26	13	-0.65	-22.08	10	-0.07	-1.08	0.27	4.98	0.59	9.55	-0.1	-13.26	4.4	245.6	0.005	-0.1	1.95	33.25	5
DD-PD	0.43	12.56	8	5.3	227.8	4	-0.37	-11.71	1.24	33.27	0.34	8.74	-0.72	-20.79	7.69	201.3	0.36	1.67	2.13	57.47	3
WN-DD	-0.11	4.1	1	7.8	276.3	2	-1.38	-32.27	0.008	0.11	0.98	28.56	-1.14	-26.1	0.3	9.3	-0.01	-0.54	6.4	182.6	1
WN-WS	1.51	40.14	14	-0.9	-27.32	13	-0.07	-1.98	0.98	26.18	0.13	4	-0.33	-24.5	1.76	89.72	-0.07	-2.27	0.4	11.57	4
WS-DD	0.59	22.4	10	-0.2	-1.73	9	-0.04	2.63	0.5	14.34	0.08	2.67	-0.44	-21.81	0.48	24.58	0.137	3.95	0.64	16.26	14
WN-PD	0.36	21.06	7	-2.8	-72.83	14	-1.23	-47.01	0.34	8.98	0.29	8.67	-0.32	-19.86	0.8	41.04	0.114	3.18	0.24	6.94	11
WS-PD	1.52	39.82	15	-0.69	-24.19	11	-0.65	-15.29	-0.01	-0.64	0.8	25.97	-1.05	-22.92	0.63	25.23	0.069	2.35	1.77	45.64	9
WN-DD-PD	-0.11	-2.92	2	6.49	234.9	3	-0.4	-32	1.76	94.6	-1.26	-64.46	-0.5	-27.19	0.41	28.16	0.02	1.25	4.7	15.09	2
WN-WS-DD	0.57	5.74	9	-5.65	-182.4	15	-0.05	-2.88	0.29	15.97	0.11	6.4	-0.31	-21.4	-7	79.15	0.02	1.21	0.18	9.64	15
WN-WS-PD	0.17	5.74	6	3	84.81	6	-0.28	-17.3	0.005	0.34	0.14	7.93	-0.42	-19.52	0.65	41.63	0	0	7.19	368	13
WS-DD-PD	0.07	-0.79	4	5.2	211.7	5	-0.03	-2.28	0.41	21.8	-0.02	-1.33	-0.4	-24.32	0.73	49.03	0.01	0.76	2.97	152.1	12
DD-PD-WN-WS	0.74	21.6	11	8.53	213.9	1	-0.11	-5.95	0.21	11.8	-0.02	-1.44	-1	-25.86	1.67	54.94	0.005	0.41	0.82	43.29	10

Figura 36 - Análise estatística dos perfis resistividade das seções de resistividade (1, 2 e 4 e modelo numérico), ao longo dos furos de sondagem (PG1, SP-03, SP-04, SP-07). A) Perfis de resistividade por profundidade ao longo dos furos de sondagem, contendo o perfil de

resistividade a respeito da seção de cada combinação de arranjo invertido. B) Valores de β_1 e range referentes os valores de resistividade ao longo dos furos de sondagem, intervalo de 10 metros do topo e de base do aterro. Em verde, estão destacadas as combinações de arranjos com melhores resultados dos parâmetros estatísticos. Fonte: original dos autores.

4.4.2 Modelo de espessura de resíduos

Na Linha 1, os valores aproximados de resistividade utilizados para extrair a elevação da base da camada de resíduos foram de 30 ohm.m . Na L3 e L4, a superfície de valores aproximados correspondentes a 20 e 10 ohm.m , respectivamente. Tendo em vista que a L2 não apresenta informações diretas de furos de sondagem, os valores extraídos do perfil correspondem à média dos valores de resistividade extraído das outras linhas (20 ohm.m). Os valores de cota referentes ao topo do aterro foram extraídos a partir do contraste de resistividade nos metros iniciais das seções e baseados nas informações diretas do PG1 e PG2. A linhas de valores aproximados de resistividade utilizadas para interpolação da base e topo do aterro pode ser observada na Figura 37.

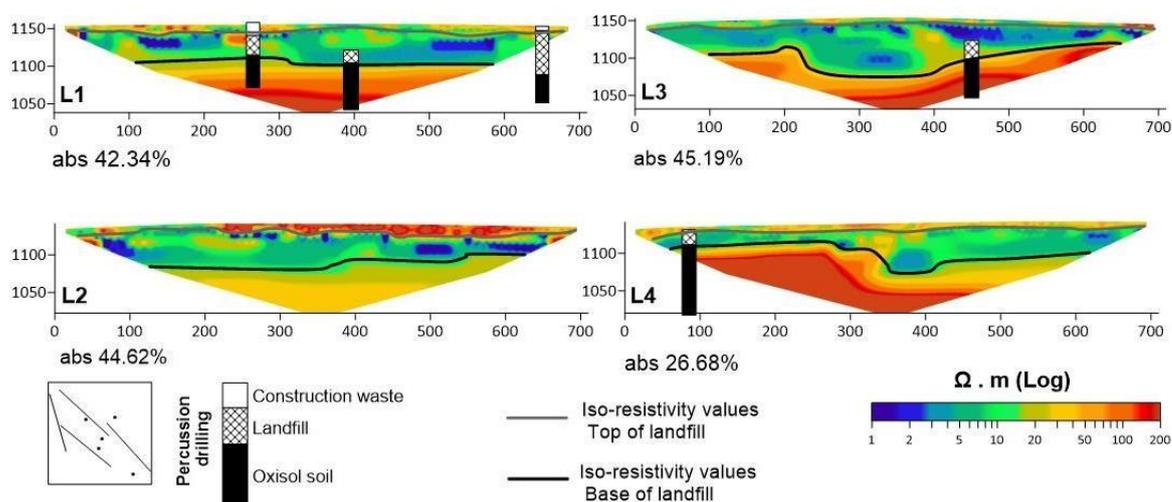


Figura 37 - Modelo de resistividade elétrica das linhas 1 a 4 obtidos pela inversão simultânea dos arranjos WN-DD com a projeção das sondagens geológicas. As linhas pretas e cinza representam os isovalores de resistividade utilizados para interpolação da superfície. Fonte: original dos autores.

O modelo interpolado da espessura de resíduos possui maior espessura no centro do aterro e diminui em direção aos limites da área investigada. A camada de

resíduos aterrados pode alcançar uma profundidade de até 65 metros. Além disso, estima-se que o volume aproximado de resíduos aterrado seja de aproximadamente 23.340.429 m³, a partir do modelo cúbico gerado.

O histograma de erro percentual dos *grids* de topo e base do modelo gerado é relativamente simétrico com a média percentual aproximadamente 0 e com pouca dispersão dos valores, o que aponta para acurácia e precisão dos *grids* interpolados. As características estatísticas de coeficiente de Pearson e RMSE para os *grids* possuem valores próximos de 1 e 3 m, respectivamente, o que indica uma forte correlação direta entre o valor real e o estimado dos modelos e uma boa acurácia dos resultados estimados. O modelo de espessura da camada de resíduos, bem como as características estatísticas de parametrização e validação da interpolação do topo e base da camada podem ser visualizados na Figura 38.

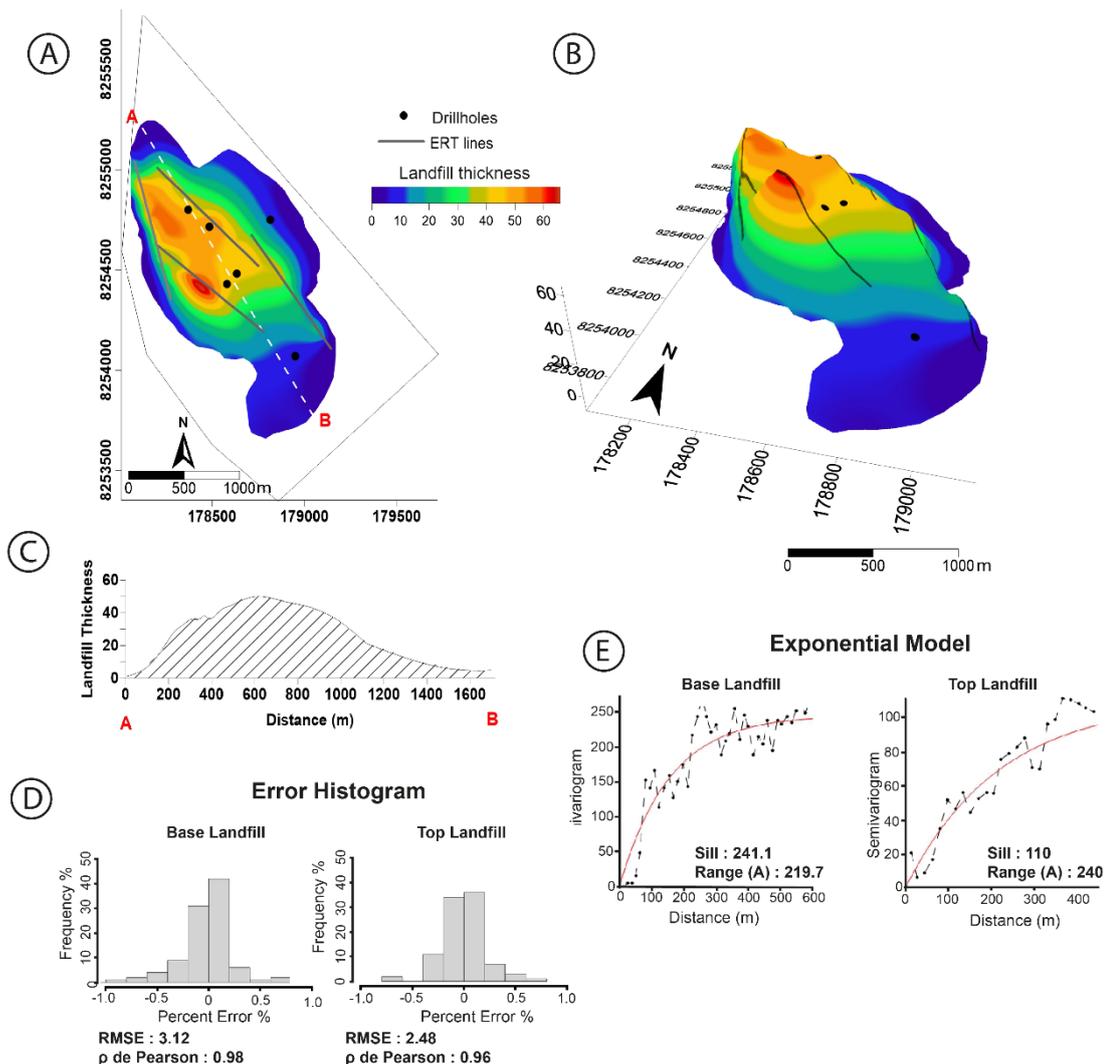


Figura 38 - O modelo interpolado da espessura de resíduos da área investigada do ACJC. A) Mapa da espessura da camada de resíduos para área investigada do aterro ACJC. B) Modelo

3D da espessura da camada de resíduos do ACJC. C) Perfil 2D da camada de resíduos (NW-SE) da área investigada. D) Histograma de erro relativo aos valores reais e medidos para a base e topo da camada de resíduos, e os valores de RMSE (root mean squared error) e coeficiente de correlação de Pearson (φ) calculados. E) Semivariograma dos dados de base e topo do aterro ajustado ao modelo exponencial, bem como os parâmetros da função teórica Sill e Range utilizados. Fonte: original dos autores.

4.5 Conclusões

No presente trabalho, foi discutida a comparação de modelos de resistividade elétrica após inversão individual e simultânea de dados adquiridos com os arranjos Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo e Polo-Dipolo. As cotas referentes a informações de furos de sondagem foram utilizadas para corroborar a interpretação das seções e avaliação dos resultados.

Todas as seções apresentaram uma grande zona de baixa resistividade, de 30 a 70 m na direção longitudinal, possivelmente associada a área saturada por chorume. A delimitação dessa zona pode ser estabelecida pelos contrastes de resistividade no topo e base das imagens de ERT e das informações dos furos de sondagem. É possível que os baixos valores de resistividade relacionados ao latossolo neste estudo sejam decorrência do fluxo do contaminante em subsuperfície, em vista do *background* de resistividade esperado para esse solo na região.

Em todas as inversões com os arranjos WN e WS foi possível alcançar maiores profundidades de investigação, porém o nível da camada mais resistiva associada ao solo foi maior que o valor esperado, de acordo com os dados dos furos. Além disso, a concatenação de dados WN e WS não retornaram diferenças significativas nos modelos.

Os modelos gerados pela configuração PD apontaram como os mais divergentes em relação as informações diretas dos furos. Quando os dados desse arranjo foram concatenados com dados dos arranjos WN, WS e DD, essa diferença também foi observada nas inversões combinadas. Uma forma de minimizar as diferenças entre as seções e as informações diretas seria incluir um fator de ponderação na inversão, a fim de equilibrar parcialmente a participação do arranjo PD na geração do modelo.

A partir da análise comparativa realizada e das conclusões de Guedes et al. (2020) quanto à recomendação do arranjo Dipolo-Dipolo para investigações na área,

as inversões simultâneas de dados WN e DD se apresentaram como uma nova e eficiente alternativa. Os modelos de resistividade produzidos com a inversão simultânea dos dados dessas duas configurações foram escolhidos como a opção mais atraente para a interpretação, devido a uma boa convergência com as cotas obtidas pela informação direta, resolução lateral suficiente para a caracterização da extensão da base e topo do aterro, uma maior profundidade de investigação e erros aceitáveis de desajustes entre a resistividade observada e calculada.

O tempo extra para adquirir um grande número de medições para diferentes arranjos pode ser uma limitação. Entretanto, adquirir dados em campo com diferentes arranjos eletródicos para a realização de rotinas de inversões simultâneas é uma opção considerável para expandir as possibilidades de análise e interpretação de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- AL-Hameedawi, M.M., Thabit, J.M., 2017. Comparison between four electrode arrays in delineating sedimentary layers of alluvial fan deposits in eastern Iraq using a 2D imaging technique. *Environ. Earth Sci.* 76, 525. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6853-9>
- Athanasiou, E.N., Tsourlos, P.I., Papazachos, C.B., Tsokas, G.N., 2007. Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types. *Appl. Geophys.* 62, 124–140. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.09.003>
- Auken, E., Christiansen, A.V., 2004. Layered e laterally constrained 2D inversion of resistivity data. *Geophysics* 69, 752–761. <https://doi.org/10.1190/1.1759461>
- Aziz, N.A., Abdulrazzaq, Z.T., Agbasi, O.E., 2019. Mapping of subsurface contamination zone using 3D electrical resistivity imaging in Hilla city , Iraq. *Environ. Earth Sci.* 78, 502. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8520-9>
- Barker, R.D., 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys e data inversionl 499–523.
- Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T., Hogland, W., 2000. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: Two pre-excitation surveys. *Environ. Geol.* 39, 360–371. <https://doi.org/10.1007/s002540050015>
- Campos, H.K.T., 2018. Como fechamos o segundo maior lixão do mundo. *Rev. Bras. Planej. e orçamento* 8, 204–253.
- Campos, J.E.G., Dardenne, M.A., Freitas-Silva, F.H., Martins-ferreira, M.A.C., 2013. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. *Brazilian J. Geol.* 43, 461–476. <https://doi.org/10.5327/Z2317-48892013000300004>
- Candansayar, M.E., 2008. Two-dimensional individual and joint inversion of three- and four-electrode array dc resistivity data *. *J. Geophys. Eng.* 5, 290–300. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/5/3/005>
- Cavalcanti, M.M., Borges, W.R., Reiner, S., Rocha, M.P., Cunha, L.S., Seimetz, E.X.,

- Nogueira, Pedro, V., Oliveira e Sousa, F.R.R. de O., 2014. Levantamento geofísico (eletrorresistividade) nos limites do Aterro Controlado do Jokey Clube, Vila Estrutural, Brasília - DF. *Geociências (São Paulo)* 33, 298–313.
- Clément, R., Descloitres, M., Günther, T., Oxarango, L., Morra, C., Laurent, J.P., Gourc, J.P., 2010. Improvement of electrical resistivity tomography for leachate injection monitoring. *Waste Manag.* 30, 452–464. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.002>
- Dahlin, T., Zhou, B., 2006. Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surf. Geophys.* 4, 113–123. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005037>
- Dahlin, T., Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophys. Prospect.* 52, 379–398. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x>
- De la Vega, M., Osella, A., Lascano, E., 2003. Joint inversion of Wenner and dipole – dipole data to study a gasoline-contaminated soil. *J. Appl. Geophys.* 54, 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2003.08.020>
- Deceuster, J., Delgranche, J., Kaufmann, O., 2006. 2D cross-borehole resistivity tomographies below foundations as a tool to design proper remedial actions in covered karst. *J. Appl. Geophys.* 60, 68–86. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.12.005>
- Demirel, C., Candansayar, M.E., 2016. Two-dimensional joint inversions of cross-hole resistivity data and resolution analysis of combined arrays. *Geophys. Prospect.* 65, 876–890. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12432>
- Eissa, R., Cassidy, N., Pringle, J., Stimpson, I., 2019. Electrical resistivity tomography array comparisons to detect cleared-wall foundations in brownfield sites. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 53, 137–144. <https://doi.org/10.1144/qjegh2018-192>
- Guedes, V.C.B., Lima, V.B. de O.L., Borges, W.R., Cunha, L.S., 2020. Comparison of the geoelectric signature with different electrode arrays at the Jockey Club landfill of Brasília. *Brazilian J. Geophys.* 38, 1–12. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v38i1.2034>
- Gujarati, D.N., Porter, D.C., 2011. *Econometria Básica*, 5th ed.
- Heincke, B., Günther, T., Dalsegg, E., Rønning, J.S., Ganerød, G.V., Elvebakk, H., 2010. Combined three-dimensional electric and seismic tomography study on the Åknes rockslide in western Norway. *J. Appl. Geophys.* 70, 292–306. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.12.004>
- Hermans, T., Paepen, M., 2020. Combined inversion of land and marine electrical resistivity tomography for submarine groundwater discharge and saltwater intrusion characterization. *Geophys. Res. Lett.* 47, 1–22. <https://doi.org/10.1029/2019GL085877>
- Hoornweg, D., Brada-tata, P., 2012. *What a waste?: a global review of solid waste management.*, 15th ed. Washington.
- Koide, S., Bernardes, R.S., 1998. Contaminação do lençol freático sob a a área do Aterro do Jockey Club, Distrito Federal., in: *X Brazilian Congress of Groundwater*. Federal District., pp. 1–11.
- Konstantaki, L.A., Ghose, R., Draganov, D., Diaferia, G., Heimovaara, T., 2015. Characterization of a heterogeneous landfill using seismic and electrical resistivity data. *Geophysics* 80, 13–25. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0263.1>
- Loke, M.H., 2011. *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys* By.

- Loke, M.H., Acworth, I., Dahlin, T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Explor. Geophys.* 34, 182–187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/EG03182>
- Loke, M.H., Dahlin, T., 2002. A comparison of the Gauss – Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *J. Appl. Geophys.* 49, 149–162. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00106-9](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00106-9)
- Lopes, D.D., Silva, S.M.C., Fernandes, F., Teixeira, R.S., Celligoi, A., Dall'antônia, Luiz H., 2012. Geophysical technique and groundwater monitoring to detect leachate contamination in the surrounding area of a landfill–Londrina (PR–Brazil). *Environ. Manage.* 113, 481–487. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.028>
- Martorana, R., Capizzi, P., D'Alessandro, A., Luzio, D., 2017. Comparison of different sets of array configurations for multichannel 2D ERT acquisition. *J. Appl. Geophys.* 137, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.12.012>
- Martorana, R., Fiandaca, G., Ponsati, A.C., Consentino, P.L., 2009. Comparative tests on different multi-electrode arrays using models in near-surface geophysics. *J. Geophys. Eng.* 6, 1–20. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/001>
- Moreira, C.A., Lapola, M.M., Carrara, A., 2016. Comparative analyzes among electrical resistivity tomography arrays in the characterization of flow structure in free aquifer. *Geofis. Int.* 55, 119–129. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2016.55.2.1716>
- Netto, L.G., Barbosa, A.M., Galli, V.L., Pereira, J.P.S., Gandolfo, O.C.B., Birelli, C.A., 2020. Application of invasive and non-invasive methods of geo-environmental investigation for determination of the contamination behavior by organic compounds. *J. Appl. Geophys.* 178. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104049>
- Osella, A., De La Vega, M., Lascano, E., 2002. Characterization of a Contaminant Plume Due to a Hydrocarbon Spill Using Geoelectrical Methods. *J. Environ. Eng. Geophys.* 7, 78–87. <https://doi.org/https://doi.org/10.4133/JEEG7.2.78>
- Pastore, E.L., Souza, N.M., Pereira, J.H.F., Franco, H.A., Santos, P.C. V., SILVA, A., 1998. Métodos de Investigação e Modelo Geológico–Geotécnico do Aterro de Lixo do Jóquei-Brasília/DF. XI Congr. Bras. Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica 3.
- Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C.H., Johansson, S., 2011. Mapping landfill gas migration using resistivity monitoring. *Proc. Inst. Civ. Eng. Waste Resour. Manag.* 164, 3–15. <https://doi.org/10.1680/warm.2011.164.1.3>
- Seimetz, E.X., Rocha, M.P., Borges, W.R., Nogueira, P.V., Cavalcanti, M.M., Azevedo, P.A., 2013. Integration of geophysical methods to define the geological interfaces for a future metro station located in Brasilia - DF, Brazil. *Geociencias* 32, 650–658.
- Sheard, J., 2018. Quantitative data analysis, 2nd ed. Elsevier. <https://doi.org/doi.org/10.1016/B978-0-08-102220-7.00018-2>
- Soupios, P., Papadopoulos, N., Papadopoulos, I., Kouli, M., Vallianatos, F., Sarris, A., Manios, T., 2007. Application of integrated methods in mapping waste disposal areas. *Environ. Geol.* 53, 661–675. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0681-2>
- Stummer, P., Maurer, H., Green, A.G., 2004. Experimental design : Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *J. Appl. Geophys.* 69, 120–139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1190/1.1649381>
- Szalai, S., Szarka, L., 2008. On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophys. Prospect.* 56, 159–175. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00673.x>

Wisén, R., Auken, E., Dahlin, T., 2005. Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes. *Near Surf. Geophys.* 3, 71–79. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005002>

Zhou, B., Greenhalgh, S.A., 2000. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations. *Geophys. Prospect.* 48, 887–912. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00220.x>

CAPÍTULO 5

5 ARTIGO 2

AVALIAÇÃO DE CAMADAS E DA SATURAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO ATERRO SANITÁRIO JOCKEY CLUBE A PARTIR DA ANÁLISE DE TOMOGRAFIA DE REFRAÇÃO SÍSMICA E ONDAS DE SUPERFÍCIE

Victória Basileu de Oliveira Lima, Victor José Cavalcanti Bezerra Guedes, Marcelo Peres Rocha, Welitom Rodrigues Borges, Luciano Soares da Cunha
Universidade de Brasília – UnB, Instituto de Geociências

Resumo

A sísmica de refração e MASW são métodos amplamente utilizados no estudo de aterros sanitários para delimitação da camada de resíduos e a caracterização dos materiais aterrados. Além disso, os métodos geofísicos podem contribuir com informações valiosas quanto ao mapeamento de áreas úmidas em maciços de resíduos sólidos urbanos. O presente trabalho discute a caracterização dos resíduos sólidos aterrados e zonas saturadas a partir da resposta das velocidades de ondas cisalhantes (V_s) e de compressão (V_p), bem como o produto derivado dessas velocidades como a razão de Poisson (ν), módulo de Young (E) e módulo de cisalhamento (G_0), obtidos com dados de Tomografia Sísmica de Refração e MASW em uma área localizada no antigo Aterro Controlado Jockey Clube de Brasília (ACJC). A V_p medida pela refração sísmica variou de 231 a 1.160 m/s. Os valores mínimos e máximo para V_s foram de 124 e 449, respectivamente. A ν calculada variou de 0,11 a 0,4. O G_0 foi de 15 a 319 mPa . Já o E variou de 42 a 901 mPa . Os intervalos de valores obtidos para V_s e V_p estão um pouco acima dos resultados obtidos em outras investigações sísmicas em aterros. Os valores de E e G_0 indicam que o material

aterrado é pouco competente. A interpretação combinada dos valores de V_p e V_s e parâmetros elásticos permitiu a definição da zona úmida da subsuperfície referente ao pacote de resíduos aterrado na área de aquisição.

Palavras chaves: Aterro; Sísmica de refração; MASW.

5.1 Introdução

Aterros não controlados são áreas de disposição de resíduos sólidos em contato direto com a superfície do solo ou em seu interior. Nessas áreas, o controle de materiais descartados é inadequado e sem sistema de drenagem do chorume gerado da composição dos resíduos orgânicos. Os impactos globais dos resíduos sólidos podem acarretar desastrosas consequências, como inundações, poluição do ar e impactos na saúde pública, como aumento nos casos de diarreia e doenças relacionadas, além de epidemias de dengue (Hoorweg e Bhada-tata, 2012; Paixão Filho e Miguel, 2017). Estima-se que, no Brasil, 40.9% dos resíduos sólidos coletados sejam descartados de forma inadequada em aterros a céu aberto (Alfaia et al., 2017). Tais práticas vêm sendo gradualmente substituídas devido ao reconhecimento do prejuízo ambiental e contra a saúde humana que causam.

Nesse contexto, pouco se sabe sobre as características mecânicas dos materiais descartados e dos limites verticais e horizontais das camadas de resíduos aterrados. Além disso, devido à falta de impermeabilização do substrato geológico, o fluxo de chorume no interior do maciço de resíduos é uma das principais preocupações de equipes técnicas em aterros. A medição direta de propriedades mecânicas dos resíduos geralmente ocorre em pontos discretos e sobre um pequeno volume do material. Essas limitações de amostragem são superadas com o uso dos métodos sísmicos, que mostram ser uma solução alternativa e eficiente para investigações de aterros sanitários.

A investigação de aterros sanitários por métodos sísmicos, tais como *crosshole*, *downhole*, *uphole*, refração e métodos de onda de superfície (MAM, SASW, MASW), são ferramentas indiretas, não invasivas e rápidas na solução de caracterização geotécnica de aterros sanitários (De Iaco et al., 2003; Matasovic et al., 2006; Zekkos et al., 2014; Abreu et al., 2016; Anbazhagan et al., 2016; Gaël et al., 2017; Aranda et al., 2019; Sharma et al., 2021), porém ainda pouco utilizadas como

investigação de aterros sanitários. A sísmica de refração e o MASW são métodos que fornecem modelos de velocidade da onda compressiva (V_p) e da onda cisalhante (V_s), respectivamente. A partir dos valores de velocidade dessas ondas e da densidade (ρ), é possível calcular o módulo de cisalhamento (G_0), a Razão de Poisson (ν) e o módulo de Young (E). Além disso, podem fornecer informações do fluxo de chorume no interior do maciço de resíduos através da identificação de zonas úmidas em subsuperfícies, uma vez que as velocidades das ondas P e S e a razão entre elas respondem de maneiras características à presença de chorume no solo (Konstantaki et al., 2016).

Carpenter et al. (2013) utilizaram modelos de velocidade das ondas P e S gerados por tomografia de refração sísmica para calcular a distribuição da razão de Poisson em um aterro. Konstantaki et al. (2015), por meio do imageamento sísmico de refração e MASW, calcularam valores do peso unitário dos resíduos em subsuperfície por relações empíricas a partir das velocidades da onda S obtidas e apresentaram um modelo de densidade para um aterro heterogêneo. Abreu et al. (2016) analisaram a resposta elástica de resíduos aterrados através dos métodos de *crosshole* e MASW, gerando e analisando perfis de V_p , V_s e a razão de Poisson. Konstantaki et al. (2016) identificaram as zonas de acumulação de água ao longo do maciço de resíduos pela interpretação dos perfis de velocidade da onda P, da onda S, da razão entre elas (V_p/V_s) e da estimativa de densidade empiricamente por V_s .

As propriedades mecânicas dos resíduos sólidos municipais influenciam diretamente nos valores medidos de V_p e V_s e podem variar de aterro para aterro de acordo com as diferentes composições dos resíduos depositados (Zekkos et al., 2006). Ademais, a porcentagem de umidade e material orgânico, que compõe cerca de 51,4% dos RSU brasileiros (Alfaia et al., 2017), influencia, ao longo prazo, as propriedades mecânicas dos resíduos, uma vez que afetam os processos de biodegradação (Castelli et al., 2013).

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a utilização integrada da sísmica de refração e MASW na caracterização das diferentes camadas de uma parcela do Aterro Controlado Jockey Clube (ACJC) e calcular as propriedades elásticas de interesse geotécnico a partir das relações de V_p e V_s .

5.1.1 Área de estudo

A área de estudo é o Aterro Controlado Jockey Clube (ACJC), localizado em Brasília-DF, mais especificamente na Cidade da Estrutural. Com pouco menos de 2 km² de área, o ACJC é uma das maiores unidades de descarte da América Latina e atualmente opera apenas como Unidade de Recebimento de Entulho (URE). O início de deposição de resíduos se deu na década de 1960 com pouco ou nenhum controle da natureza dos resíduos dispostos (Campos, 2018). Acredita-se que os resíduos no local são principalmente de origem doméstica e estão cobertos por uma camada de resíduos de construção civil (RCC) que varia em espessura e composição. Abaixo do aterro, ocorrem latossolos de profundidades maiores que 25 metros (Cavalcanti et al., 2014; Guedes et al., 2020). A Figura 39B apresenta um modelo simplificado da disposição das camadas do ACJC desenvolvido a partir de seções de resistividade apresentadas em Guedes et al. (2020) e por furos de sondagem rotativa realizados recentemente no local.

O contexto geológico que compõe o arcabouço da área de estudo é as rochas do Grupo Paranoá, de idade Meso/Neoproterozoica, mais especificamente a Fm. Ribeirão do Torto. Essa unidade é composta por ardósias de coloração cinza esverdeada. Nesse conjunto, são observadas duas foliações penetrativas que representam as clivagens ardosianas e configuram o caráter da rocha friável e quebradiça (Campos et al., 2013).

O relevo predominante na região de estudo é plano a suave ondulado com declividades inferiores a 10% e cotas superiores a 1.100 m. No âmbito da área de estudo, a topografia natural foi intensamente modificada desde o início do funcionamento do ACJC. Atualmente, o local foi modificado de tal forma que o centro do aterro é um alto topográfico conhecido informalmente como “Bolo de Noiva”.

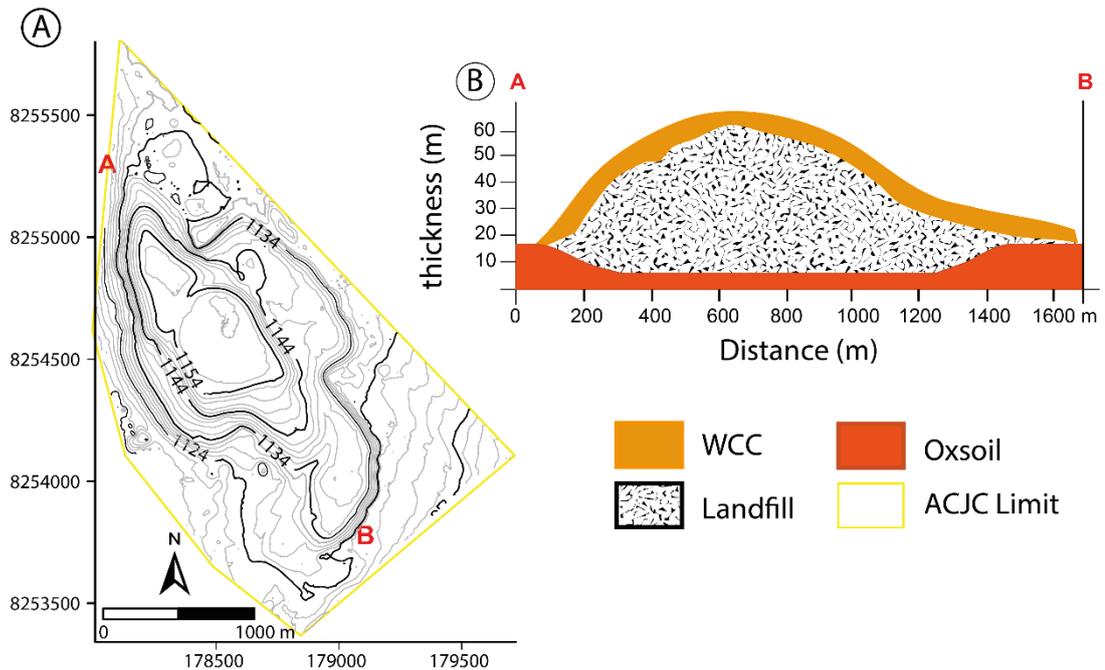


Figura 39 - A) Vista em planta do ACJC com a localização da seção representativa das camadas do aterro. B) Modelo simplificado da disposição dos diferentes materiais que compõem o ACJC, resumido em três camadas principais: resíduos de construção civil (WCC), resíduos sólidos e superfície natural (latossolo).

5.2 Metodologia

5.2.1 Aquisição de dados

As técnicas utilizadas na aquisição sísmica foram para o imageamento de refração e MASW. Foi adquirido uma linha para ambas as metodologias na porção oeste do ACJC (Figura 40A). Um total de 48 geofones verticais de 14 Hz foram distribuídos em linha reta e fixados na superfície com espaçamento de 3 metros entre si, formando um perfil de 141 m de comprimento (Figura 40B). Cinco seções sísmicas foram registradas durante a campanha de campo, sendo quatro em configuração *offset* (posições -15 m, -1 m, 142 m e 156 m) e uma em *onset* (posição 70,5 m).

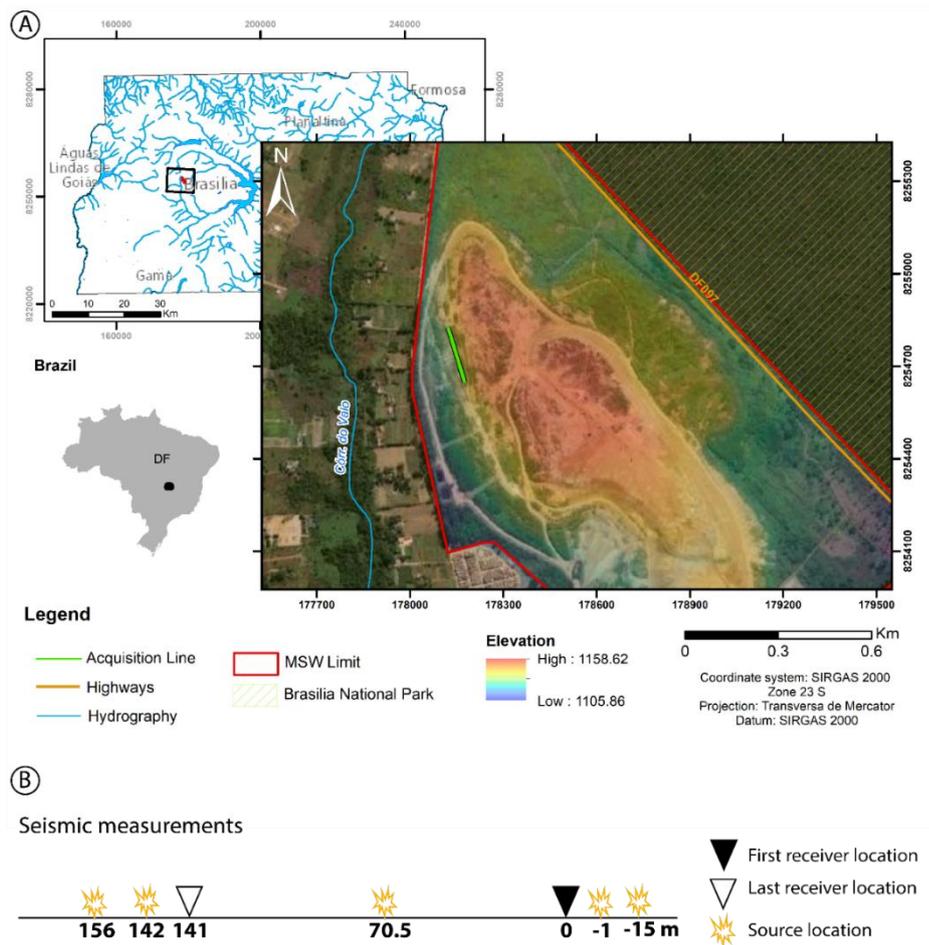


Figura 40 - A) Mapa de localização da aquisição da linha sísmica (Linha verde). B) Localização da fonte (tiro 1 em 156 m, tiro 2 em 142 m, tiro 3 em -15 m, tiro 4 em -1 m e tiro 5 em 70,5 m).

A aquisição sísmica foi configurada a partir do *software Seismodule Controller (Geometrics)*, no qual os parâmetros de aquisição foram inseridos. Um resumo geral da configuração utilizada e o registro fotográfico da aquisição é apresentado na Tabela 4 e Figura 41, respectivamente.

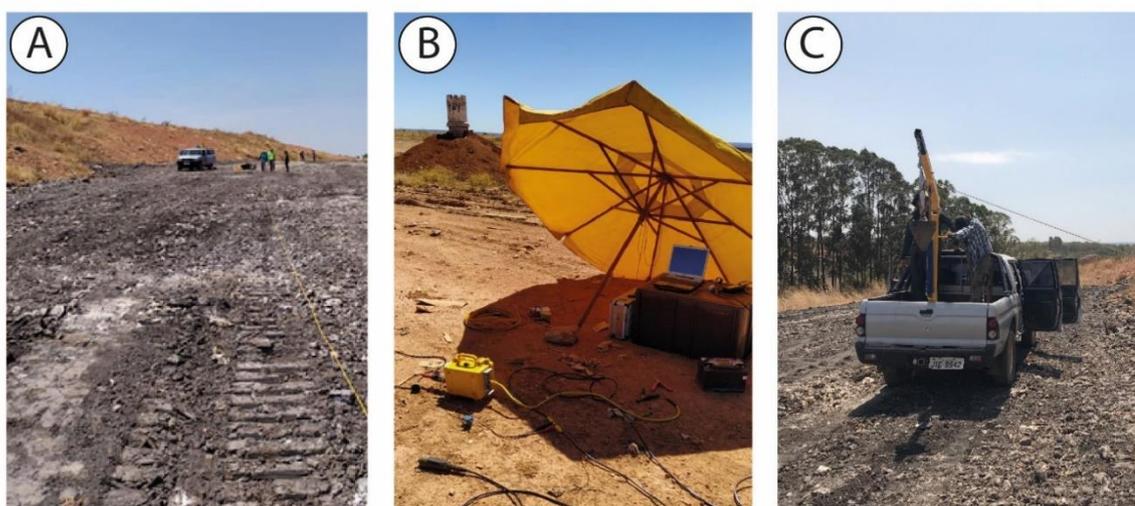


Figura 41 - Fotos da aquisição sísmica. A) Posicionamento dos geofones em linha reta; B) Estação base do computador controlador da aquisição de dados; C) Preparo da queda de peso para registro sísmico na posição de tiro 5.

Parâmetro de aquisição	Materiais/valores utilizados
Sistema	Geode (Geometrics)
Fonte	Peso de 66 kg (Fig. 2C)
Posições de tiro	156, 142, 70.5, -1 e -15 m
Receptores	48 geofones verticais (14 Hz)
Espaçamento entre receptores	3 m
Tamanho da linha	141 m
Amostragem	0.128 ms
Janela temporal	1500 ms
Stacks automáticos	7

Tabela 4 - Materiais e parâmetros utilizados na aquisição sísmica.

5.2.2 Fonte

As três principais fontes utilizadas em aquisições de dados sísmicos são marretas, sistemas de quedas de peso e explosivos. A escolha de uma fonte de

energia apropriada deve levar em consideração a quantidade de energia liberada, que influencia na qualidade dos registros. Quanto mais potente o pulso sísmico gerado, mais notáveis ficam as amplitudes associadas às chegadas de ondas sísmicas aos geofones, sejam elas ondas P ou *ground-roll*.

Uma opção intermediária são quedas de peso. Os pesos utilizados podem ter tamanhos variados, de forma que quanto maior sua massa, maior a energia produzida com o impacto causado por sua queda, o que torna mais provável que geofones distantes consigam fazer bons registros de frentes de onda.

Primeiramente os dados foram adquiridos como fonte a marreta de 8 kg. Devido a maior dispersão da energia das ondas em aterros e baixa razão sinal/ruído, não foi possível observar adequadamente as chegadas das ondas diretas e refratadas, principalmente a maiores *offsets*, o que reduziria significativamente a relevância do modelo de velocidade. Por essa razão, substituímos a marreta por um peso de 66 kg lançado a uma altura de 3 metros. O sinal obtido nos sismogramas melhorou de forma significativa, conforme apresentados nos exemplos na Figura 42 e Figura 43.

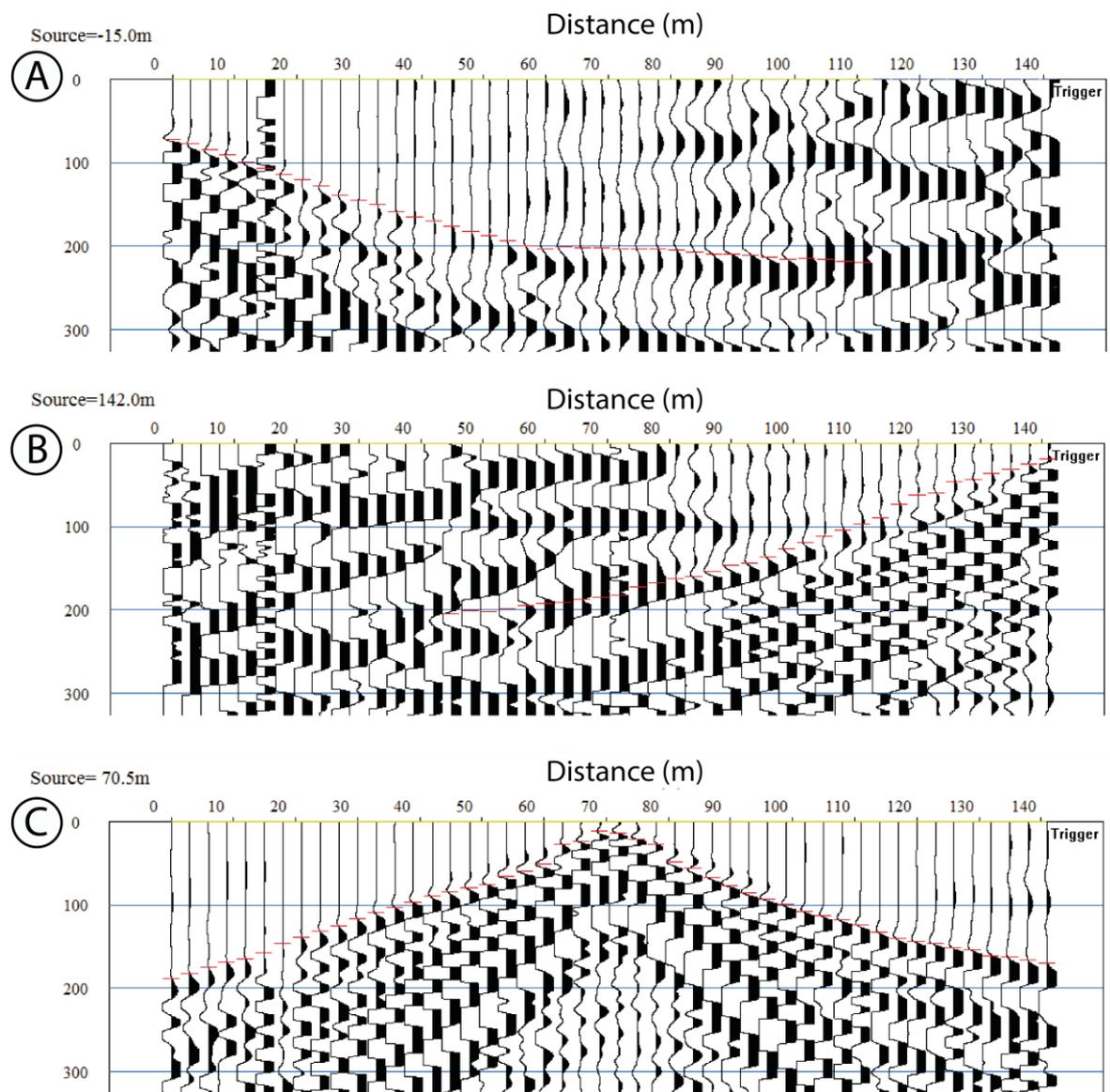


Figura 42 - Seleção de primeiras chegadas de 3 sismogramas processados. A) Sismograma referente ao tiro 1 (fonte em 142 m). B) Sismograma referente ao tiro 2 (fonte em -15 m). C) Sismograma referente ao tiro 3 (fonte em 70,5 m).

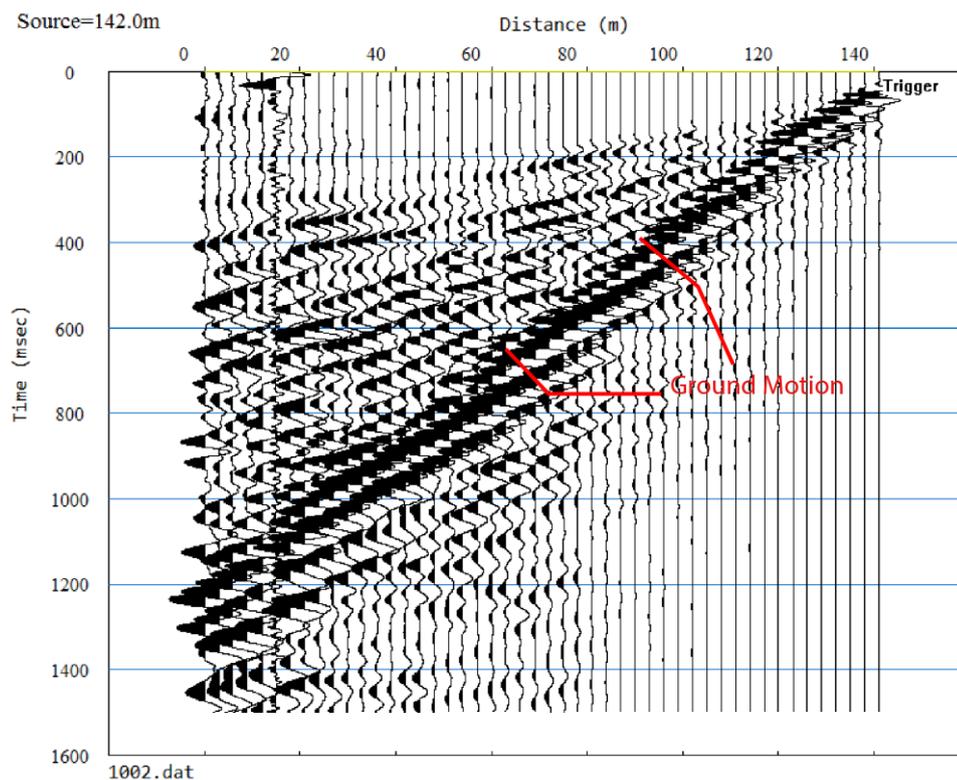


Figura 43 - Sismograma utilizado para obtenção para cálculo de perfil de velocidade S.

5.2.3 MASW

O método do MASW (Park et al., 1999) foi empregado para obter o perfil de onda S do local investigado a partir do registro de ondas *Rayleigh*. O processamento foi realizado sobre a seção sísmica *offset* obtida na posição de fonte de -15 m. Foi utilizado o software *Surface Wave Analysis (Seisimager/SW, Geometrics)*, no qual foram executadas as seguintes etapas (Figura 44):

- 1) Empregou-se o corte de frequências maiores que 85;
- 2) Cálculo das velocidades de fase por transformação 2D no domínio da frequência dos registros de campo e obtenção de uma imagem de frequência *versus* velocidade de fase;
- 3) Observação da curva de dispersão a partir das amplitudes do modo fundamental de vibração;
- 4) Construção de modelo inicial de camadas 1D e inversão da curva de dispersão observada por mínimos quadrados não-linear para cálculo do perfil 1D de V_s em profundidade.

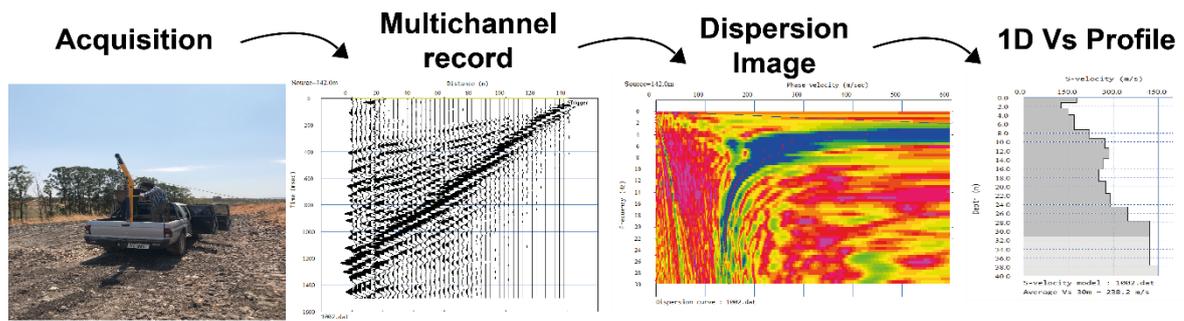


Figura 44 - Síntese das principais etapas de aquisição e processamento de MASW para se obter o perfil de onda de cisalhamento (V_s). Primeiramente, registro das ondas sísmicas em um sistema de multicanais, após o impacto do peso em queda. Em seguida, obtenção do fenômeno da dispersão por meio de uma transformação de cada traço do sismograma do domínio do tempo para o domínio da frequência. Por fim, as curvas de dispersão são extraídas de forma que no processo de inversão obtém-se o perfil de velocidade V_s .

5.2.4 Tomografia de Refração Sísmica

O método da sísmica de refração foi empregado para se obter o perfil de onda P do local investigado a partir da inversão de primeiras chegadas do registro de ondas de corpo utilizando fonte ativa. O processamento foi realizado no *software* *Pickwin* e *Plotrefa* (*Seisimager/2D*, *Geometrics*) e consistiu nos seguintes passos:

- 1) Filtragem das seções sísmicas entre 16 Hz e 85 Hz;
- 2) *Picking* de primeiras chegadas da onda P em cada traço individual para construção das curvas de tempo de percurso;
- 3) Construção de modelo de velocidade inicial, seguido por rotina iterativa de traçado de raios (Moser, 1991) e reconstrução do modelo de velocidade após cada interação com inversão de mínimos quadrados não-linear baseada no algoritmo SIRT (Técnica de Reconstrução Iterativa Simultânea) (Hayashi e Takahashi, 2001). O modelo final de V_p foi obtido após 10 iterações.

Para a etapa de inversão, os tempos de primeiras chegadas são apresentados juntos em um gráfico de curvas de tempo de percurso. Em seguida, um modelo inicial de elementos finitos deve ser construído em função de parâmetros pré-estabelecidos (ex. profundidade e velocidades de topo e base). Os tempos de percurso de primeira chegada e caminhos de raio são calculados por traçado de raio e o modelo de velocidade é reconstruído (a velocidade de cada célula é atualizada) em um processo

iterativo, até que a diferença entre os tempos calculados e observados seja minimizada, retornando o modelo final de velocidade. As etapas de aquisição, processamento e inversão do traçado de raio para obter o modelo de velocidade P está sumarizado na Figura 45.

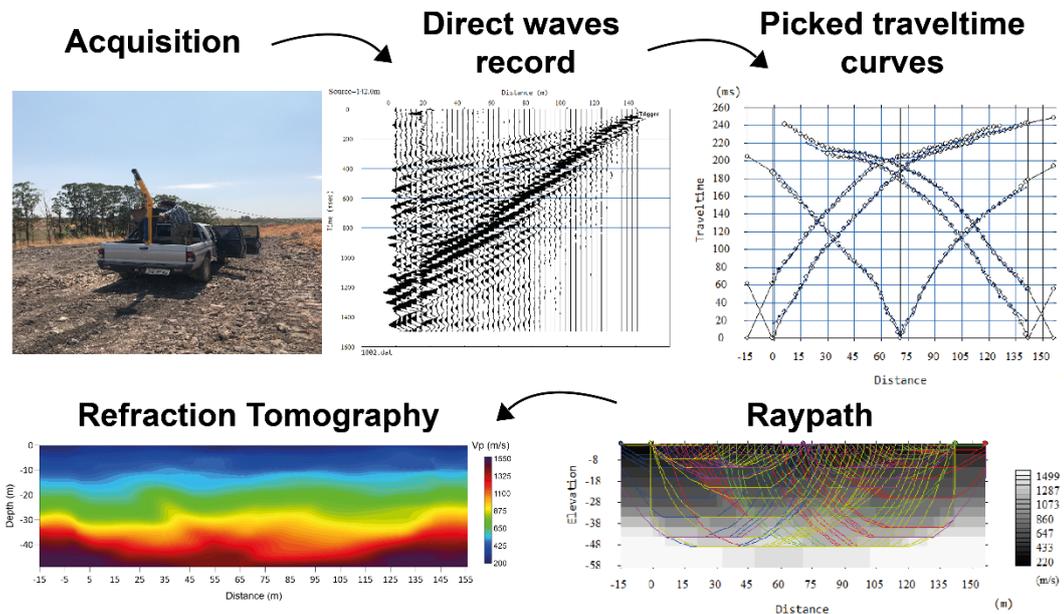


Figura 45 - Síntese das principais etapas de aquisição e processamento da Tomografia de refração, para obter-se o perfil 2D de onda P (V_p). Primeiramente, registro das ondas sísmicas em um sistema de multicanais, após o impacto do peso em queda. Em seguida, demarcações de primeiras chegadas para cada traço dos sismogramas. Por fim, Modelagem dos traçados de raios para o cálculo de tempos de percurso teóricos e caminhos de raio e obtenção do tomograma de V_p .

5.2.5 Propriedades elásticas

Utilizando a relação entre os perfis de velocidade de onda compressional e onda cisalhante, foi possível estimar os parâmetros elásticos dinâmicos para a área investigada do ACJC. A partir dos valores de V_p , V_s e a ρ calculada, foram obtidos os parâmetros elásticos de Modulo de Young (E), a razão de Poisson (ν) e o módulo de cisalhamento (G).

O módulo de cisalhamento é uma grandeza comumente explorada em contextos geotécnicos, uma vez que indica a tendência de deformação por cisalhamento, portanto se associando à rigidez de um material (Mavko et al., 2010; Clayton, 2011). De acordo com a teoria da elasticidade (Sheriff e Geldart, 1995), G_0 é definido como a razão a entre a tensão de cisalhamento e a deformação. A eq. (51)

pode calcular o valor de G a partir da distribuição de velocidade de onda e a densidade quando conhecida, como:

$$G = \rho V_s^2 \quad (51)$$

Portanto, se os parâmetros ρ e V_s forem estimados independentemente, G pode ser determinado com mais precisão. Entretanto, considerando que os 30 primeiros metros do solo são mais comumente considerados para estudos rasos de geotecnia, é esperada uma pequena influência da variação de ρ neste intervalo (cerca de 2 a 3 g/cm^3 , para a maioria dos casos). Assim, simplificações quanto à escolha do valor de densidade é justificada, pois G apresenta uma dependência linear com ρ , enquanto há uma dependência quadrática com V_s . A variação de V_s , portanto, pode ser usada como um indicador de rigidez satisfatório.

Ainda que saber a velocidade das ondas P e S seja útil, elas são funções de até três propriedades individuais do solo, sendo indicadores potencialmente ambíguos de litologia se analisados individualmente (Berge e Bertete-Aguirre, 2000; Kearey e Brooks, 2009).

A razão V_p/V_s , no entanto, é independente da densidade e pode ser um indicador litológico mais diagnóstico (Kearey et al., 2009; Alam e Jaiswal, 2017). Outra possibilidade é se obter a razão de Poisson em termos das velocidades P e S, como:

$$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2} \quad (52)$$

O módulo de Young (E) é a resistência à deformação ao longo do eixo de tensão, dependente da densidade (ρ) em termos da velocidade da onda S. Pode ser obtido pela equação:

$$E = 2V_s^2 \rho (1 + \nu) \quad (53)$$

A variação do módulo de Young (E) pode ser usada também como um indicador de rigidez satisfatório.

Para quantificar o parâmetro de densidade (ρ), utilizado na eq. (53), foi empregada uma relação empírica entre a velocidade da onda S (V_s) e a unidade do peso de resíduos sólidos (γ_{waste}) (Choudhury e Savoikar, 2009), baseado em mais de 30 medições independentes em aterros sanitários:

$$V_s = \frac{1}{0.0174 - 0.000978 \gamma_{waste}} \quad (54)$$

A densidade aparente pode ser calculada como:

$$\rho = \frac{\gamma_{waste}}{g} \quad (55)$$

Em que g é a aceleração da gravidade (9.81 m / s^2).

Um perfil V_p 1D foi extraído do modelo 2D ao centro do perfil obtido pela inversão tomográfica. A partir desse perfil, com o perfil 1D de V_s , foram calculados os parâmetros de E, ν, G e ρ de seção em profundidade.

5.2.6 Resultados e discussão

No local de investigação, a camada de resíduos sólidos é menor em relação ao centro do ACJC. A profundidade de lixo aterrado é aproximadamente de 12 a 20 m, conforme a descrição de furos de sondagens realizados próximo ao local.

Em geral, σ varia entre 0 a 0,5, onde valores mais elevados (próximos a 0,5) indicam materiais menos rígidos e característicos de presença de fluido incompressível (Uhlemann et al., 2016; Alam e Jaiswal, 2017).

O tomograma de V_p obtido a partir da sísmica de refração e o perfil de velocidade V_s obtido para sismograma analisado no método MASW são apresentados na Figura 46. No tomograma, é possível observar um aumento gradual de V_p de 200 m/s a 1.550 m/s . Nos primeiros 10 metros, V_p varia de 200 a 490 m/s e V_s varia de 12 a 320 m/s . No intervalo intermediário de 10 a 30 m, V_p aumenta de 500 a 900 m/s , enquanto V_s diminui até 250 m/s . É possível que essa diminuição de V_s esteja correlacionada ao início de zonas consideravelmente saturadas por chorume da composição dos resíduos orgânicos. Já na profundidade abaixo de 30 metros, a velocidade pode alcançar até 1.500 m/s de V_p , enquanto V_s volta a um comportamento crescente, atingindo até 450 m/s . Essa mudança de tendência em V_s pode estar relacionado com a localização do latossolo na base do ACJC e a menor presença de fluidos.

Em comparação com um solo seco, um solo com água geralmente apresenta aumento de V_p e diminuição de V_s (Baechle et al., 2009; Foti et al., 2018; Kassab e

Weller, 2015; Konstantaki et al., 2016). Da mesma forma, a saturação de água diminui significativamente o módulo de cisalhamento (Baechle et al., 2009), afetando V_p e V_s .

A onda S é consideravelmente sensível à presença de fluidos. Diferente de V_p , o aumento da saturação do meio faz com que V_s permaneça constante ou diminua bruscamente (Konstantaki et al., 2016). Assim, comparado com um solo seco, um solo saturado apresenta um aumento em V_p e uma diminuição ou constância em V_s . Para melhor correlacionar os valores de V_p e V_s associados a aterros sanitários, foi elaborada uma tabela com a variação de valores de V_p e V_s obtidos em outras pesquisas para melhor correlacionar os dados obtidos nesse estudo (Tabela 5) com os obtidos para outros aterros sanitários (Tabela 6).

As propriedades elásticas do comportamento dos resíduos sólidos como o coeficiente de Poisson e o módulo de Young são essenciais para quantificar a resposta de um material a uma mudança de tensão. No geral, quanto maior o valor desses parâmetros, maior a densidade e o conteúdo de solo em MSW. Em geral, ν varia entre 0 a 0,5, onde valores mais elevados (próximos a 0,5) indicam materiais menos rígidos e característicos de presença de fluido incompressível (Uhlemann et al., 2016; Alam e Jaiswal, 2017). Valores de Poisson (ν) variando de 0,05 a 0,35 são razoáveis para MSW. Valores mais altos no contexto de aterro são considerados resíduos mais densos e com alta composição de solo em seu interior (Zekkos et al., 2011). Já o módulo de cisalhamento (G) é essencial para avaliação de rigidez no material e para projetar análise de movimentação de solos em áreas com alta sismicidades ou sujeitas a cargas dinâmicas que podem causar deslizamentos de terra (Zekkos et al., 2008; Abreu et al., 2016).

A Figura 47 apresenta a comparação gráfica desses valores com este estudo. Os valores de V_p e V_s obtidos em comparação com os outros estudos estão dentro do intervalo de valores calculados para aterros, um pouco acima da média. Deve-se considerar que o presente estudo investiga profundidades relativamente maiores que em outros trabalhos, o que pode estar correlacionado a maiores valores de V_p e V_s em profundidade também.

O perfil e a profundidade referente a razão de Poisson (ν) apresenta uma correlação entre os perfis de V_s média e V_p . O ν obteve um mínimo de 0,11 e um máximo de 0,41. Abaixo da superfície, os valores calculados foram decrescentes entre 0,38 a 0,11 até 10 metros de profundidade. Após os 10 metros, o valor de ν sofreu um

aumento em até 0,41, correspondente à profundidade de 25 metros. Abaixo dessa camada, o valor de ν passou a diminuir suavemente para até 0,38. Esses valores indicam como a razão Vp/Vs pode contribuir com a interpretação de áreas úmidas, de forma que o intervalo úmido entre 10 a 25 m se apresenta claramente como uma zona de Razão de Poisson mais elevada, característico da influência de saturação no meio. Entre os intervalos de 0 a 10 m e 25 a 37 m os valores diminuem, o que sugere uma área relativamente seca, com aumento progressivo de umidade no perfil. Já nos intervalos 10 a 25 m, os valores aumentam, sugerindo áreas saturadas influenciadas por chorume, com diminuição progressiva de umidade e/ou aumento da densidade em profundidade ao atingir o nível do latossolo.

Os módulos elásticos de cisalhamento ($G0$) e Young (E) possuem comportamento semelhante na distribuição em profundidade. Foi obtido um valor de $G0$ mínimo de 15 mPa e máximo de 319 mPa . Para o módulo de Young, foi calculado um valor mínimo de 42 mPa e máximo de 901 mPa . Esse intervalo de valores indica a presença de um material extremamente incompetente. Até 12 metros de profundidade, os valores de $G0$ e E calculados aumentaram em profundidade entre 15 mPa a 111 mPa . Após esse ponto, o valor de $G0$ sofreu uma suave diminuição em até 88 mPa , correspondente a profundidade de 18 m. Abaixo dessa profundidade, o valor de $G0$ aumentou progressivamente até o valor máximo de 319 mPa . Da mesma forma, no intervalo de profundidade abaixo da superfície até 12 metros, o valor de Young aumentou de 42 a 295 kPa e passou a diminuir suavemente até 255 kPa , correspondente a profundidade de 17 metros. Abaixo dessa profundidade, o valor de E sofreu um aumento progressivo à máxima de 901 kPa .

Pela análise dos valores calculados para Vp , Vs , ν , E e $G0$ em profundidade, foi possível individualizar as três camadas na parcela do ACJC e suas respectivas espessuras. A camada de RCC possui cerca de 10 metros de profundidade. A camada de resíduos possui de 25 a 30 metros de espessura e, abaixo dos 30 metros, encontra-se o terreno natural do aterro configurado pelo latossolo, em que não foi possível identificar o contato entre o latossolo e o substrato rochoso, provavelmente devido à grande espessura que esses latossolos podem alcançar.

Aplicando a relação empírica entre velocidade de onda S e peso unitário (γ_{waste}) proposto por Choudhury e Savoikar (2009), a média do peso unitário foi de 0,013 kN/m^3 . O baixo peso unitário está relacionado à característica de MSW com baixa

compactação e conteúdo de solo em relação a terrenos naturais (Zekkos et al. 2006). Esse valor impacta diretamente na velocidade da onda de cisalhamento, o que diminui o valor de G de MSW pouco compactados. Isso está de acordo com os resultados apresentados de módulo de cisalhamento entre 110 a 210 Mpa e na zona de baixa velocidade de 220-280 m/s obtido pelo MASW, para provável camada de resíduos aterrados.

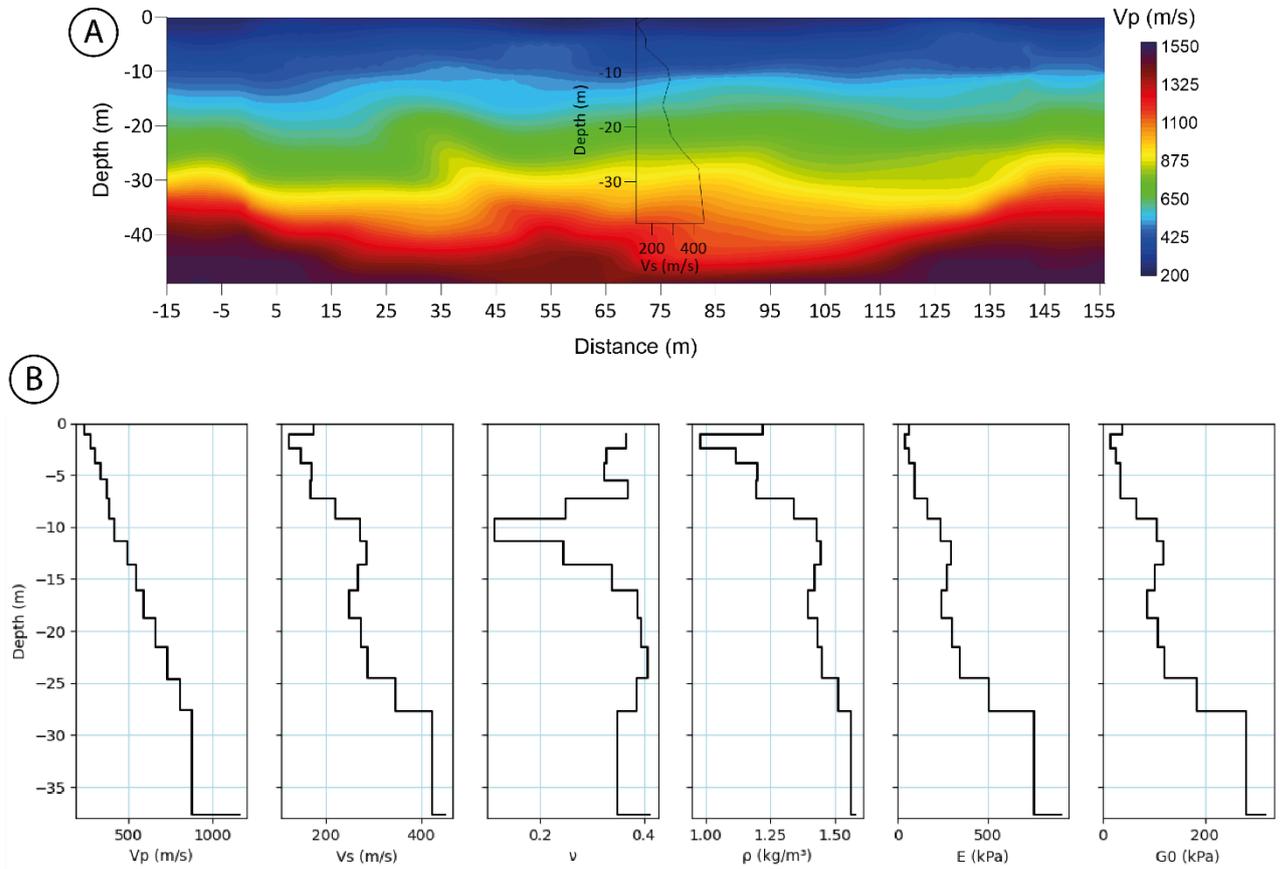


Figura 46 - A) Tomograma de V_p obtido a partir da sísmica de refração, juntamente ao perfil de velocidade V_s obtido pelo método MASW; **B)** V_p , V_s Parâmetros elásticos calculados em profundidade para zona central do perfil analisado. Fonte:

Depth	V_p (m/s)	V_s (m/s)	(kN/M)		G (mPa)	E (mPa)
0 - 37 m	231 - 1160	124 - 449	0.97 - 1.58	0.11 - 0.41	15 - 319	42 - 901

Tabela 5 - Mínimo, máximo referentes aos valores de V_s , V_p e ν , E e G_0 calculados no presente estudo.

Referência	Método	Vs		Vp	
		mín	máx	mín	máx
Carey et al. (1993)	Crosshole	185	478	-	-
Houston et al. (1995)	Downhole	124	184	235	300
De Iaco et al. (2003)	Sísmica de reflexão e refração	-	-	200	600
Cossu et al. (2005)	Sísmica de refração	-	-	350	1500
Del Greco et al. (2007)	Sísmica de refração	-	-	300	1200
Wongpornchai et al. (2009)	Sísmica de refração	-	-	124	849
Carpenter et al. (2013)	Sísmica de refração e MASW	90	210	350	643
Zekkos et al. (2014)	MASW and MAM	100	150	-	-
		100	170	-	-
		90	160	-	-
		70	210	-	-
Castelli e Maugeri (2014)	SDMT	50	400	-	-
Konstantaki et al. (2014)	Sísmica de reflexão e MASW	120	260	-	-
Konstantaki et al. (2016)	Sísmica de reflexão e MASW	60	80	80	100
Abreu et al. (2016)	Crosshole e MASW	92	214	197	451
Anbahzagan et al. (2016)	MASW	57	125	-	-
Gaël et al. (2017)	MASW	100	180	-	-
Aranda et al. (2019)	Crosshole	86	89	217	252

Tabela 6 - Valores de Vs, Vp calculados em investigações sísmicas em aterros. Fonte: adaptado de Abreu et al. (2016) e Aranda et al. (2019).

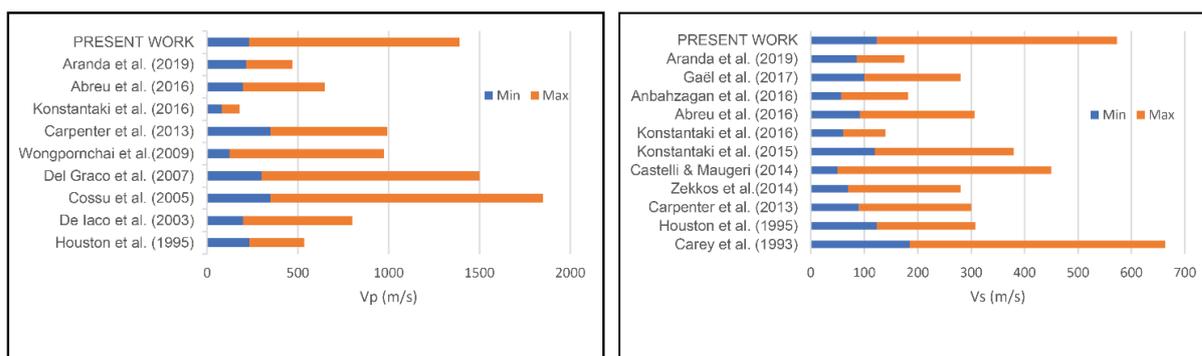


Figura 47 - Comparação de variação de Velocidade de onda P e S obtidos em outros trabalhos e o presente estudo utilizando métodos sísmicos em aterros sanitários.

5.3 Conclusões

O emprego das metodologias de sísmica de refração e MASW para obter o tomograma de velocidade de onda P e o perfil de velocidade de onda S, respectivamente, foi satisfatório para delinear a espessura da camada de resíduos do ACJC. Os fatores como alto teor de material orgânico, diferença de competência entre os materiais aterrados e diferença de saturação de fluidos dos poros entre camadas contribuíram para melhor delinear as camadas que compõem o ACJC, que por sua vez possuem implicações na velocidade de ondas sísmicas.

A análise conjunta de parâmetros elásticos de ν , E e G_0 é uma maneira complementar de se utilizar os produtos geofísicos individuais obtidos pelos métodos sísmicos, de forma a melhor representar o histórico da disposição de resíduos do ACJC. Esses parâmetros fornecem informações valiosas sobre as propriedades de resistência, competência e saturação dos materiais aterrados no ACJC.

O conhecimento referente à distribuição das zonas úmidas em um aterro é necessário para a operação e o tratamento eficiente do aterro. A interpretação combinada dos valores de V_p e V_s permitiu a definição de uma camada úmida no ACJC em subsuperfície. As zonas com aumento de V_p , juntamente com a constância ou diminuição de V_s e a razão de Poisson relativamente alta, conforme evidenciado nos dados sísmicos, foram interpretadas como camada saturada por chorume de aproximadamente 15 metros.

A velocidade média da onda de cisalhamento medida pelo método MASW variou de 124 a 449 m/s . A velocidade da onda de compressão medida pela refração sísmica variou de 231 a 1.160 m/s . A razão de Poisson calculada variou de 0,11 a 0,4. O G_0 foi de 15 a 319 mPa . Já o E variou de 42 a 901 mPa . A profundidade de investigação foi de 40 metros, o que é incomum para a maioria de estudos de aterros sanitários. Esse fato se deve principalmente à fonte sísmica utilizada, o grande tempo de operação do aterro e a alta compactação dos resíduos, que corroboram para melhores resultados. Apesar disso, pela magnitude dos valores dos parâmetros elásticos calculados, um material pode ser classificado como pouco competente, de acordo com o que se espera do contexto de aterros sanitários.

Baixas velocidades (i.e., $V_p < 300$ m/s) podem ser observadas ao longo da porção mais superficial do modelo de velocidade obtido com a tomografia de sísmica de refração. Durante a etapa de inversão dos dados, uma menor diferença entre os

tempos de percurso observados e calculados (estes pela modelagem direta do traçador de raios) foi obtida adotando-se um modelo de velocidade inicial com $V_p = 200$ m/s ao topo. Trabalhos como De Iaco et al. (2003), Wongpornchai et al. (2009), e Abreu et al. (2016) onde o método de sísmica de refração também foi aplicado, reportaram modelos de velocidade com comportamento similares.

A aquisição sísmica em contexto de aterros sanitários é uma tarefa desafiadora, pois a propagação de ondas sísmicas diminui em amplitude rapidamente em subsuperfície. Para esses locais, faz-se necessário o uso de fontes alternativas mais potentes, como a queda de peso utilizada no presente estudo. Ademais, a utilização de um sensor de menor frequência natural (ex. 4,5 Hz) pode contribuir para aumentar a profundidade de investigação, bem como o comprimento de linha. Vale ressaltar a utilização de métodos complementares, como métodos sísmicos de fonte passiva, como uma alternativa de solução de contorno para as limitações apresentadas (Zonge et al., 2005; Donno e Cardarelli, 2017; Frid e Israel, 2017). Por fim, deve-se considerar os métodos elétricos como Eletrorresistividade e Polarização Induzida (IP) como uma maneira complementar de análise de saturação do maciço de resíduos sólidos urbanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Ab'Saber, A.N., 1964. As altas superfícies de aplainamento do Brasil sudeste. *Rev. Fac. Campineiras* 60–67.
- Abreu, A.E.S., Gandolfo, O.C., Vilar, O.M., 2016. Characterizing a Brazilian sanitary landfill using geophysical seismic techniques. *Waste Manag.* 53, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.048>
- Abreu, A. E.S., Gandolfo, O.C.B., Vilar, O.M., 2016. Characterizing a Brazilian sanitary landfill using geophysical seismic techniques. *Waste Manag.* 53, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.048>
- Abreu, A.E.S., Vilar, O.M., 2013. IN-PLACE MSW UNIT WEIGHT MEASUREMENT IN SÃO CARLOS. *Fourteenth Int. Waste Manag. Landfill Symp.*
- ÁGUA e TERRA, 2006. Estudos geotécnicos preliminares e caracterização dos limites da área do antigo aterro na região da Vila Estrutural – DF. Relatório Técnico, Brasília, DF 70.
- AL-Hameedawi, M.M., Thabit, J.M., 2017. Comparison between four electrode arrays in delineating sedimentary layers of alluvial fan deposits in eastern Iraq using a 2D imaging technique. *Environ. Earth Sci.* 76, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6853-9>
- Alam, M.I., Jaiswal, P., 2017. Near Surface Characterization Using V P /V S and Poisson's Ratio from Seismic Refractions. *J. Environ. Eng. Geophys.* 22, 101–109. <https://doi.org/10.2113/JEEG22.2.101>
- Alfaia, R.G. de S.M., Costa, A.M., Campos, J.C., 2017. Municipal solid waste in Brazil: A

- review. *Waste Manag. Res.* 35, 1195–1209. <https://doi.org/10.1177/0734242X17735375>
- Almeida, F.F., 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. *Simpósio Geol. do Nord.* 8, 391.
- Anbazhagan, P., Lakshmikanthan, P., 2016. Seismic characterization and dynamic site response of a municipal solid waste landfill in Bangalore, India. *Waste Manag. Res.* 34, 205–203. <https://doi.org/10.1177/0734242X15622814>
- Anbazhagan, P., Sivakumarbabu, G.L., Lakshmikanthan, P., Vivekanand, K.S., 2016. Seismic characterization and dynamic site response of a municipal solid waste landfill in Bangalore, India. *Waste Manag. Res.* 34, 205–213. <https://doi.org/10.1177/0734242X15622814>
- Aranda, N., Prado, R.L., Elis, V.R., Gonçalves, M., Otávio, M., Conicelli, B., 2019a. Evaluating elastic wave velocities in Brazilian municipal solid waste. *Environ. Earth Sci.* 78, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8490-y>
- Aranda, N., Prado, R.L., Elis, V.R., Miguel, M.G., Gandolfo, O.C.B., Conicelli, B., 2019b. Evaluating elastic wave velocities in Brazilian municipal solid waste. *Environ. Earth Sci.* 78, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8490-y>
- Aristodemou, E., 2000. DC resistivity and induced polarisation investigations at a waste disposal site and its environments. *J. Appl. Geophys.* 44, 275–302.
- Aziz, N.A., Abdulrazzaq, Z.T., Agbasi, O.E., 2019. Mapping of subsurface contamination zone using 3D electrical resistivity imaging in Hilla city, Iraq. *Environ. Earth Sci.* 78, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8520-9>
- Baechle, G.T., Eberli, G.P., Weger, R.J., Massaferrero, J.L., 2009. Changes in dynamic shear moduli of carbonate rocks with fluid substitution. *Geophysics* 74. <https://doi.org/10.1190/1.3111063>
- Bergamo, P., Dashwood, B., Uhlemann, S., Swift, R., Chambers, J.E., Gunn, D.A., Donohue, S., 2016. Time-lapse monitoring of fluid-induced geophysical property variations within an unstable earthwork using P-wave refraction. *Geophysics* 81, EN17–EN27. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0276.1>
- Berge, P.A., Bertete-Aguirre, H., 2000. Laboratory Velocity Measurements Used For Recovering Soil Distributions From Field Seismic Data, in: 13th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. European Association of Geoscientists e Engineers, p. 662. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.200.2000_024
- Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T., Hogland, W., 2016. DC resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excitation surveys. *Environ. Geol.* 39, 360–371. <https://doi.org/10.1007/s002540050015>
- Borges, W.R., 2007. Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Universidade de São Paulo.
- Campos, H.K.T., 2018. Como fechamos o segundo maior lixão do mundo. *Rev. Bras. Planej. e orçamento* 8, 204–253.
- Campos, J.E.G., 2004. Hidrogeologia do Distrito Federal : bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos *HIDROGEOLOGIA DO DISTRITO FEDERAL : BASES PARA A GESTÃO DOS*. *Brazilian J. Geol.* 34, 41–48. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.20043414148>
- Campos, J.E.G., Dardenne, M.A., Freitas-Silva, F.H., Martins-Ferreira, M.A.C., 2013. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. *Brazilian J. Geol.* 43, 461–476. <https://doi.org/10.5327/Z2317-48892013000300004>
- Campos, J.E.G., Gaspar, M.T., Gonçalves, T., 2007. Gestão de recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal: diretrizes, legislação, critérios técnicos, sistema de informação geográfica e operacionalização. Técnico. Brasília, DF 158.
- Cardoso, M.R.D., Marcuzzo, F.F.N., Barros, J.R., 2014. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER PARA O ESTADO DE GOIÁS E O DISTRITO FEDERAL CLIMATIC

- CLASSIFICATION OF KÖPPEN-GEIGER FOR THE STATE OF GOIÁS AND THE FEDERAL DISTRICT 40–55. <https://doi.org/10.5654/actageo2014.0004.0016>
- Carey, P.J., Koragappa, N., Gurda, J.J., 1993. A case study of the Brookhaven Landfill, Long Island, New York. *Proc. WasteTech '93*, Mar. Del Rey, CA. Natl. Solid Waste Manag. Assoc. Washington, D.C..
- Carpenter, P.J., Calkin, S.F., Kaufmann, R.S., 1991. Assessing a fractured landfill cover using electrical resistivity and seismic refraction techniques. *GEOPHYSICS* 56, 1896–1904.
- Carpenter, P.J., Reddy, K.R., Thompson, M.D., 2013. Seismic Imaging of a Leachate-Recirculation Landfill: Spatial Changes in Dynamic Properties of Municipal Solid Waste. *J. Hazardous, Toxic, Radioact. Waste* 17, 331–341. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hz.2153-5515.0000175](https://doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000175)
- Castelli, F., Lentini, V., Maugeri, M., 2013. Stability Analysis of Landfills in Seismic Area 1226–1239. <https://doi.org/10.1061/9780784412787.124>
- Cavalcanti, M.M., Borges, W.R., Stollberg, R., Rocha, M.P., Soares, L., Seimetz, E.X., Nogueira, V., Ferreira, R., Olivera, R. De, 2014. Levantamento Geofísico (Eletrorresistividade) nos limites do Aterro Controlado do Jokey Club, Vila Estrutural, Brasília - DF 298–313.
- Choudhury, D., Savoikar, P., 2009. Simplified method to characterize municipal solid waste properties under seismic conditions. *Waste Manag.* 29, 924–933. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.05.008>
- Claerbout, J.F., Muir, F., 1973. Robust modeling with erratic data. *Geophysics* 38, 826–844.
- Clayton, C.R.I., 2011. Stiffness at small strain: Research and practice. *Geotechnique* 61, 5–37. <https://doi.org/10.1680/geot.2011.61.1.5>
- Clément, R., Descloitres, M., Günther, T., Oxarango, L., Morra, C., Laurent, J., Gourc, J., 2010. Improvement of electrical resistivity tomography for leachate injection monitoring. *Waste Manag.* 30, 452–464. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.002>
- Cossu, R., Di Maio, R., Fais, S., Fraghi, a, Ligas, P., Menghini, a, 2005. Physical and structural characterisation of an old landfill site by a multimethodological geophysical approach. 10th Int. Waste Manag. Landfill Symp. (Sardinia 2005) 1–8.
- Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Comput. Geosci.* 27, 1019–1029.
- Dahlin, T., 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *J. Appl. Geophys.* 38, 237–249.
- Dahlin, T., Bernstone, C., Ohlsson, T., Hogland, W., 2000. DC-resistivity mapping of internal landfill structures : two pre-excitation surveys. *Environ. Geol.* 39, 360–371.
- Dahlin, T., Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophys. Prospect.* 52, 379–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x>
- Dardenne, M.A., Fonseca, M.A., Uhlein, A., 1995. Faixa brasilia setor setentrional: estilos estruturais e arcabouço tectónico. *Rev. Bras. Geociências* 25, 267–278.
- De Iaco, R., Green, A.G., Maurer, H.R., Horstmeyer, H., 2003. A combined seismic reflection and refraction study of a landfill and its host sediments. *J. Appl. Geophys.* 52, 139–156. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00255-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00255-0)
- Del Greco, O., Fassino, A., Godioht, A., 2007. Seismic investigation for the assessment of the elastic settlement in MSW landfill. *Proc. Elev. Int. Waste Manag. Landfill Symp.* Cagliari, Italy.
- Diniz, S., Nisiyama, F.L., Maria, N., Guimarães, L., Ribeiro, F., Camargo, D.T., Vasconcelos, G., Lacerda, C. De, Silva, S., Barros, F., Fleury, C., Esteves, E., Silva, D.A., Luís, A., Cavalcante, B., 2019. ESTUDO DA ACURÁCIA POSICIONAL DE DADOS GEOESPACIAIS OBTIDOS COM RPA MEDIANTE USO DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA VERIFICAÇÃO DO PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA

- (PEC). An. do XIX Simpósio Bras. Sensoriamento Remoto 3397–3400.
- Dobrin, M.B., Savit, C.H., 1988. Introduction to geophysical prospecting. McGraw- Hill, Inc.
- Donno, G. De, Cardarelli, E., 2017. Tomographic inversion of time-domain resistivity and chargeability data for the investigation of landfills using a priori information. *Waste Manag.* 59, 302–315. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.020>
- Eeikmeier, C.N., 2018. Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW): um estudo comparativo com fontes ativas e passivas, ondas Rayleigh e Love e diferentes modos de propagação. Universidade de São Paulo.
- EMBRAPA, E.B.D.P.A.–, 2018. Sistema Brasileiro de classificação de solos, 5th ed.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 1978. Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Bol. Técnico, EMBRAPA/SNLCS 455.
- Everett, M.E., 2013. Near-surface applied geophysics. Cambridge University Press.
- Faria, A., 1995. Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D’Aliança-Alto Paraíso de Goiás. Universidade de Brasília.
- Foti, S., Hollender, F., Garofalo, F., Albarello, D., Asten, M., Bard, P.Y., Comina, C., Cornou, C., Cox, B., Di Giulio, G., Forbriger, T., Hayashi, K., Lunedei, E., Martin, A., Mercerat, D., Ohrnberger, M., Poggi, V., Renalier, F., Sicilia, D., Socco, V., 2018. Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project, *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0206-7>
- Franco, H. de A., 1996. Geofísica e Química aquática aplicadas ao estudo da contaminação de recursos hídricos subterrâneos no aterro do Jockey Club. Universidade de Brasília.
- Freitas-Silva, F.H., Campos J.E.G., 1998. Geologia do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. SEMARH, 1, 1–86.
- Frid, V., Israel, N., 2017. Leachate detection via statistical analysis of electrical resistivity and induced polarization data at a waste disposal site. *Environ. Earth Sci.* 76, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6554-4>
- Gaël, D., Tanguy, R., Nicolas, M., Frédéric, N., 2017. Assessment of multiple geophysical techniques for the characterization of municipal waste deposit sites. *J. Appl. Geophys.* 145, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.013>
- Guedes, V.J.C.B., de Oliveira Lima, V.B., Borges, W.R., da Cunha, L.S., 2020. Comparison of the geoelectric signature with different electrode arrays at the jockey club landfill of Brasília. *Rev. Bras. Geofis.* 38, 1–12. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v38i1.2034>
- Guireli, L., Muselli, A., Luiz, V., Pedro, J., Pereira, S., Coaracy, O., Gandolfo, B., Alberto, C., 2020. Application of invasive and non-invasive methods of geo-environmental investigation for determination of the contamination behavior by organic compounds. *J. Appl. Geophys.* 178, 104049. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104049>
- Hagedoorn, J.C., 1959. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophys. Prospect.* 7, 158–182.
- Hayashi, K., 2008. Development of the Surface-wave Methods and Its Application to Site Investigations.
- Hayashi, K., Takahashi, T., 2001. High resolution seismic refraction method using surface and borehole data for site characterization of rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38, 807–813.
- Hornweg, D., Bhada-tata, P., 2012. WHAT A WASTE: A Global Review of Solid Waste Management, 12th ed. World Bank, Washington, DC - USA.
- Houston, W.N., Houston, S., Liu, J.W., Elsayed, A., e Sanders, C.O., 1995. In-situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills, 54th ed, In Geotechnical Special Publication. ASCE.
- Kassab, M.A., Weller, A., 2015. Study on P-wave and S-wave velocity in dry and wet

- sandstones of Tushka region, Egypt. *Egypt. J. Pet.* 24, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.02.001>
- Kearey, P., Brooks, I.M., 2009. *Geofísica de exploração*, 2nd ed. Oficina de Textos.
- Kearey, P., Brooks, I.M., Hill, I., 2009. *Geofísica de exploração*. Oficina de Textos.
- Konstantaki, L.A., Ghose, R., Draganov, D., Diaferia, G., Heimovaara, T., 2015a. Characterization of a heterogeneous landfill using seismic and electrical resistivity data. *Geophysics* 80, EN13–EN25. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0263.1>
- Konstantaki, L.A., Ghose, R., Draganov, D., Diaferia, G., Heimovaara, T., 2015b. Characterization of a heterogeneous landfill using seismic and electrical resistivity data. *Geophysics* 80, EN13–EN25. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0263.1>
- Konstantaki, L.A., Ghose, R., Draganov, D., Heimovaara, T., 2016. Wet and gassy zones in a municipal landfill from P- and S-wave velocity fields. *Geophysics* 81, EN75–EN86. <https://doi.org/10.1190/GEO2015-0581.1>
- Leung, T.M., Win, M.A., Walker, C.S., Whiteley, R.J., 2015. A flexible algorithm for seismic refraction interpretation using program REFRAC. *Geol. Soc. London, Eng. Geol. Spec. Publ.* 12, 399–406.
- Loke, M.H., 2004. Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys By 29–31.
- Loke, M.H., Barkert, R.D., 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics* 60, 1682–1690.
- Martins, E.S., 1998. *Sistemas pedológicos do Distrito Federal. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. IEMA/SEMATEC/UnB 1, 139–163.
- Martins, E.S., Baptista, G.M.M., 1998. *Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. IEMA/SEMATEC/UnB 1, 53.
- Martorana, R., Capizzi, P., Alessandro, A.D., Luzio, D., 2017. Comparison of different sets of array configurations for multichannel 2D ERT acquisition. *J. Appl. Geophys.* 137, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.12.012>
- Martorana, R., Fiandaca, G., Ponsati, A.C., Cosentino, P.L., 2008. Comparative tests on different multi-electrode arrays using models in near-surface geophysics. *J. Geophys. Eng.* 6. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/001>
- Matasovic, N., Asce, M., Jr, E.K., Asce, M., 2006. Seismic Response of a Composite Landfill Cover 132, 448–455. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132)
- Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J., 2010. *Cambridge Books Online*. *Choice Rev. Online* 48, 48-1788-48–1788. <https://doi.org/10.5860/choice.48-1788>
- Meju, M.A., 2000. Geoelectrical investigation of old r abandoned , covered landfill sites in urban areas : model development with a genetic diagnosis approach. *J. Appl. Geophys.* 44, 115–150.
- Milsom, J., 2003. *Field geophysics*, 3rd ed. John Wiley e Sons Ltd.
- Moreira, C.A., Lapola, M.M., Carrara, A., 2016. Comparative analyzes among electrical resistivity tomography arrays in the characterization of flow structure in free aquifer. *Geofísica Int.* 55, 119–129.
- Moser, T.J., 1991. Shortest path calculation of seismic rays. *Geophysics* 56, 59–67.
- Nisiyama, F.L., 2019. *FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA EM ÁREAS CONTAMINADAS - CASO DE ESTUDO: ATERRO CONTROLADO DO JÓQUEI CLUBE DE BRASÍLIA/DF*. Universidade de Brasília.
- Novaes Pinto, M., 1994. *Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*, 2nd ed.
- Optim LLC, 2006. *User s Manual SeisOpt 2D - Version 5.0*.
- Osella, A., Lascano, E., 2002. Characterization of a Contaminant Plume Due to a Hydrocarbon Spill Using Geoelectrical Methods. *J. Environ. Eng. Geophys.* 7, 78–87.

- Paixão Filho, J.L., Miguel, M., 2017. Long-Term Characterization of Landfill Leachate: Impacts of the Tropical Climate on its Composition. *Am. J. Environ. Sci.* <https://doi.org/10.3844/ajessp.2017.116.127>
- Palmer, D., 2001. An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. *Geophysics* 46, 1508–1518.
- Park, C.B., Miller, R.D., 2008. Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW). *J. Environ. Eng. Geophys.* 13, 1–11.
- Park, C.B., Miller, R.D., 1997. Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW). *Lead. Edge* 26, 60–64.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64, 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., Survey, K.G., 1998. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *SEG Tech. Progr. Expand. Abstr.* 1998. *Soc. Explor. Geophys.* 1377–1380.
- Pereira, J.H.F., Pastore, E.L., Bernardes, R.S., Souza, N.M., Carvalho, J., 1997. Estudos Geológico-Geotécnicos para o Planejamento e Projeto de Disposição de Resíduos Urbanos do Aterro de Lixo do Jóquei. Relatório Final - Univ. Brasília - DF 4, 17.
- Prado, R.L., Mendes, R.M., 2012. APPLICATION OF MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES METHOD (MASW) *Data acquisition* 30, 213–224.
- Reatto, A., Éder, de souza M., Marcus, F.R.F., Angelo, V. da S., Osmar, A. de C.J., 2004. Mapa Pedológico Digital - SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo. *EMBRAPA/SNLCS* 1, 29.
- Reynolds, J.M., 2011. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley e Sons.
- Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Lindsjo, M., Mansson, C., Johansson, S., 2011. Mapping landfill gas migration using resistivity monitoring. *Proc. Inst. Civ. Eng. Resour. Manag.* 164, 3–15. <https://doi.org/10.1680/warm.2011.164.1.3>
- Sandmeier, J., 2020. REFLEXW.
- Santos, P.C., 2004. ESTUDO DA DEGRADAÇÃO E DOS RECALQUES EM CÉLULAS EXPERIMENTAIS DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO ATERRO DO JOCKEY CLUB/DF. Universidade de Brasília.
- Santos, P.C.V., 1996. Estudo da contaminação de água subterrânea por percolado de aterro de resíduos sólidos - Caso Jockey Club - DF.
- Sasaki, Y., 1992. RESOLUTION OF RESISTIVITY TOMOGRAPHY INFERRED FROM NUMERICAL SIMULATION'. *Geophys. Prospect.* 40,453-463, 40, 453–463.
- Sharma, S., Jaiswal, P., Raj, R., Atekwana, E.A., 2021. In-situ biofilm detection in field settings using multichannel seismic Biofilm Inversion. *J. Appl. Geophys.* 193, 104423. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104423>
- Sheriff, R.E., Geldart, L.P., 1995. *Exploration Seismology, Problems in Exploration Seismology and their Solutions.* Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139168359>
- Silvester, P.P., Ferrari, R.L., 1996. *Finite elements for electrical engineers.* Cambridge university press.
- SLU, S.D.L.U.D.D.F.-S., 2016. Relatório sobre a situação de emergência no âmbito da limpeza urbana jóquei (23.05 a 29.11.15).
- Soupios, P., Papadopoulos, N., Papadopoulos, I., Kouli, M., Vallianatos, F., Sarris, A., Manios, T., 2007. Application of integrated methods in mapping waste disposal areas. *Environ. Geol.* 53, 661–675. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0681-2>
- Strobbia, C., 2003. *Surface Wave Methods Acquisition, processing and inversion.* POLITECNICO DI TORINO.
- Syifa, R.W., Sumardani, N.I., Dewi, N.A., 2020. Identification of Landfill Using Refraction Seismic Method in LIPI Area - Bandung. *Risenologi* 5, 26–37.

- <https://doi.org/10.47028/j.risenologi.2020.51.76>
- Syukri, M., Saad, R., Fadhli, Z., 2020. Capability of P- and S-wave seismic refraction in delineating the Blang Bintang Sanitary Landfill (TPA) ground subsurface. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 42, 780–787.
- Uhlemann, S., Hagedorn, S., Dashwood, B., Maurer, H., Gunn, D., Dijkstra, T., Chambers, J., 2016. Landslide characterization using P- and S-wave seismic refraction tomography — The importance of elastic moduli. *J. Appl. Geophys.* 134, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.08.014>
- Willmore, P.L., Bancroft, A.M., 1960. The Time Term Approach to Refraction Seismology. *Geophys. J. Int.* 3, 419–432.
- Wilson, G. V, 2017. High-frequency MASW method and its applications 5218–5222.
- Wongpornchai, P., Phatchaiyo, R., Srikoch, N., 2009. Seismic refraction tomography of Mae-Hia Landfill Sites, Mueang District, Chiang Mai. *World Acad Sci Eng Technol* 678–681.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Tian, G., 2003. Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes 52, 45–57.
- Xia, J., Xu, Y., Luo, Y., Richard, D.M., 2012. Advantages of Using Multichannel Analysis of Love Waves (MALW) to Estimate Near-Surface Shear-Wave Velocity. *Surv. Geophys.* 33, 841–860. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9174-2>
- Yilmaz, Ö., 2001. Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. Society of exploration geophysicists.
- ZEE, 2011. ZONEAMENTO ECOLÓGICO E ECONÔMICO DO DISTRITO FEDERAL.
- Zekkos, D., Bray, J.D., Kavazanjian, E., Matasovic, N., Rathje, E.M., Riemer, M.F., Stokoe, K.H., 2006. Unit Weight of Municipal Solid Waste. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 132, 1250–1261. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2006\)132:10\(1250\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:10(1250))
- Zekkos, D., Bray, J.D., Riemer, M.F., 2008. Shear modulus and material damping of municipal solid waste based on large-scale cyclic triaxial testing. *Can. Geotech. J.* 45, 45–58. <https://doi.org/10.1139/T07-069>
- Zekkos, D., Matasovic, N., El-Sherbiny, R., Athanasopoulos-Zekkos, A., Towhata, I., Maugeri, M., 2011. Dynamic Properties of Municipal Solid Waste 112–134. [https://doi.org/10.1061/41146\(395\)4](https://doi.org/10.1061/41146(395)4)
- Zekkos, D., Sahadewa, A., Woods, R.D., Stokoe, K.H., 2014. Development of Model for Shear-Wave Velocity of Municipal Solid Waste. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 140, 04013030. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001017](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001017)
- Zhang, S.X., Chan, L.S., Chen, C.Y., Dai, F.C., Shen, X.K., Zhong, H., 2003. Apparent phase velocities and fundamental-mode phase velocities of Rayleigh waves 23, 563–569. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(03\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(03)00069-1)
- Zhao, R., Anderson, N., Sun, J., 2020. Geophysical Investigation of a Solid Waste Disposal Site Using Integrated Electrical Resistivity Tomography and Multichannel Analyses of Surface Waves Methods. *J. Geosci. Environ. Prot.* 8, 55–69. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.83005>
- Zhou, W., Beck, B.F., Adams, A.L., 2002. Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environ. Geol.* 42, 922–928. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0594-z>
- Zonge, K., Wynn, J., Urquhart, S., 2005. Resistivity, induced polarization, and complex resistivity. *Near-surface Geophys.* 265–300.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os métodos sísmicos de refração e MASW e Eletrorresistividade se mostraram ferramentas úteis para a investigação de aterros, além de terem contribuído para delinear as camadas que compõem o ACJC, definir zonas úmidas e determinar parâmetros de resistência e competência dos materiais aterrados no ACJC. Combinados, os métodos são ferramentas de redundância de confirmação da espessura de camadas do ACJC e delimitação de zonas úmidas.

No capítulo 3, foram apresentados os fundamentos físico-matemáticos que envolvem os métodos geofísicos e os procedimentos de aquisição de dados, modelagem e inversão adotados. Foram apresentados os fundamentos básicos dos métodos sísmicos, como os diferentes tipos de onda e como elas se propagam em subsuperfície. Para o método de sísmica de refração, os princípios do método, as técnicas de aquisição de dados, o processamento e inversão dos dados baseado no algoritmo de inversão implementado no *software Seisimager/2D*. Para o método MASW, foi descrito o princípio das ondas de superfície como os conceitos de velocidade de grupo, velocidade de fase, fenômeno da dispersão e modos de propagação de ondas de superfície. Além disso, técnicas de aquisição de dados, processos de obtenção da curva de dispersão e de inversão implementados no *software Seisimager-SW*.

Foram apresentados também os fundamentos básicos do método da Eletrorresistividade como o processo de fluxo de corrente no solo, técnicas de aquisição de dados, descrição das características dos arranjos eletródicos utilizados no estudo e processo de inversão dos dados baseado no algoritmo do *software Res2DInv*.

A metodologia adotada foi aplicada em uma etapa de campo de aquisição dos dados e na confecção de dois artigos científicos de investigação geofísica do Aterro. O primeiro artigo utiliza diferentes arranjos eletródicos para o caminhamento elétrico e compara com informações diretas de furos de sondagem para determinar a combinação de arranjo WN-DD como o modelo mais representativo no ACJC. A partir dos imageamentos 2D obtidos com o arranjo WN-DD, foi realizada uma interpolação 3D da camada inferida como resíduos sólidos e estimado o volume de 23.340.429 m³ de resíduos aterrados com espessura de camadas de 30 a 65 metros de profundidade.

No segundo artigo produzido através da presente pesquisa, utilizaram-se o método da tomografia sísmica de refração para obter um perfil 2D de V_p e o método MASW para obter um perfil 1D de V_s . A razão V_p/V_s foi calculada para estimar parâmetros geotécnicos do maciço de resíduos, como a Razão de Poisson (ν), o Módulo de Young (E) e o Módulo de cisalhamento (G_0). Como resultado, foi possível observar uma camada úmida aproximadamente 15 m de profundidade, identificada pela diminuição do valor de V_s e aumento de V_p . Os valores dos parâmetros elásticos para a camada úmida de resíduos aterrados variaram de $\nu = 0,11$ a $0,4$, $G_0 = 15$ a 319 mPa e $E = 42$ a 901 mPa, que configuram um material pouco competente, de acordo com o que se espera do contexto de aterros sanitários.

Os objetivos propostos para o trabalho foram alcançados. Os fundamentos básicos de cada método utilizado foram apresentados em detalhes, os processos de modelagem e inversão dos dados e os resultados obtidos foram bons, o que confirma uma boa aquisição de dados em campo e a aplicação correta da técnica de processamento e inversão utilizada.

Com o intuito de refinar o modelo 3D de volume de resíduos obtidos pela interpolação das seções de imageamento elétrico, recomendam-se mais aquisições de eletrorresistividade de forma a melhor detalhar a subsuperfície do ACJC, a fim de incluir seções transversais e longitudinais que se cruzam por toda área de investigação, além de testar outros arranjos eletródicos como Polo-Dipolo e Múltiplo Gradiente. Nesse sentido, aconselha-se o adensamento de linhas de aquisição sísmica com o objetivo de integrar as análises do método em questão com as seções de eletrorresistividade de forma confiável e igualmente incluir na campanha de campo outros métodos consagrados na literatura para investigações de aterros sanitários, como Polarização Induzida no Domínio do Tempo (Donno and Cardarelli, 2017; Frid

and Israel, 2017; Zonge et al., 2005). devido ao forte efeito da Polarização induzida associada à massa dos resíduos sólidos.

O método de inversão utilizado para obter os perfis de velocidade pelos métodos sísmicos da refração e MASW apresenta etapas bastante dependentes de informações *a priori*, quantidade e espessura das camadas e densidade dos materiais. Nesse sentido, um maior adensamento da malha de sondagens no ACJC pode contribuir significativamente para a elaboração dos perfis de velocidade. Assim, os perfis de velocidade modelados pela inversão podem ser mais bem ajustados para uma dada camada e a máxima profundidade de investigação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab'Saber, A.N., 1964. As altas superfícies de aplainamento do Brasil sudeste. Rev. Fac. Campineiras 60–67.
- Abreu, A.E.S., Gandolfo, O.C., Vilar, O.M., 2016. Characterizing a Brazilian sanitary landfill using geophysical seismic techniques. Waste Manag. 53, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.048>
- Abreu, A. E.S., Gandolfo, O.C.B., Vilar, O.M., 2016. Characterizing a Brazilian sanitary landfill using geophysical seismic techniques. Waste Manag. 53, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.048>
- Abreu, A.E.S., Vilar, O.M., 2013. In-place msw unit weight measurement in são carlos. Fourteenth Int. Waste Manag. Landfill Symp.
- ÁGUA e TERRA, 2006. Estudos geotécnicos preliminares e caracterização dos limites da área do antigo aterro na região da Vila Estrutural – DF. Relatório Técnico, Brasília, DF 70.
- AL-Hameedawi, M.M., Thabit, J.M., 2017. Comparison between four electrode arrays in delineating sedimentary layers of alluvial fan deposits in eastern Iraq using a 2D imaging technique. Environ. Earth Sci. 76, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6853-9>
- Alam, M.I., Jaiswal, P., 2017. Near Surface Characterization Using V P /V S and Poisson's Ratio from Seismic Refractions. J. Environ. Eng. Geophys. 22, 101–109. <https://doi.org/10.2113/JEEG22.2.101>
- Alfaia, R.G. de S.M., Costa, A.M., Campos, J.C., 2017. Municipal solid waste in Brazil: A review. Waste Manag. Res. 35, 1195–1209. <https://doi.org/10.1177/0734242X17735375>
- Almeida, F.F., 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. Simpósio Geol. do Nord. 8, 391.
- Anbazhagan, P., Lakshmikanthan, P., 2016. Seismic characterization and dynamic site response of a municipal solid waste landfill in Bangalore , India. Waste Manag. Res. 34, 205–203. <https://doi.org/10.1177/0734242X15622814>
- Anbazhagan, P., Sivakumarbabu, G.L., Lakshmikanthan, P., Vivekanand, K.S., 2016. Seismic characterization and dynamic site response of a municipal solid waste landfill in Bangalore, India. Waste Manag. Res. 34, 205–213.

<https://doi.org/10.1177/0734242X15622814>

- Aranda, N., Prado, R.L., Elis, V.R., Gonçalves, M., Otávio, M., Conicelli, B., 2019a. Evaluating elastic wave velocities in Brazilian municipal solid waste. *Environ. Earth Sci.* 78, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8490-y>
- Aranda, N., Prado, R.L., Elis, V.R., Miguel, M.G., Gandolfo, O.C.B., Conicelli, B., 2019b. Evaluating elastic wave velocities in Brazilian municipal solid waste. *Environ. Earth Sci.* 78, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8490-y>
- Aristodemou, E., 2000. DC resistivity and induced polarisation investigations at a waste disposal site and its environments. *J. Appl. Geophys.* 44, 275–302.
- Aziz, N.A., Abdulrazzaq, Z.T., Agbasi, O.E., 2019. Mapping of subsurface contamination zone using 3D electrical resistivity imaging in Hilla city, Iraq. *Environ. Earth Sci.* 78, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8520-9>
- Bábek, O., Sedláček, J., Novák, A., & Létal, A., 2018. Electrical resistivity imaging of anastomosing river subsurface stratigraphy and possible controls of fluvial style change in a graben-like basin, Czech Republic. *Geomorphology*, 317, 139-156.
- Bacha, D. D. C. S., Santos, S., de Alcantara Mendes, R., da Silva Rocha, C. C., Corrêa, J. A., Cruz, J. C. R., ... & Oliva, P. A. C., 2021. Evaluation of the contamination of the soil and water of an open dump in the Amazon Region, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 80(3), 1-12
- Baechle, G.T., Eberli, G.P., Weger, R.J., Massaferro, J.L., 2009. Changes in dynamic shear moduli of carbonate rocks with fluid substitution. *Geophysics* 74. <https://doi.org/10.1190/1.3111063>
- Bergamo, P., Dashwood, B., Uhlemann, S., Swift, R., Chambers, J.E., Gunn, D.A., Donohue, S., 2016. Time-lapse monitoring of fluid-induced geophysical property variations within an unstable earthwork using P-wave refraction. *Geophysics* 81, EN17–EN27. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0276.1>
- Berge, P.A., Bertete-Aguirre, H., 2000. Laboratory Velocity Measurements Used For Recovering Soil Distributions From Field Seismic Data, in: 13th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. European Association of Geoscientists & Engineers, p. 662. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.200.2000_024
- Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T., Hogland, W., 2016. DC resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys. *Environ. Geol.* 39, 360–371. <https://doi.org/10.1007/s002540050015>
- Borges, W.R., 2007. Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Universidade de São Paulo.
- Campos, H.K.T., 2018. Como fechamos o segundo maior lixão do mundo. *Rev. Bras. Planej. e orçamento* 8, 204–253.
- Campos, J.E.G., 2004. Hidrogeologia do Distrito Federal : bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos hidrogeologia do distrito federal : bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Brazilian J. Geol.* 34, 41–48. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.20043414148>
- Campos, J.E.G., Dardenne, M.A., Freitas-Silva, F.H., Martins-Ferreira, M.A.C., 2013. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. *Brazilian J. Geol.* 43, 461–476. <https://doi.org/10.5327/Z2317-48892013000300004>

- Campos, J.E.G., Gaspar, M.T., Gonçalves, T., 2007. Gestão de recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal: diretrizes, legislação, critérios técnicos, sistema de informação geográfica e operacionalização. Técnico. Brasília, DF 158.
- Campos, J.E.G.; Borges, W.R.; Cicerelli, R.E.; Garnier, J.; Azevedo, J.H.; Dourado, F.F., 2021. Diagnóstico de contaminação e Proposta de Remediação do Antigo Lixão da Estrutural. Parceria GEF, MCTIC, PNUMA, CGEE, FINATEC. 5 Volumes + Apêndices. Disponível na Secretaria de Meio Ambiente do Governo do Distrito Federal - SEMA/GDF.
- Cardoso, M.R.D., Marcuzzo, F.F.N., Barros, J.R., 2014. Classificação climática de köppen-geiger para o estado de goiás e o distrito federal climatic classification of köppen-geiger for the state of Goiás and the Federal District 40–55. <https://doi.org/10.5654/actageo2014.0004.0016>
- Carey, P.J., Koragappa, N., Gurda, J.J., 1993. A case study of the Brookhaven Landfill, Long Island, New York. Proc. WasteTech '93, Mar. Del Rey, CA. Natl. Solid Waste Manag. Assoc. Washington, D.C..
- Carpenter, P.J., Calkin, S.F., Kaufmann, R.S., 1991. Assessing a fractured landfill cover using electrical resistivity and seismic refraction techniques. GEOPHYSICS 56, 1896–1904.
- Carpenter, P.J., Reddy, K.R., Thompson, M.D., 2013. Seismic Imaging of a Leachate-Recirculation Landfill: Spatial Changes in Dynamic Properties of Municipal Solid Waste. J. Hazardous, Toxic, Radioact. Waste 17, 331–341. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hz.2153-5515.0000175](https://doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000175)
- Castelli, F., Lentini, V., Maugeri, M., 2013. Stability Analysis of Landfills in Seismic Area 1226–1239. <https://doi.org/10.1061/9780784412787.124>
- Cavalcanti, M.M., Borges, W.R., Stollberg, R., Rocha, M.P., Soares, L., Seimetz, E.X., Nogueira, V., Ferreira, R., Olivera, R. De, 2014. Levantamento Geofísico (Eletrorresistividade) nos limites do Aterro Controlado do Jokey Club, Vila Estrutural, Brasília - DF 298–313.
- Choudhury, D., Savoikar, P., 2009. Simplified method to characterize municipal solid waste properties under seismic conditions. Waste Manag. 29, 924–933. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.05.008>
- Claerbout, J.F., Muir, F., 1973. Robust modeling with erratic data. Geophysics 38, 826–844.
- Clayton, C.R.I., 2011. Stiffness at small strain: Research and practice. Geotechnique 61, 5–37. <https://doi.org/10.1680/geot.2011.61.1.5>
- Clément, R., Descloitres, M., Günther, T., Oxarango, L., Morra, C., Laurent, J., Gourc, J., 2010. Improvement of electrical resistivity tomography for leachate injection monitoring. Waste Manag. 30, 452–464. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.002>
- Cossu, R., Di Maio, R., Fais, S., Fraghi, a, Ligas, P., Menghini, a, 2005. Physical and structural characterisation of an old landfill site by a multimethodological geophysical approach. 10th Int. Waste Manag. Landfill Symp. (Sardinia 2005) 1–8.
- Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. Comput. Geosci. 27, 1019–1029.
- Dahlin, T., 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. J. Appl. Geophys. 38, 237–249.
- Dahlin, T., Bernstone, C., Ohlsson, T., Hogland, W., 2000. DC-resistivity mapping of internal landfill structures : two pre-excitation surveys. Environ. Geol. 39, 360–371.

- Dahlin, T., Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophys. Prospect.* 52, 379–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x>
- Dardenne, M.A., Fonseca, M.A., Uhlein, A., 1995. Faixa Brasília setor setentrional: estilos estruturais e arcabouço tectônico. *Rev. Bras. Geociências* 25, 267–278.
- De Iaco, R., Green, A.G., Maurer, H.R., Horstmeyer, H., 2003. A combined seismic reflection and refraction study of a landfill and its host sediments. *J. Appl. Geophys.* 52, 139–156. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00255-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00255-0)
- Del Greco, O., Fassino, A., Godioht, A., 2007. Seismic investigation for the assessment of the elastic settlement in MSW landfill. *Proc. Elev. Int. Waste Manag. Landfill Symp.* Cagliari, Italy.
- Diniz, S., Nisiyama, F.L., Maria, N., Guimarães, L., Ribeiro, F., Camargo, D.T., Vasconcelos, G., Lacerda, C. De, Silva, S., Barros, F., Fleury, C., Esteves, E., Silva, D.A., Luís, A., Cavalcante, B., 2019. Estudo da acurácia posicional de dados geoespaciais obtidos com rpa mediante uso da metodologia proposta para verificação do padrão de exatidão cartográfica (PEC). *An. do XIX Simpósio Bras. Sensoriamento Remoto* 3397–3400.
- Dobrin, M.B., Savit, C.H., 1988. *Introduction to geophysical prospecting.* McGraw- Hill, Inc.
- Donno, G. De, Cardarelli, E., 2017. Tomographic inversion of time-domain resistivity and chargeability data for the investigation of landfills using a priori information. *Waste Manag.* 59, 302–315. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.020>
- Eeikmeier, C.N., 2018. Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW): um estudo comparativo com fontes ativas e passivas, ondas Rayleigh e Love e diferentes modos de propagação. Universidade de São Paulo.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2018. *Sistema Brasileiro de classificação de solos*, 5th ed.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 1978. *Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal.* Bol. Técnico, EMBRAPA/SNLCS 455.
- Everett, M.E., 2013. *Near-surface applied geophysics.* Cambridge University Press.
- Faria, A., 1995. *Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D’Aliança-Alto Paraíso de Goiás.* Universidade de Brasília.
- Foti, S., Hollender, F., Garofalo, F., Albarello, D., Asten, M., Bard, P.Y., Comina, C., Cornou, C., Cox, B., Di Giulio, G., Forbriger, T., Hayashi, K., Lunedei, E., Martin, A., Mercerat, D., Ohrnberger, M., Poggi, V., Renalier, F., Sicilia, D., Socco, V., 2018. Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project, *Bulletin of Earthquake Engineering.* <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0206-7>
- Franco, H. de A., 1996. *Geofísica e Química aquática aplicadas ao estudo da contaminação de recursos hídricos subterrâneos no aterro do Jockey Club.* Universidade de Brasília.
- Freitas-Silva, F.H., Campos J.E.G., 1998. *Geologia do Distrito Federal.* In: *Inventário Hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal.* SEMARH, 1, 1–86.
- Frid, V., Israel, N., 2017. Leachate detection via statistical analysis of electrical resistivity and induced polarization data at a waste disposal site. *Environ. Earth Sci.* 76, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6554-4>

- Gaël, D., Tanguy, R., Nicolas, M., Frédéric, N., 2017. Assessment of multiple geophysical techniques for the characterization of municipal waste deposit sites. *J. Appl. Geophys.* 145, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.013>
- Gallas, J. D. F., 2000. Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 174.
- Gandolfo, O. C. B.; Gallas, J. D. F., 2005. 3D electroresistivity - A preliminary evaluation of the techniques. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23, 2, 191–198.
- Granja-Bruña, J. L., Turu, V., Carrasco, R. M., Muñoz-Martín, A., Ros, X., Fernández-Lozano, J., ... & Pedraza, J., 2021. Geophysical characterization of the El Cervunal kame complex (Sierra de Gredos, Iberian Central System): Insight of infill geometry and reconstruction of former glacial formations. *Journal of Applied Geophysics*, 195.
- Guedes, V.J.C.B., de Oliveira Lima, V.B., Borges, W.R., da Cunha, L.S., 2020. Comparison of the geoelectric signature with different electrode arrays at the jockey club landfill of Brasília. *Rev. Bras. Geofis.* 38, 1–12. <https://doi.org/10.22564/rbge.v38i1.2034>
- Guireli, L., Muselli, A., Luiz, V., Pedro, J., Pereira, S., Coaracy, O., Gandolfo, B., Alberto, C., 2020. Application of invasive and non-invasive methods of geo-environmental investigation for determination of the contamination behavior by organic compounds. *J. Appl. Geophys.* 178, 104049. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104049>
- Hagedoorn, J.C., 1959. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophys. Prospect.* 7, 158–182.
- Hayashi, K., 2008. Development of the Surface-wave Methods and Its Application to Site Investigations.
- Hayashi, K., Takahashi, T., 2001. High resolution seismic refraction method using surface and borehole data for site characterization of rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38, 807–813.
- Helene, L. P. I., & Moreira, C. A., 2018. Geofísica aplicada no monitoramento de aquífero fraturado contaminado por chorume. *Águas Subterrâneas*.
- Heber, F., & Silva, E. M. D., 2014. Institucionalização da política nacional de resíduos sólidos: Dilemas e constrangimentos na região metropolitana de Aracaju (SE). *Revista de Administração Pública*, 48(4), 913-937.
- Hoorweg, D., Bhada-tata, P., 2012. WHAT A WASTE: A Global Review of Solid Waste Management, 12th ed. World Bank, Washington, DC - USA.
- Houston, W.N., Houston, S., Liu, J.W., Elsayed, A., & Sanders, C.O., 1995. In-situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills, 54th ed, In *Geotechnical Special Publication*. ASCE.
- Kassab, M.A., Weller, A., 2015. Study on P-wave and S-wave velocity in dry and wet sandstones of Tushka region, Egypt. *Egypt. J. Pet.* 24, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.02.001>
- Kearey, P., Brooks, I.M., 2009. *Geofísica de exploração*, 2nd ed. Oficina de Textos.
- Kearey, P., Brooks, I.M., Hill, I., 2009. *Geofísica de exploração*. Oficina de Textos.
- Konstantaki, L.A., Ghose, R., Draganov, D., Diaferia, G., Heimovaara, T., 2015a. Characterization of a heterogeneous landfill using seismic and electrical resistivity data. *Geophysics* 80, EN13–EN25. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0263.1>

- Konstantaki, L.A., Ghose, R., Draganov, D., Diaferia, G., Heimovaara, T., 2015b. Characterization of a heterogeneous landfill using seismic and electrical resistivity data. *Geophysics* 80, EN13–EN25. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0263.1>
- Konstantaki, L.A., Ghose, R., Draganov, D., Heimovaara, T., 2016. Wet and gassy zones in a municipal landfill from P- and S-wave velocity fields. *Geophysics* 81, EN75–EN86. <https://doi.org/10.1190/GEO2015-0581.1>
- Lanz, E., Maurer, H., Green, A. G., 1998. Refraction tomography over a buried waste disposal site. *Geophysics*, 63(4), 1414-1433.
- Leung, T.M., Win, M.A., Walker, C.S., Whiteley, R.J., 2015. A flexible algorithm for seismic refraction interpretation using program REFRACT. *Geol. Soc. London, Eng. Geol. Spec. Publ.* 12, 399–406.
- Loke, M.H., 2004. Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys By 29–31.
- Loke, M.H., Barkert, R.D., 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics* 60, 1682–1690.
- Maiello, A., Britto, A. L. N. D. P., Valle, T. F., 2018. Implementação da política nacional de resíduos sólidos. *Revista de Administração Pública*, 52, 24-51.
- Martins, E.S., 1998. Sistemas pedológicos do Distrito Federal. *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. IEMA/SEMATEC/UnB 1*, 139–163.
- Martins, E.S., Baptista, G.M.M., 1998. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. IEMA/SEMATEC/UnB 1*, 53.
- Martorana, R., Capizzi, P., Alessandro, A.D., Luzio, D., 2017. Comparison of different sets of array configurations for multichannel 2D ERT acquisition. *J. Appl. Geophys.* 137, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.12.012>
- Martorana, R., Fiandaca, G., Ponsati, A.C., Cosentino, P.L., 2008. Comparative tests on different multi-electrode arrays using models in near-surface geophysics. *J. Geophys. Eng.* 6. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/001>
- Matasovic, N., Asce, M., Jr, E.K., Asce, M., 2006. Seismic Response of a Composite Landfill Cover 132, 448–455. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132)
- Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J., 2010. Cambridge Books Online. *Choice Rev. Online* 48, 48-1788-48–1788. <https://doi.org/10.5860/choice.48-1788>
- Meju, M.A., 2000. Geoelectrical investigation of old r abandoned , covered landfill sites in urban areas : model development with a genetic diagnosis approach. *J. Appl. Geophys.* 44, 115–150.
- Milsom, J., 2003. *Field geophysics*, 3rd ed. John Wiley & Sons Ltd.
- Moreira, C.A., Lapola, M.M., Carrara, A., 2016. Comparative analyzes among electrical resistivity tomography arrays in the characterization of flow structure in free aquifer. *Geofísica Int.* 55, 119–129.
- Moser, T.J., 1991. Shortest path calculation of seismic rays. *Geophysics* 56, 59–67.
- Nimer, E., 1989. *Climatologia do brasil*. IBGE.
- Nisiyama, F.L., 2019. Ferramenta computacional para avaliação de risco à saúde humana em áreas contaminadas - caso de estudo: aterro controlado do jôquei clube de

Brasília/DF. Universidade de Brasília.

- Novaes Pinto, M., 1994. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas, 2nd ed.
- Odia, M., Nwaogazie, I. L., Avwiri, G. O., Nwachukwu, E. O., 2021. Developing Resistivity Contouring and Plume Mapping of Landfill Leachate Using Electrical Resistivity Method in Warri Metropolis. *New Ideas Concerning Science and Technology*. 6, 55-67.
- Optim LLC, 2006. User's Manual SeisOpt 2D - Version 5.0.
- Osella, A., Lascano, E., 2002. Characterization of a Contaminant Plume Due to a Hydrocarbon Spill Using Geoelectrical Methods. *J. Environ. Eng. Geophys.* 7, 78–87.
- Paixão Filho, J.L., Miguel, M., 2017. Long-Term Characterization of Landfill Leachate: Impacts of the Tropical Climate on its Composition. *Am. J. Environ. Sci.* <https://doi.org/10.3844/ajessp.2017.116.127>
- Palmer, D., 2001. An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. *Geophysics* 46, 1508–1518.
- Park, C.B., Miller, R.D., 2008. Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW). *J. Environ. Eng. Geophys.* 13, 1–11.
- Park, C.B., Miller, R.D., 1997. Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW). *Lead. Edge* 26, 60–64.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64, 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., Survey, K.G., 1998. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *SEG Tech. Progr. Expand. Abstr.* 1998. *Soc. Explor. Geophys.* 1377–1380.
- Pereira, J.H.F., Pastore, E.L., Bernardes, R.S., Souza, N.M., Carvalho, J., 1997. Estudos Geológico-Geotécnicos para o Planejamento e Projeto de Disposição de Resíduos Urbanos do Aterro de Lixo do Jóquei. Relatório Final - Univ. Brasília - DF 4, 17.
- Prado, R.L., Mendes, R.M., 2012. Application of multichannel analysis of surface waves method (MASW) Data acquisition 30, 213–224.
- Reatto, A., Éder, de Souza M., Marcus, F.R.F., Angelo, V. da S., Osmar, A. de C.J., 2004. Mapa Pedológico Digital - SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo. EMBRAPA/SNLCS 1, 29.
- Reynolds, J.M., 2011. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons.
- Rosqvist, H., Leroux, V., Dahlin, T., Svensson, M., Lindsjö, M., Mansson, C., Johansson, S., 2011. Mapping landfill gas migration using resistivity monitoring. *Proc. Inst. Civ. Eng. Resour. Manag.* 164, 3–15. <https://doi.org/10.1680/warm.2011.164.1.3>
- Sandmeier, J., 2020. REFLEXW.
- Santos, P.C., 2004. Estudo da degradação e dos recalques em células experimentais de resíduos sólidos no aterro do Jockey Club/DF. Universidade de Brasília.
- Santos, P.C.V., 1996. Estudo da contaminação de água subterrânea por percolado de aterro de resíduos sólidos - Caso Jockey Club - DF.
- Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophys. Prospect.* 40, 453–463, 40, 453–463.

- Sharma, S., Jaiswal, P., Raj, R., Atekwana, E.A., 2021. In-situ biofilm detection in field settings using multichannel seismic Biofilm Inversion. *J. Appl. Geophys.* 193, 104423. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104423>
- Sheriff, R.E., Geldart, L.P., 1995. *Exploration Seismology, Problems in Exploration Seismology and their Solutions*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139168359>
- Silvester, P.P., Ferrari, R.L., 1996. *Finite elements for electrical engineers*. Cambridge university press.
- SISTEMA DE LIMPEZA URBANA DO DISTRITO FEDERAL - SLU, 2016. Relatório sobre a situação de emergência no âmbito da limpeza urbana jóquei (23.05 a 29.11.15).
- Soupios, P., Papadopoulos, N., Papadopoulos, I., Kouli, M., Vallianatos, F., Sarris, A., Manios, T., 2007. Application of integrated methods in mapping waste disposal areas. *Environ. Geol.* 53, 661–675. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0681-2>
- Strobbia, C., 2003. *Surface Wave Methods Acquisition, processing and inversion*. Politecnico di Torino.
- Syifa, R.W., Sumardani, N.I., Dewi, N.A., 2020. Identification of Landfill Using Refraction Seismic Method in LIPI Area - Bandung. *Risenologi* 5, 26–37. <https://doi.org/10.47028/j.risenologi.2020.51.76>
- Syukri, M., Saad, R., Fadhli, Z., 2020. Capability of P- and S-wave seismic refraction in delineating the Blang Bintang Sanitary Landfill (TPA) ground subsurface. *Songklanakarín J. Sci. Technol.* 42, 780–787.
- Uhlemann, S., Hagedorn, S., Dashwood, B., Maurer, H., Gunn, D., Dijkstra, T., Chambers, J., 2016. Landslide characterization using P- and S-wave seismic refraction tomography — The importance of elastic moduli. *J. Appl. Geophys.* 134, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.08.014>
- Willmore, P.L., Bancroft, A.M., 1960. The Time Term Approach to Refraction Seismology. *Geophys. J. Int.* 3, 419–432.
- Wilson, G. V., 2017. High-frequency MASW method and its applications 5218–5222.
- Wongpornchai, P., Phatchaiyo, R., Srikoch, N., 2009. Seismic refraction tomography of Mae-Hia Landfill Sites, Mueang District, Chiang Mai. *World Acad Sci Eng Technol* 678–681.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Tian, G., 2003. Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes 52, 45–57.
- Xia, J., Xu, Y., Luo, Y., Richard, D.M., 2012. Advantages of Using Multichannel Analysis of Love Waves (MALW) to Estimate Near-Surface Shear-Wave Velocity. *Surv. Geophys.* 33, 841–860. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9174-2>
- Xiao, Z., Wang, Q., Zhou, G., & Yu, J., 2017. Aliasing detection and reduction scheme on angularly undersampled light fields. *IEEE Transactions on Image Processing*, 26(5), 2103-2115.
- Yilmaz, Ö., 2001. *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Society of exploration geophysicists.
- Zanta, V. M., & Ferreira, C. F. A., 2003. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos. AB de Castilho Júnior (Coordenador), *Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte*. São Carlos, SP: Rima Artes e Textos.
- ZEE, 2011. ZONEAMENTO ECOLÓGICO E ECONÔMICO DO DISTRITO FEDERAL.

- Zekkos, D., Bray, J.D., Kavazanjian, E., Matasovic, N., Rathje, E.M., Riemer, M.F., Stokoe, K.H., 2006. Unit Weight of Municipal Solid Waste. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 132, 1250–1261. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2006\)132:10\(1250\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:10(1250))
- Zekkos, D., Bray, J.D., Riemer, M.F., 2008. Shear modulus and material damping of municipal solid waste based on large-scale cyclic triaxial testing. *Can. Geotech. J.* 45, 45–58. <https://doi.org/10.1139/T07-069>
- Zekkos, D., Matasovic, N., El-Sherbiny, R., Athanasopoulos-Zekkos, A., Towhata, I., Mauerer, M., 2011. Dynamic Properties of Municipal Solid Waste 112–134. [https://doi.org/10.1061/41146\(395\)4](https://doi.org/10.1061/41146(395)4)
- Zekkos, D., Sahadewa, A., Woods, R.D., Stokoe, K.H., 2014. Development of Model for Shear-Wave Velocity of Municipal Solid Waste. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 140, 04013030. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001017](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001017)
- Zhang, S.X., Chan, L.S., Chen, C.Y., Dai, F.C., Shen, X.K., Zhong, H., 2003. Apparent phase velocities and fundamental-mode phase velocities of Rayleigh waves 23, 563–569. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(03\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(03)00069-1)
- Zhao, R., Anderson, N., Sun, J., 2020. Geophysical Investigation of a Solid Waste Disposal Site Using Integrated Electrical Resistivity Tomography and Multichannel Analyses of Surface Waves Methods. *J. Geosci. Environ. Prot.* 8, 55–69. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.83005>
- Zhou, W., Beck, B.F., Adams, A.L., 2002. Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environ. Geol.* 42, 922–928. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0594-z>
- Zonge, K., Wynn, J., Urquhart, S., 2005. Resistivity, induced polarization, and complex resistivity. *Near-surface Geophys.* 265–300.