

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS  
ATMOSFÉRICAS

NATALY MARCELA ARANDA CAMACHO

**Estudo de parâmetros geomecânicos de uma célula  
experimental de resíduos sólidos urbanos com métodos  
geofísicos**

São Paulo  
2019



NATALY MARCELA ARANDA CAMACHO

**Estudo de parâmetros geomecânicos de uma célula  
experimental de resíduos sólidos urbanos com métodos  
geofísicos**

**Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.**

Tese apresentada ao Instituto de  
Astronomia, Geofísica e Ciências  
Atmosféricas da Universidade de São Paulo  
para a obtenção do título de Doutor em  
Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Vagner Roberto Elis.

Co-orientador: Prof. Dr. Renato Luiz Prado.

São Paulo

2019



## Agradecimentos

---

Inicialmente, agradeço ao Brasil, esse país maravilhoso que me proporcionou muitas coisas, onde vivi grandes experiências, aprendi uma nova língua e mergulhei em uma cultura surpreendente. Agradeço ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, por abrir as portas para me especializar como geofísica no mestrado e no doutorado. Agradeço ao CNPq pela bolsa concedida no meu doutorado e pelos recursos providos através do projeto 425971/2016-3.

Sou muito grata aos meus orientadores, Vagner Elis e Renato Prado, pela imensa confiança que depositaram em mim, por todos os seus ensinamentos ao longo do doutorado e sobre todo pela paciência e apoio incondicional nos momentos difíceis. Agradeço à professora Miriam Miguel da UNICAMP, por me permitir trabalhar na célula experimental e me guiar nos momentos que eu precisei. Agradeço ao Otavio Gandolfo do IPT pela disposição e ajuda nos trabalhos de campo.

Aos técnicos Marcelo Stangari e Ernande Costa pela realização do trabalho de campo, e a todos os que me colaboraram nas múltiplas saídas de campo que tivemos. A Mariane Alves pela ajuda com as análises de umidade no LABPRO - Laboratório de Protótipos - Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP.

Finalmente, agradeço imensamente com toda minha alma a minha família: a minha mãe, aos meus irmãos e a meus sobrinhos, que apesar de estar longe sempre estiveram torcendo por mim e me apoiando nesse longo caminho, a Vânia e a Bia que aguentaram meus momentos de estresse e sempre me apoiaram. E por último, mas não menos importante, ao Bruno, para quem não tenho como agradecer todo o apoio, as palavras de incentivo, as milhares de correções de português e sobretudo ao amor recebido ao longo desse caminho.



Os aterros sanitários no Brasil são caracterizados por seu alto conteúdo de material orgânico (próximo de 50%), presença de diferentes tipos de resíduos mistos e baixa compactação, fatores que os diferencia dos aterros de países desenvolvidos e de alta renda (que por sua vez são os mais estudados). Para evitar riscos ambientais tais como contaminação das águas subterrâneas e a instabilidade dos taludes, é crucial entender o comportamento dos aterros e as mudanças em suas propriedades físicas e mecânicas ao longo do tempo. Para isso, utilizando os métodos geofísicos de refração sísmica, análise multicanal de ondas superficiais ativa e passiva, ensaios crosshole, eletrorresistividade e polarização induzida, foram obtidos valores para algumas propriedades físicas como o peso específico e teor de umidade, e dos parâmetros elásticos como módulo cisalhamento, o coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e velocidades das ondas elásticas, dos resíduos sólidos urbanos em uma célula experimental e um lisímetro na cidade de Campinas no Estado de São Paulo. A velocidade de onda compressiva ( $V_p$ ) e a velocidade de onda cisalhante ( $V_s$ ) são parâmetros importantes para subsidiar a caracterização mecânica de aterros sanitários utilizando-se as propriedades elásticas e dinâmicas dos RSU para análise de estabilidade. Os resultados obtidos nos ensaios crosshole mostraram que a  $V_p$  variou de 217 até 252 m/s e  $V_s$  variou de 86 até 89 m/s. Estes valores baixos podem ser atribuídos ao alto teor de matéria orgânica (53 %), baixa energia de compactação e condições climáticas, como alto índice pluviométrico e altas temperaturas que, juntas, levam a mudanças na saturação dos poros e na poropressão. Estes valores são indicativos do limite inferior das velocidades correspondentes relatadas na maioria da literatura; no entanto, eles estão de acordo com os valores reportados para aterros localizados em países com condições socioeconômicas e climáticas semelhantes. Usando os métodos de eletrorresistividade junto com análises de umidade de amostras obtidas de dois furos na célula experimental, foi encontrada a correlação direta entre a resistividade elétrica e o teor de umidade volumétrico por meio da lei de Archie, onde os parâmetros  $a$  e  $m$  foram estimados. Fazendo uso da lei de Archie calculada, foram convertidas as tomografias de eletrorresistividade em tomografias de teor de umidade. Com uma análise conjunta do teor de umidade, tomografia de resistividades, polarização induzida e o balanço hídrico da célula experimental, foi possível entender a variação de umidade dentro da célula ao longo do tempo devido às condições climáticas.

**Palavras-chave:** *Aterro sanitário, parâmetros elásticos, peso específico, umidade, métodos sísmicos, métodos geoelétricos, lei de Archie.*

The sanitary landfills in Brazil have a high organic content (around 50%), a variety of mixed wastes, and low compaction energy. These characteristics are unusual in the well-studied landfills of developed countries. Improper landfill characterization may lead to groundwater contamination and slope instability. Therefore, it is crucial to understand the behaviour and physical properties of poorly characterized landfills to prevent environmental risks in Brazil. A geophysical survey was performed on the municipal solid waste (MSW) in an experimental cell and a lysimeter located in the city of Campinas, State of São Paulo. Geophysical methods such as seismic refraction, active and passive multichannel analysis of surface waves, crosshole test, electro resistivity and induced polarization were used to estimate physical and elastic parameters of the solid waste. The resulting estimates were unit weight, moisture content, shear modulus, Poisson's ratio, elastic modulus, and the elastic wave velocities. The compressive wave velocity ( $V_p$ ) and the shear wave velocity ( $V_s$ ) were used to characterize and derive the dynamic and elastic properties of the MSW, used to generate a stability analysis. The crosshole test showed that the  $V_p$  ranged from 217 to 252 m/s and the  $V_s$  ranged from 86 to 89 m/s. These low  $V_p$  and  $V_s$  values were attributed to the high content of organic material (53 %), low compaction energy, and climatic conditions such as high pluviometry index and high temperatures. All these variables directly affect the pore fluid saturation, effective stress, and pore pressure. The low velocities estimated at the MSW were consistent with values reported in the literature and landfills located in countries with analogous socioeconomic and climatic conditions. Two boreholes in the experimental cell were used to perform an electrical resistivity test and a moisture analysis. The direct correlation between the electrical resistivity results and the volumetric moisture content was estimated using Archie's law. The calculated Archie's law parameters allowed the estimation of the tomography moisture content from the resistivity tomography. The joint analysis of moisture content, resistivity tomography, induced polarization and water balance in the experimental cell made possible to understand the humidity variation within the cell over time due to climatic conditions.

**Keywords:** Sanitary landfill, elastic parameters, unit weight, moisture content, seismic methods, geoelectric methods, Archie's law.

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iii
Abstract .....	iv
Sumário .....	v
Lista de Figuras .....	viii
Lista de tabelas .....	xvi
Capítulo 1 - Introdução .....	1
Objetivos .....	4
Objetivo Principal .....	4
Objetivos específicos .....	4
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica .....	5
2.1. Resíduos Sólidos Urbanos .....	5
2.2. Projeto de Aterros Sanitários .....	7
2.3. Classificação de resíduos e caracterização .....	9
2.4. Chorume .....	12
2.4.1. Balanço hídrico .....	13
2.5. Características dos RSU .....	16
2.5.1. Parâmetros Elásticos nos RSU .....	17
2.5.2. Propriedades físicas .....	25
2.6. Métodos sísmicos em estudos de aterros sanitários e lixões .....	31
2.7. Métodos de Eletrorresistividade e Polarização induzida em estudos de aterros sanitários .....	37
Capítulo 3 – Métodos geofísicos aplicados .....	46
3.1. Métodos sísmicos .....	46
3.1.1. Ondas Sísmicas .....	47
3.1.2. Propriedades elásticas do meio .....	49
3.1.3. Componentes dos levantamentos sísmicos .....	53
3.1.4. Sísmica de Refração .....	55
3.1.5. Método MASW- Multichannel Analysis of Surface Waves .....	63
3.1.6. Métodos em furos de sondagem – Crosshole .....	71
3.2. Métodos Elétricos .....	74

3.2.1. Condutividade Elétrica em solos ou rochas .....	75
3.2.2. Eletrorresistividade .....	75
3.2.3. Polarização Induzida .....	78
3.2.4. Aplicação de eletrorresistividade e polarização induzida .....	84
<i>Sondagem Elétrica Vertical (SEV)</i> .....	85
<i>Caminhamento elétrico (CE)</i> .....	85
3.2.5. Equipamento de medida.....	87
3.2.6. Software RES2DINV.....	88
<i>Método de inversão Robusto</i> .....	91
Capítulo 4 - Material e métodos .....	92
4.1. Área de estudo.....	92
4.1.1. Célula experimental- aterro sanitário Delta A .....	93
4.1.2. Lisímetro .....	95
4.2. Ensaio realizados.....	97
4.2.1. Aquisições sísmicas .....	97
4.2.2. Aquisições geoeletricas .....	105
4.2.3. Perfurações e coleta de amostras.....	109
4.2.4. Teor de umidade.....	111
4.2.5. Balanço hídrico .....	112
Capítulo 5 – Resultados e discussões .....	115
5.1. Tomografia sísmica de refração .....	115
5.2. MASW – Multichannel Analysis of Surface waves.....	117
5.2.1. MASW ativa .....	118
5.2.2. MASW passiva .....	121
5.2.3. Combinando MASW passiva e ativa .....	123
5.3. Crosshole .....	125
5.4. Propagação de onda diretamente transmitida - Lisímetro.....	127
5.5. Velocidades de ondas P e S.....	129
5.6. Modelo empírico de velocidade de onda cisalhante .....	134
5.7. Propriedades elásticas da célula experimental .....	137
5.7.1. Peso específico .....	137
5.7.2. Parâmetros elásticos dinâmicos.....	140
5.8. Balanço hídrico na célula experimental .....	145
5.8.1. Balanço hídrico para a série de tempo de 1988 até 2008 em Campinas. ..	146

5.8.2. Balanço hídrico para os anos de 2015-2018 .....	149
5.9. Eletrorresistividade e polarização induzida .....	152
5.10. Lei de Archie e teor de umidade obtido de dados de resistividade.....	163
5.10.1. Correção de Resistividade das SEV nos furos 2, 5 e 7.....	163
5.10.2. Lei de Archie para os RSU da célula experimental .....	164
5.10.3. Conversão de tomografia elétrica para tomografia de umidade .....	167
5.11. Análises temporal do teor de umidade na célula experimental.....	168
Capítulo 6 – Conclusões.....	173
6.1 Velocidades $V_p$ e $V_s$ .....	173
6.2. Propriedades físicas e elásticas dos RSU .....	174
6.3. Eletrorresistividade, Polarização Induzida e Teor de Umidade.....	176
6.4. Sugestões .....	177
Referências .....	178
Anexo 1 – Teor de umidade das amostras .....	A
Anexo 2 – Dados das sondagens elétricas verticais .....	D

## Lista de Figuras

---

Figura 2.1: Componentes e projeto de um aterro sanitário. Adaptada de Worrell & Vesilind (2011). .....	8
Figura 2.2: Fluxograma para classificação de resíduos segundo a norma NBR-10004 (ABNT, 2004) .....	10
Figura 2.3: Esquema dos fatores que influenciam o balanço hídrico. Adaptada de Worrell & Vesilind (2011).....	14
Figura 2.4: Módulo de cisalhamento máximo a partir da curva de tensão. Adaptado de Jamiolkowski (2012) .....	19
Figura 2.5: Curva hiperbólica de tensão-deformação, o módulo de Young $E_i$ é a tangente inicial da curva.....	21
Figura 2.6: Perfil de coeficiente de Poisson obtido por (Matasovic & Kavazanjian, 1998) para o aterro OII em Califórnia.....	23
Figura 2.7: Perfil de peso específico para RSU obtido por (Kavazanjian, 1999). .....	26
Figura 2.8: Perfil de peso específico proposto por Zekkos et al. (2006). .....	27
Figura 2.9: Relação entre o peso específico ( $\gamma$ ) e a velocidade de onda S ( $V_s$ ) do estudo de (Choudhury & Savoikar, 2009) com base no banco de dados dos aterros, e para os valores de $V_s$ obtidos no estudo de Konstantaki et al. (2015) usando três métodos sísmicos diferentes. O ajuste hiperbólico foi realizado para os dados dos quatro estudos. Figura adaptada de Konstantaki et al. (2015). .....	28
Figura 2.10: Perfil de $V_s$ obtido usando SASW no estudo de (Kavazanjian et al., 1996).....	34
Figura 2.11: Modelo empírico e semi-empírico para velocidade $V_s$ para RSU proposto por Zekkos et al. (2014). .....	36
Figura 2.12: Resultado de Tomografia de resistividade elétrica obtida por Genelle et al. (2011). a) Resistividade aparente medida (arranjo dipolo-dipolo). b) Modelo de inversão robusta de resistividade. $C_1$ e $C_2$ representam as duas fissuras detectadas....	43
Figura 2.13: Teor de umidade gravimétrico dentro do aterro sanitário Mont-Saint-Guibert. O valor de umidade foi calculado da tomografia de resistividade elétrica e dos valores de temperatura e densidade medidos (Dumont et al., 2016). .....	45
Figura 2.14: Relação entre resistividade elétrica e teor de umidade volumétrico obtido por Feng et al., (2017) comparado com os resultados obtidos por outros autores (Grellier et al., 2007; Dumont et al. 2016) .....	45

Figura 3.1: Movimento de partículas associada à passagem de ondas de corpo.....	47
Figura 3.2: Movimento das partículas associado a passagem de ondas superficiais (A) Ondas Rayleigh (B) Ondas Love. Adaptado de Kearey et al. (2009). .....	48
Figura 3.3: Dispersão geométrica de ondas superficiais. A) Decaimento de amplitude do modo fundamental em diferentes comprimentos de onda. B) Curva de dispersão no domínio comprimento de onda – velocidade da fase. C) Curva de dispersão no domínio frequência - velocidade da fase. Adaptada de Foti et al.(2018). .....	49
Figura 3.4: Curva Tensão-Deformação de um corpo sólido, adaptado do Kearey et al. (2009). .....	50
Figura 3.5: Os módulos elásticos. (a) Módulo de Young; (b) Módulo de compressibilidade; (c) Módulo de rigidez; (d) Coeficiente de Poisson. Adaptado de Kearey et al. (2009). ....	51
Figura 3.6: Seção transversal do geofone de bobina móvel vertical, adaptado de Kearey et al. (2009). .....	54
Figura 3.7: Refração de ondas para um modelo de duas camadas (Kearey et al., 2009). .....	56
Figura 3.8: Refração de ondas para modelo com camada inclinada, A) Geometria da trajetória, B) curvas tempo x distancia, C) modelo de duas camadas sendo a última inclinada (Kearey et al., 2009). .....	57
Figura 3.9: Conceito de tempo de atraso (Adaptada de Kearey et al., 2009).....	57
Figura 3.10: Modelo de interpretação mais-menos para uma camada. (a) Trajetória de raio refratado a partir de cada extremidade até um detector em uma posição intermediária e (b) Curvas tempo x distância nas direções direta e reversa. (Adaptada de Kearey et al. 2009). .....	59
Figura 3.11: Exemplos de modelos iniciais usados pelo software Rayfract na TSR. Acima usando o método Delta-t-V, embaixo usando o método "smoth inversion". Figura adaptada de Seehan et al. (2005).....	60
Figura 3.12: Esquema mostrando a abordagem do volume Fresnel, adaptado de (Watanabe, et al., 1999) .....	61
Figura 3.13: Equipamento necessário para levantamento de sísmica de refração. A) Fonte: Marreta de 8 kg. B) Geofone de uma componente (vertical). C) Sismógrafo multicanal. ....	62
Figura 3.14: Esquema de arranjo linear de aquisição para MASW ativa. ....	65
Figura 3.15: Arranjos usados nas aquisições de MASW passiva. Adaptado de Foti et al. (2018). .....	67

Figura 3.16: Passo a passo do processamento do método MASW, extraído de Park et al., (2007). .....	68
Figura 3.17: Esquema representativo do ensaio crosshole em furos de sondagem. ....	72
Figura 3.18: Fluxo de corrente de um único eletrodo na superfície, adaptado de Kearey , et al., (2009). .....	76
Figura 3.19: Esquema generalizado de configuração de eletrodos para levantamentos de eletrorresistividade. Adaptado Braga, (1999). .....	77
Figura 3.20: Polarização de eletrodo. (A) Fluxo eletrolítico sem restrições em um canal aberto. (B) Polarização do grão eletronicamente condutor, bloqueando o canal. Modificado de Reynolds (2011). .....	79
Figura 3.21: Polarização de membrana. (A) Devido a obstrução dos poros. (B) Devido às cargas negativas das partículas de argila. Modificado de Reynolds, (2011). .....	81
Figura 3.22: (A) Aplicação do pulso de corrente com polaridade alternada e a medição de voltagem mostrando o efeito de sobrevoltagem ( $V_p$ ). (B) As duas formas de medir a sobrevoltagem, por discretização do tempo $V(t_n)$ e pela área sob a curva (A). (Reynolds, 2011). .....	83
Figura 3.23: Ao incrementar o tempo de carga (a- c), decresce a frequência de medida e o efeito de sobrevoltagem aumenta. Resultando em aumento de resistividade. Modificado de Reynolds (2011). .....	83
Figura 3.24: Esquema de caminhamento elétrico utilizando o arranjo dipolo-dipolo. Adaptado de Elis (1998). .....	86
Figura 3.25: Arranjos de eletrodos mais usados com a respectiva constante geométrica (K) e resistividade aparente ( $\rho_a$ ). .....	87
Figura 3.26: Resistímetro marca Iris, modelo Syscal R1. ....	88
Figura 3.27: Disposição dos blocos utilizados no modelo em conjunto com os dados obtidos na pseudoseção usado no programa RES2DINV adaptado de (Loke, 2004). .....	89
Figura 4.1: Comportamento da chuva e da temperatura ao longo de um ano na região de Campinas-SP. Os valores foram calculados a partir de uma série de dados de 20 anos no período de junho/1988 a outubro/2008. Obtido do CEPAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. ....	92
Figura 4.2: Localização da célula experimental no aterro sanitário Delta A. ....	93
Figura 4.3: Vista superior do lisímetro L1 e dimensões do lisímetro L1 (Favery et al., 2016). ....	96

Figura 4.4: Localização dos ensaios sísmicos realizados na célula experimental. L1 para a tomografia sísmica de refração, L2 para o MASW com fonte ativa, L3 para o MASW com fonte passiva e CH1 e CH2 os dois conjuntos de furos onde foi realizado o crosshole..	98
Figura 4.5: Aquisição de TSR na célula experimental.....	100
Figura 4.6: Localização dos geofones em linha de aquisição circular para MASW com fonte passiva. ....	101
Figura 4.7: Passos para o processamento de dados de MASW usando o programa SurfSeis5. ....	102
Figura 4.8: Aquisição de teste crosshole realizado na célula experimental no CH-2.....	103
Figura 4.9: A) Dimensões e esquematização do lisímetro adaptado de Favery et al. (2016). B) Esboço da aquisição de onda direta usado no lisímetro.....	104
Figura 4.10: Aquisição de propagação de onda direta no lisímetro L1. A) Onda sendo gerada na parede do lado 1 do lisímetro. B) Drenagem do lisímetro. C) Onda sendo gerada na parede do lado 2 do lisímetro. ....	105
Figura 4.11: Aquisição de caminhamento elétrico na célula experimental.....	107
Figura 4.12: Localização das linhas de aquisição do caminhamento elétrico.....	107
Figura 4.13: SEV realizada na célula experimental na posição do furo 2. ....	108
Figura 4.14: Passos para a instalação dos furos usando a perfuratriz oca “Hollow steam auger” .....	110
Figura 4.15: Fotografia da amostragem do furo 2 na célula experimental no Aterro Delta A. Na esquerda penetração.....	111
Figura 4.16: Pesagem das amostras e separação para secagem no forno. ....	112
Figura 5.1: Exemplo de sismograma obtido da aquisição de sísmica de refração. As cruces vermelhas são as primeiras chegadas escolhidas no software Rayfract <sup>®</sup> . Os tempos de chegada da onda P são maiores do que os tempos de chegada das ondas aéreas (reconhecido pela sua maior frequência e menor amplitude), como pode ser notado pelos traços ampliados (identificados pela elipse).....	115
Figura 5.2: Modelo de Vp obtido com tomografia de refração na célula experimental (linha de aquisição L1).....	116
Figura 5.3: Densidade de raios do modelo tomográfico.....	117
Figura 5.4: (A) Imagem de dispersão combinadas para os tiros dados depois do arranjo, (B) para os tiros dados antes do arranjo, e (C) a combinação das imagens dos tiros dados antes e depois do arranjo. ....	119

Figura 5.5: Perfil de velocidades obtido da inversão das curvas de dispersão para tiros antes e depois do arranjo. ....	120
Figura 5.6: Resultados da inversão da curva de dispersão obtida do empilhamento das imagens de dispersão dos tiros dados a $\pm 6$ m e $\pm 8$ m com fonte ativa. ....	121
Figura 5.7: Imagem e curva de dispersão obtidas da soma das melhores imagens de dispersão adquiridas usando fonte passiva. ....	122
Figura 5.8: Perfil de Velocidade $V_s$ obtido usando MASW passiva com arranjo circular. ....	122
Figura 5.9: Imagens de dispersão obtidas de aquisições MASW passiva (topo), ativa (médio) e a combinação das duas imagens (embaixo). ....	124
Figura 5.10: Perfil de velocidade $V_s$ obtido da combinação de MASW passiva e ativa na célula experimental junto com o perfil obtido das análises por separado. ....	125
Figura 5.11: Exemplo de sismograma obtido do ensaio crosshole. ....	126
Figura 5.12: Perfis de velocidades de onda compressiva $V_p$ (acima) e cisalhante $V_s$ (embaixo), obtidas do crosshole nos dois conjuntos de furos CH <sub>1</sub> e CH <sub>2</sub> da célula experimental Delta A. ....	127
Figura 5.13: Sismograma obtido na camada de resíduos para tiros dados no lado 1 sem drenagem de chorume (ondas pretas) e para tiros dados no lado 2 drenados (ondas azuis). Registrados os traços 1 e 2 a uma profundidade de 1,08 m; traços 3 e 4, a uma profundidade de 1,28 m; vestígios 5 e 6, a uma profundidade de 1,48 m; e os traços 7 e 8, a uma profundidade de 1,68 m. ....	128
Figura 5.14: Perfil de velocidade para o lisímetro obtido dos tiros no lado 1 sem drenar (triângulo) e no lado 2 após drenar o chorume (ponto). A área sem cor representa a camada de resíduos sólidos, a área em rosa representa a camada de solo e a área em cinza representa a camada de cascalho. O campo ampliado mostra o perfil de velocidade da onda P para a camada de resíduos sólidos, com base nos dados obtidos disparando nos dois lados do lisímetro. ....	129
Figura 5.15: Perfis e rango de velocidades $V_p$ e $V_s$ dos RSU estudados, obtidos com os diferentes métodos sísmicos. ....	130
Figura 5.16: Comparação de velocidades onda P desse estudo com estudos desenvolvidos em áreas com condições climáticas e socioeconômicas similares. ....	133
Figura 5.17: Comparação de velocidades de onda S desse estudo com estudos desenvolvidos em áreas com condições climáticas e socioeconômicas similares. ....	134

Figura 5.18: Modelo empírico de Vs versus profundidade usando parâmetros obtidos para ajuste de dados da célula experimental, do aterro sanitário São Carlos - Abreu (2015) e o proposto por Zekkos et al. (2013). .....	137
Figura 5.19: Relação entre o peso específico e a velocidade da onda S dos estudos de Choudhury e Savoikar (2009) e Konstantaki (2016), obtidos com os métodos MASW-onda Love, MASW- onda Rayleigh, e reflexão de onda S. A marca de diamante indica o valor proveniente dos dados de crosshole obtidos para a célula experimental neste estudo. ....	138
Figura 5.20: Perfis de peso específico recomendados para aterros sanitários municipais por (Zekkos, et al., 2006) para diferentes esforço de compactação e quantidade de cobertura do solo. Comparação com os dados de peso específico obtidos para os RSU dispostos no antigo aterro Delta embaixo da célula experimental, usando a relação empírica de Choudhury e Savoikar (2009) e as velocidades Vs obtidas com MASW.....	140
Figura 5.21: Variação dos parâmetros elásticos dinâmicos com a profundidade, na célula experimental. Os parâmetros foram calculados com os dados de Vp e Vs obtidos do crosshole e densidade de 627 Kg/m <sup>3</sup> .....	141
Figura 5.22: Comparação dos valores de módulo de cisalhamento dinâmico de outros aterros e esse estudo. ....	143
Figura 5.23: Comparação dos valores de coeficiente de Poisson de outros aterros e esse estudo. ....	144
Figura 5.24: Comparação dos valores de módulo de compressibilidade de outros aterros e esse estudo. ....	144
Figura 5.25: Declividades na célula experimental. Taludes com declividade maior a 7% e área plana da célula com declividade < 7% .....	146
Figura 5.26: Valores anuais de evapotranspiração potencial, precipitação e temperatura para a célula experimental.....	146
Figura 5.27: Gráfico de evapotranspiração, escoamento, recarga e precipitação dos taludes e da parte plana da célula experimental.....	148
Figura 5.28: Porcentagens de escoamento, evapotranspiração e recarga para os taludes e a parte plana da célula experimental.....	148
Figura 5.29: Balanço hídrico para a célula experimental. ....	149
Figura 5.30: Valores de evapotranspiração potencial, precipitação e temperatura para a célula experimental no período compreendido entre 2015 e 2018. As datas selecionadas indicam os meses em que foram realizadas as aquisições de eletrorresistividade. ....	150

Figura 5.31: Porcentagens de escoamento, evapotranspiração e recarga para a célula experimental no período estudado compreendido entre julho de 2015 e dezembro de 2018. As datas selecionadas indicam os meses em que foram realizadas as aquisições de eletrorresistividade. ....	151
Figura 5.32: Balanço hídrico para a célula experimental no período de 2015-2018. As setas indicam os meses em que foram realizadas as aquisições de eletrorresistividade. As datas selecionadas indicam os meses em que foram realizadas as aquisições de eletrorresistividade. ....	151
Figura 5.33: Modelos de Resistividade e cargabilidade usando inversão suave de dados para a linha de aquisição C1. ....	152
Figura 5.34: Modelo de Resistividade e Cargabilidade para a linha de aquisição C1 usando inversão robusta de dados. No modelo de resistividade está marcada com linha pontilhada preta a base da célula experimental e no modelo de cargabilidade é marcado o bolsão de chorume no médio da célula com um círculo preto.....	153
Figura 5.35: Comparação perfis de resistividade Linhas C1-C4. ....	154
Figura 5.36: Comparação perfis de cargabilidade Linhas C1-C4.....	157
Figura 5.37: Interpretação da SEV obtida no furo 2.....	158
Figura 5.38: Interpretação da SEV 2 obtida no furo 5.....	159
Figura 5.39: Interpretação SEV 3 obtida no furo 7 no antigo aterro sanitário Delta A. ....	160
Figura 5.40: Perfis de resistividade obtidas a partir das SEV 1,2 e 3 feitas nos furos 2, 5 e 7 respectivamente. ....	161
Figura 5.41: Variação da resistividade com a umidade volumétrica obtida das amostras dos furos 2 e 5.....	164
Figura 5.42: Correlação entre a resistividade elétrica determinada por SEV e a umidade volumétrica das amostras coletadas nos furos 2 e 5 da célula experimental no aterro Delta A. Cada um com o respectivo ajuste de dados com a função potencial. ....	165
Figura 5.43: Comparação entre o conteúdo de umidade gravimétrico ( $W_w$ ) medido e o calculado com a lei de Archie e resistividade em relação à profundidade para os furos 2 e 5. ....	166
Figura 5.44: Comparação entre a lei de Archie obtida nesse estudo para a célula experimental e outros estudos. ....	167
Figura 5.45: Tomografia de umidade gravimétrica $W_w$ (%) obtida da conversão das tomografias de resistividade usando a lei de Archie. Linha azul tracejada representa a geomembrana impermeável da base da célula experimental. ....	169

**Figura 5.46: Tomografias de teor de umidade gravimétrico para a célula experimental ao longo do tempo. Os quadrados são a divisão por áreas usada para comparar o conteúdo de umidade por época. A área A<sub>1</sub> está localizada entre 30-60 m de posição lateral e entre 625-630 m de elevação, a área A<sub>2</sub> está localizada entre 60-90 m de posição lateral e entre 625-630 m de elevação, a área A<sub>3</sub> está localizada entre 20-90 m de posição lateral e entre 630-633 m de elevação. ....171**

**Figura 5.47: Variação de umidade gravimétrica ao longo do tempo nas áreas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> e na área total AT e recarga entre cada aquisição. .... 172**

## Lista de tabelas

---

Tabela 1-1: Algumas técnicas para medição de algumas propriedades e parâmetros dos resíduos sólidos urbanos. Adaptada de Matasovic et al. (2011). .....	3
Tabela 2-1: Quantidade de municípios por tipo de disposição final adotada para o ano 2017 em comparação com o 2016, adaptada de ABRELP (2017). .....	7
Tabela 2-2: Tipos de classificação de Resíduos e parâmetros usados para diferenciação. Adaptada de Dixon, et al., (2011) .....	11
Tabela 2-3: Características do lixiviado de aterros sanitários. COD: demanda química de oxigênio, BOD: demanda bioquímica de oxigênio e TOC: carbono orgânico total. Adaptada de Tchobanoglous et al. (1993). .....	13
Tabela 2-4: Coeficientes de escoamento para vários tipos de solos com inclinação diferente. Adaptada de Worrell & Vesilind (2011). .....	15
Tabela 2-5: Capacidades de campo de alguns solos e resíduos sólidos. Adaptado de Fenn et al. (1975). .....	16
Tabela 2-6: Efeito de diferentes critérios no módulo de cisalhamento, adaptada de Zekkos et al. (2011) .....	19
Tabela 2-7: Estimativa do módulo de Young tangente inicial $E_i$ realizada por (Singh, 2008) do estudo dele e de outros estudos publicados na literatura. ....	21
Tabela 2-8: Parâmetros elásticos $E$ e $\nu$ para constituintes de RSU. (Singh et al., 2007) .....	22
Tabela 2-9: Valores de parâmetros elásticos obtidas em alguns aterros sanitários do mundo usando as velocidades $V_p$ e $V_s$ e a densidade .....	24
Tabela 2-10: Valores dos parâmetros de ajuste do modelo hiperbólico de peso específico proposto por Zekkos et al. (2006) para diferentes tipos de cobertura e esforço de compactação. ....	27
Tabela 2-11: Compilação de umidades de RSU determinadas em diferentes pesquisas, adaptada de Abreu (2015). .....	31
Tabela 2-12: Estudos de mapeamento e monitoramento de áreas contaminadas usando métodos de eletrorresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP) no Brasil. Adaptada e atualizada do trabalho de Bortolin & Malagutti Filho (2010). ....	41
Tabela 4-1: Composição gravimétrica da célula experimental reagrupadas por categorias para análise comparativa Miguel et al. (2016). ....	95

Tabela 4-2: Características do lisímetro depois de preenchido, adaptado de Favery et al, (2016).....	97
Tabela 4-3: Informações das aquisições sísmicas realizadas. ....	98
Tabela 4-4: Informações das aquisições geoeletricas realizadas. ....	105
Tabela 4-5: Datas das linhas de aquisição de eletrorresistividade e polarização induzida..	108
Tabela 5-1: Idades dos resíduos nas datas em que foram realizadas as aquisições sísmicas na célula experimental e no lisímetro. ....	131
Tabela 5-2: Parâmetros de ajuste médios obtidos para dados de campo in situ. As velocidades $V_s$ para a célula experimental foram obtidos usando MASW. O estudo de Abreu (2015) é para o aterro sanitário São Carlos -SP.....	136
Tabela 5-3: Peso específico e massa específica obtidas usando a relação empírica de Choudhury e Savoikar (2009) para os RSU do antigo aterro sanitário Delta A (resíduos embaixo da célula experimental) usando as velocidades $V_s$ obtidas do MASW. ....	139
Tabela 5-4: Valores das propriedades elásticas obtidas para a célula experimental (até 5 m de profundidade), para o antigo aterro sanitário (de 5 a 16 m de profundidade). ....	142
Tabela 5-5: Valores das variáveis do balanço hídrico obtido para os taludes e a parte plana da célula experimental. ....	149
Tabela 5-6: Umidade gravimétrica ( $W$ ) e umidade volumétrica ( $\theta$ ) obtida nas amostras dos furos perfurados 2,5 e 7 da célula experimental no aterro Delta A. ....	162
Tabela 5-7: Dados de temperatura das amostras a diferentes profundidades medidas em campo, resistividade medida com SEV e resistividade corrigida usando a equação ( 5.6 ), para os furos 2 e 5 na célula experimental. ....	164
Tabela 5-8: Valor da recarga hidráulica entre as datas de aquisições de ER e média de umidade gravimétrica $W_w$ para cada uma das áreas estudadas e a área total AT das tomografias de Umidade gravimétrica. ....	170

## Capítulo 1 - Introdução

Mundialmente os aterros sanitários são o principal método de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), mas a composição dos resíduos difere de país para país, dependendo de seus indicadores de desenvolvimento econômico e humano. Países com renda baixa e média produzem mais resíduos orgânicos do que países com alta renda. Esses, por sua vez, produzem mais resíduos como papel do que os países de baixa renda (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012). No Brasil, os resíduos orgânicos representam aproximadamente 52% do total de resíduos produzidos, o dobro do lixo orgânico produzido nos Estados Unidos, que representa apenas 25% do total de resíduos (Kaza et al., 2018).

Devido à alta e crescente quantidade de aterros sanitários construídos no Brasil, é crucial entender o comportamento dos aterros ao longo do tempo para priorizar o uso de técnicas que previnam os riscos ambientais e geotécnicos causados pela má gestão de resíduos, como a contaminação da água subterrânea e a instabilidade de taludes. A necessidade de aumentar a capacidade dos aterros sanitários nas regiões mais populosas do país, devido à redução do número de novos locais, levou a um aumento às alturas dos aterros, exigindo uma avaliação confiável da vulnerabilidade do declive dos taludes, que não é tarefa trivial, considerando as propriedades reológicas desses materiais heterogêneos.

Uma dificuldade enfrentada pelos profissionais que trabalham com os RSU, é que as propriedades mecânicas dos resíduos são fortemente influenciadas pela composição, grau de degradação e compactação dos resíduos, entre outros fatores. Tem-se tentado estabelecer técnicas para obter essas propriedades por meio de ensaios de laboratório, porém esses ensaios possuem limitações, já que a composição altamente heterogênea dos resíduos dificulta a obtenção de amostras representativas. Por esta razão resulta quase que impossível reproduzir com precisão as condições do aterro sanitário nos ensaios de laboratório como considerado por Benatti et al. (2013) e dessa forma, estudos de parâmetros geomecânicos desenvolvidos em laboratórios podem dar resultados não representativos (Yegian et al., 1998).

Os métodos *in situ* são preferidos, já que permitem realizar medidas das propriedades atuais do conjunto completo e não de uma pequena amostra como feito no laboratório. Os métodos geofísicos se mostram como ferramentas interessantes e funcionais nos estudos geotécnicos de aterros sanitários pois permitem estudar grandes volumes de RSU *in situ* e fornecem informações da distribuição de alguma propriedade física ou parâmetros mecânicos na subsuperfície que podem estar ligadas à observação direta. Essa observação indireta não mostra a realidade da subsuperfície, mas fornece um modelo do subsolo, e permite uma interpretação da distribuição dos parâmetros físicos medidos (Pomposiello et al., 2012).

Devido à relação entre as propriedades elásticas e as velocidades das ondas elásticas, os métodos sísmicos se tornaram uma ferramenta útil para subsidiar a caracterização geotécnica dos aterros sanitários. Métodos sísmicos como refração, ensaio crosshole e análise multicanal de ondas de superfície são usados para obter a velocidade da onda de compressão ( $V_p$ ) e a velocidade da onda de cisalhamento ( $V_s$ ), bem como o módulo de cisalhamento ( $G$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), e módulo de Young ( $E$ ). Propriedades como o módulo de cisalhamento e velocidade da onda de cisalhamento são essenciais para análise de resposta sísmica em áreas com alta sismicidade ou aquelas sujeitas a cargas dinâmicas que podem causar deslizamentos de terra (Sharma et al. 1990; Choudhury e Savoikar, 2009; Greenwood et al. 2015; Sahadewa et al. 2015). Parâmetros como o módulo de Young e a razão de Poisson são usadas em análises de engenharia estática para quantificar a resposta de um material a uma mudança no estado de tensões (Kavazanjian 2003; Dixon et al. 2005; Matasovic et al. 2011). O emprego de métodos sísmicos para subsidiar a avaliação dos parâmetros mecânicos dos aterros sanitários supera as limitações dos ensaios de laboratório convencionais quanto à falta de representatividade das amostras devido à significativa variação espacial dos materiais usualmente observados nos aterros sanitários.

Por outro lado, os métodos geoeletricos são uns dos métodos geofísicos mais usados nos estudos de RSU, já que as propriedades elétricas estão fortemente relacionadas ao teor de água, salinidade e porosidade, características muito fortes e variáveis nos RSU devido à sua heterogeneidade e à formação de bolsões de chorume. Os métodos geoeletricos são usados para caracterizar a composição e a estrutura dos aterros. Novos estudos tentam a partir da resistividade obter o teor de umidade do corpo de resíduos.

O uso de métodos geofísicos chega a ser preferido no geral devido ao fato destes métodos serem mais econômicos, menos invasivos e muito mais rápidos do que os métodos de investigação direta. Matasovic et al. (2011) faz um resumo das técnicas usadas para medir as diferentes propriedades nos aterros sanitários, apresentadas na Tabela 1-1. Nesta tabela estão relacionadas algumas técnicas geofísicas *in situ* para medir as propriedades físicas e mecânicas que serão usadas neste projeto.

O volume geralmente grande de matéria orgânica dos aterros sanitários no Brasil, quando degradados, gera um volume considerável de gases e fluidos (agravados pelas condições climáticas, como alta pluviosidade e altas temperaturas), que desempenham papel fundamental na estabilidade dos aterros sanitários. Além disso, testes *in situ* e laboratoriais para avaliação da resistência ao cisalhamento e compressibilidade não são comumente empregados no Brasil. Os escassos dados das velocidades das ondas P e S para resíduos sólidos urbanos (RSU) em áreas de clima subtropical em países em desenvolvimento, como o Brasil, inspiraram este estudo. Os parâmetros elásticos, quando se busca a caracterização mecânica de aterros sanitários, são muito importantes, mas são pouco estudados em regiões caracterizadas por alto teor de matéria orgânica, baixa compactação e condições climáticas úmidas. Porém, o uso de perfis das diferentes propriedades dos RSU, obtidos para aterros com características diferentes, não são adequados e devem ser considerados com atenção.

*Tabela 1-1: Algumas técnicas para medição de algumas propriedades e parâmetros dos resíduos sólidos urbanos. Adaptada de Matasovic et al. (2011).*

Técnica	Aplicação
<b>Velocidade de propagação de ondas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de propagação de onda elástica (direta).</li> <li>• Tensão de rigidez (indireta)</li> <li>• Módulo de Poisson (direta)</li> <li>• Tensão de amortecimento (indireta)</li> <li>• Estratigrafia (indireta)</li> <li>• Variabilidade espacial/temporal (direta)</li> </ul>
<b>Resistividade Elétrica e condutividade</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teor de umidade (indireta)</li> <li>• Composição dos resíduos (indireta)</li> </ul>

Neste estudo são usados diferentes métodos geofísicos no mesmo local, o que é raramente registrado na literatura técnica, trazendo informações complementares das diferentes propriedades físicas e mecânicas dos RSU. Serão usados métodos geofísicos como sísmica de refração, crosshole, MASW (multichannel analysis of surface waves), eletrorresistividade e polarização induzida para avaliar algumas propriedades e parâmetros geotécnicos em uma célula experimental de RSU construída no aterro sanitário Delta A e em um lisímetro localizados em Campinas - SP.

## **OBJETIVOS**

### Objetivo Principal

Caracterizar alguns dos parâmetros e propriedades dos RSU necessários para análises geotécnicas, fazendo uso de métodos geofísicos como ferramenta principal para a obtenção dos parâmetros *in situ*. As propriedades e parâmetros que são avaliados nesse projeto são: módulo de cisalhamento máximo (G), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e o módulo de elasticidade (E), velocidade da onda cisalhante ( $V_s$ ) e velocidade da onda compressiva ( $V_p$ ), peso específico e teor de umidade.

### Objetivos específicos

- Caracterizar as velocidades  $V_p$  e  $V_s$  dentro da célula, usando métodos sísmicos como tomografia sísmica de refração, análise multicanal de ondas superficiais (MASW) e o ensaio crosshole sísmico.
- Com os perfis 2D de velocidades  $V_s$  e  $V_p$  obtidos, avaliar os parâmetros elásticos como: módulo de cisalhamento, módulo de Young e coeficiente de Poisson, da célula experimental.
- Analisar a relação entre o teor de umidade e a resistividade usando medições diretas de umidade e compará-las com os valores de resistividade por meio da lei de Archie.
- Mapear os constituintes da célula por meio de perfis 2D de resistividade e cargabilidade usando a técnica de caminhamento elétrico.
- Monitorar os valores de umidade dentro da célula usando a relação entre resistividade e umidade, junto com a análises de balanço hídrico da célula experimental.

## Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

### 2.1. Resíduos Sólidos Urbanos

Os resíduos sólidos segundo a lei federal 12.305 (Lei Nº 12.305, 2010) são: *“materiais, substâncias, objetos ou bens descartados resultantes de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”*.

Nesta tese de doutoramento, foram estudados os Resíduos sólidos urbanos (RSU), que são definidos como os resíduos sólidos gerados num aglomerado urbano, excetuados os resíduos industriais perigosos, hospitalares, sépticos e de aeroportos e portos (ABNT NBR 8419/ NB 843, 1996).

Os aterros sanitários são a forma de disposição final no solo de resíduos sólidos mais conhecida e usada mundialmente e é considerado uma das técnicas mais eficientes e seguras de destinação de resíduos sólidos, já que permite um controle eficiente e seguro do processo e quase sempre apresenta a melhor relação custo-benefício (Van Elk, 2007). Os aterros sanitários estão desenhados para receber vários tipos de resíduos, em diferentes quantidades, e são adaptáveis a qualquer tipo de comunidade independentemente do seu tamanho.

O aterro sanitário consiste no confinamento de resíduos sólidos na menor área e no menor volume possível, formando camadas superpostas com base em estudos de engenharia, para reduzir ao máximo os impactos causados ao meio ambiente e evitando danos à saúde pública. No Brasil, todo aterro sanitário deve ser realizado segundo as normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1996), a qual define os aterros sanitários de RSU através da NBR 8419, como:

*“Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Método esse que utiliza princípios de engenharia para*

*confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário”.*  
(ABNT NBR 8419/ NB 843, 1996)

Embora já existissem normas técnicas para a disposição de resíduos no Brasil, somente no dia 12 de agosto de 2010 que foi instituída a lei federal 12.305, também conhecida como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Nº 12.305, 2010), que se estabelece princípios e marcos importantes para fazer com que exista uma disposição correta dos resíduos gerados no Brasil. A Lei estabelece a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o uso energético como alternativas corretas para a disposição final e sendo que apenas o rejeito deve ser disposto em aterros sanitários.

Apesar de existir a Lei Nº 12.305 desde 2010, dados da ABRELP (2017) indicam que foram gerados um total anual de 78,4 milhões de toneladas de RSU no país em 2017, sendo que 42,3 milhões de toneladas de RSU, ou 59,1% do coletado, foram dispostos em aterros sanitários, o restante, que corresponde a 40,9% dos resíduos coletados, foi despejado em locais inadequados por 3.352 municípios brasileiros, totalizando mais 29 milhões de toneladas de resíduos em lixões ou aterros controlados, que não possuem os controles e as medidas necessárias para proteger ao meio ambiente contra danos e degradações, e que também podem causar danos à saúde pública. Isso revela que mesmo existindo a lei, as disposições de RSU ainda não é adequada na totalidade dos resíduos gerados no país. Porém, os aterros sanitários continuam sendo a disposição de RSU mais usada no país, como indicado na Tabela 2-1, e é de grande importância conhecer muito bem todos os processos e as propriedades que caracterizam os aterros sanitários de RSU no Brasil.

Tabela 2-1: Quantidade de municípios por tipo de disposição final adotada para o ano 2017 em comparação com o 2016, adaptada de ABRELP (2017).

DISPOSIÇÃO FINAL	BRASIL 2016	2017 - REGIÕES E BRASIL					
		NORTE	NORDESTE	CENTRO-OESTE	SUDESTE	SUL	BRASIL
Aterro Sanitário	2.239	90	449	159	817	703	2.218
Aterro Controlado	1.772	108	484	159	634	357	1.742
Lixão	1.559	252	861	149	217	131	1.610
<b>BRASIL</b>	<b>5.570</b>	<b>450</b>	<b>1.794</b>	<b>467</b>	<b>1.668</b>	<b>1.191</b>	<b>5.570</b>

## 2.2. Projeto de Aterros Sanitários

A construção e projeto de aterros sanitários devem incluir elementos que permitam o controle do lixiviado e dos gases, sendo que os principais componentes de um aterro são mostrados na Figura 2.1 e incluem: Revestimento de fundo, sistema de coleta de lixiviado, sistema de monitoramento de gases e a cobertura.

O sistema de revestimento de fundo ou “Liner” é muito importante pois impede a migração de chorume (lixiviado de RSU) do aterro e facilita a coleta de lixiviado. Esse sistema é composto de várias camadas, que podem ser naturais como argila ou solos argilosos ou podem ser sintéticas como as geomembranas que são de baixa permeabilidade e normalmente construídas com polímeros. Dependendo das legislações o sistema pode ser simples, composto ou duplo. O sistema simples é constituído por uma camada de revestimento, sendo a geomembrana ou a camada de argila. O sistema composto é constituído por duas camadas sendo a base de material argiloso e no topo a geomembrana. O sistema duplo é constituído de dois sistemas simples ou dois compostos (Worrell & Vesilind, 2011).

Cada revestimento é fornecido com um sistema de coleta de chorume. O sistema de recolha pode estar no meio dos dois revestimentos para fornecer a detecção de fugas do sistema. Uma série de tubos é colocado entre os revestimentos para coletar e monitorar

qualquer lixiviados que vaze através do forro de cobertura superior. O lixiviado geralmente é removido por dois meios: fluxo de gravidade ou bombeamento.

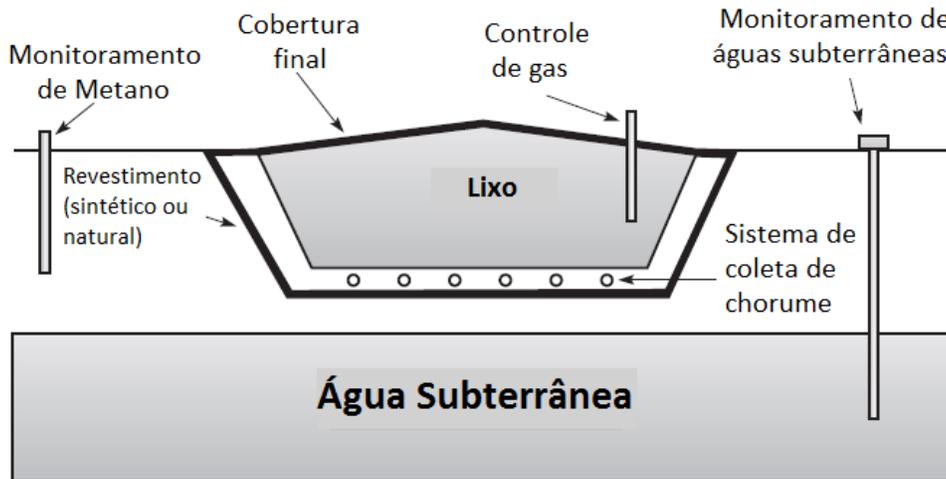


Figura 2.1: Componentes e projeto de um aterro sanitário. Adaptada de Worrell & Vesilind (2011).

O sistema de coleta de chorume inclui uma camada de drenagem eficiente composta de areia, cascalho ou material geossintético e tubos perfurados que são colocados inclinados em pontos baixos para coletar chorume e permitir que a umidade saia do aterro direcionando o lixiviado para pontos baixos na base do aterro (Worrell & Vesilind, 2011).

O gás gerado dentro de um aterro irá se mover por gradiente de pressão, seguindo caminhos de menor resistência. Se o gás não for controlado pode ser coletado em esgotos, tanques e bases, levando a consequências trágicas se ocorrerem explosões. Para evitar a migração de gás, é necessário um sistema de controle de gás por meio de orifícios ou poços de gás. Os sistemas de coleta de gás ativos são poços de coleta ligados a tubulações que extraem o gás por meio de sopradores centrais que criam pressão negativa na rede de tubulações e extraem o gás sob vácuo. (Worrell & Vesilind, 2011)

A cobertura final do aterro é outro elemento importante, já que ajuda a prevenir a infiltração da água de chuva ajudando a diminuir a quantidade de chorume produzido dentro do aterro. Uma vez que o aterro atinge a altura do projeto, é colocada a cobertura final, que consiste de várias camadas que de cima para baixo, e incluem: vegetação e

solo de suporte, uma camada de enchimento e drenagem, uma barreira hidráulica, uma fundação para a barreira hidráulica e uma camada de controle de gás (Worrell & Vesilind, 2011).

### **2.3. CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS E CARACTERIZAÇÃO**

No Brasil, a classificação de Resíduos Sólidos para que possam ser gerenciados adequadamente é feita pela norma brasileira NBR-10004 “Resíduos Sólidos – Classificação” (ABNT, 2004). Os resíduos são classificados em resíduos classe I e II quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente:

- Resíduos classe I – Perigosos
- Resíduos classe II – Não perigosos:
  - resíduos classe II A – Não inertes.
  - resíduos classe II B – Inertes.

Para realizar a classificação, a norma NBR-10004 (ABNT, 2004) propõe o uso do fluxograma apresentado na Figura 2.2.

De acordo com a norma NBR-10004 (ABNT, 2004), os resíduos são classificados e enviados a uma disposição final adequada à classe de resíduos.

As propriedades mecânicas dos aterros sanitários variam de acordo com o tipo de resíduos que contêm, já que os resíduos são heterogêneos e possuem propriedades físicas anisotrópicas. Isso devido à distribuição em camadas dos resíduos, portanto é fundamental caracterizar o tipo de resíduo aterrado. Porém, os RSU não podem ser classificados da mesma forma que são classificados os solos, já que os RSU são compressíveis e deformáveis, assim se decompõem com o tempo, o que faz difícil a sua caracterização. A caracterização do aterro depende do tempo de confinamento e do estado de estresse, fazendo com que também suas propriedades (físicas, químicas e geotécnicas) mudem ao longo do tempo (Dixon et al., 2011).

Existem vários sistemas de classificação de RSU nos aterros sanitários baseados em diferentes propriedades. Uma compilação realizada por Dixon et al. (2011) apresenta os diferentes tipos de classificação usada e os parâmetros utilizados para a classificação. A Tabela 2-2 sintetiza esses resultados, a saber:

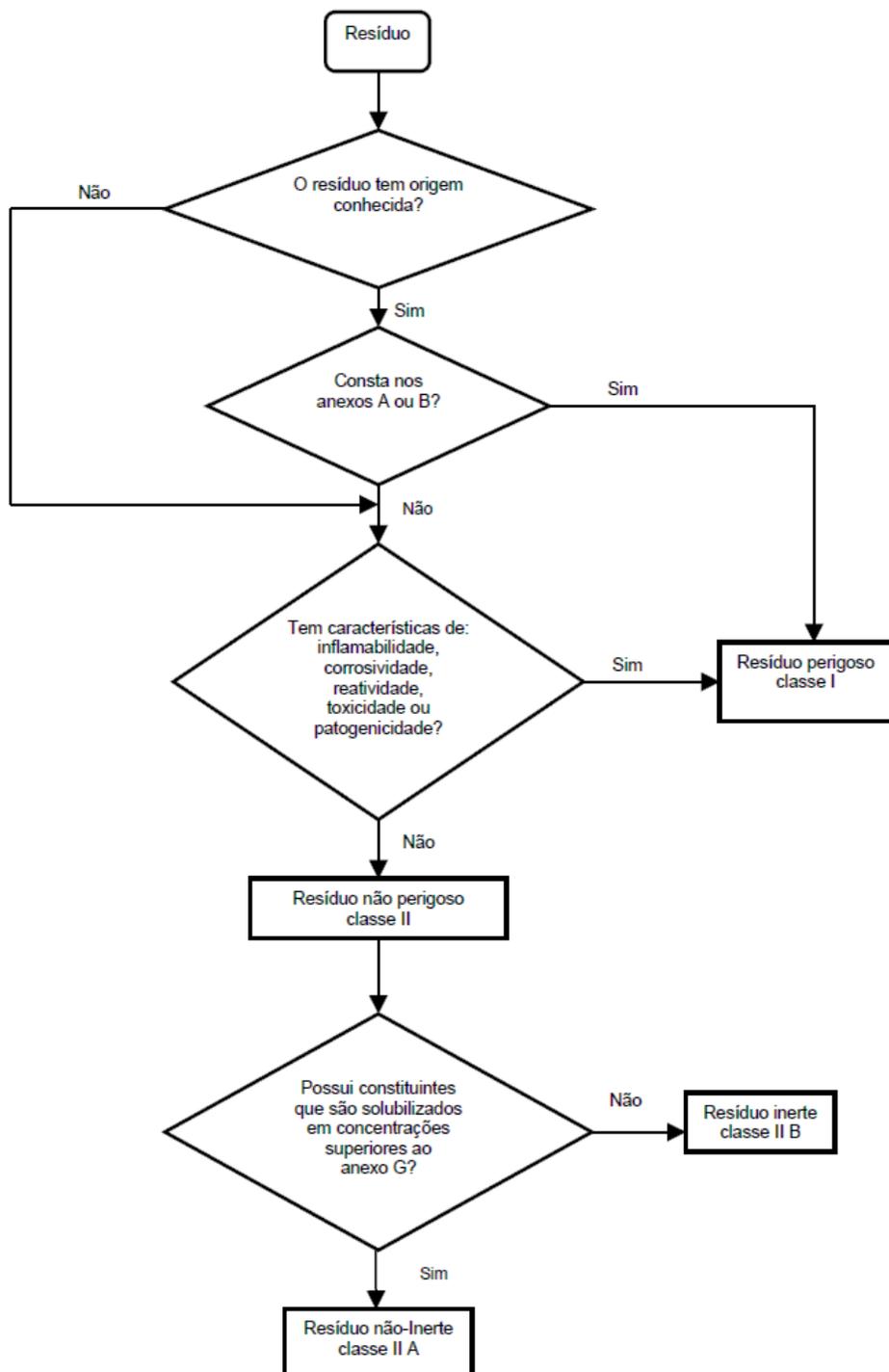


Figura 2.2: Fluxograma para classificação de resíduos segundo a norma NBR-10004 (ABNT, 2004)

Tabela 2-2: Tipos de classificação de Resíduos e parâmetros usados para diferenciação. Adaptada de Dixon, et al., (2011)

<b>Autor</b>	<b>Base para Diferenciação</b>	<b>Parâmetros usados para diferenciação</b>
Turczynski (1988)	Tipo de resíduo	Densidade, Parâmetros de cisalhamento, limite líquido/plástico, permeabilidade
Siegel et al. (1990)	Grupos de materiais	Parte da composição
Landva & Clark (1990)	Materiais orgânicos e inorgânicos	Degradabilidade (Facilmente, lentamente, sem), forma (oco, lamelar, alongado, volumoso)
ADEME (1993)	Distribuição de tamanho de partícula e composição	Tamanho, grupos de materiais, conteúdo de umidade e degradabilidade
Grisolia et al. (1995)	Grupos de materiais deformáveis, inertes e degradáveis.	Força, deformabilidade, degradabilidade
Kölsch (1996)	Grupos de materiais	Tamanho, dimensão
Manassero et al. (1997)	Solo semelhante (soil-like)	Propriedades de índice
Thomas et al. (1999)	Solo semelhante, solo não semelhante	Grupo de materiais
Dixon & Langer (2006)	Subdivisões relacionadas com a forma	Grupos de materiais, tamanho, dimensões, propriedades relacionadas com a forma, potencial de degradação.

As primeiras classificações de resíduos sanitários foram feitas dividindo os resíduos em degradáveis e não degradáveis. Em 1990, Landva et al. (1990) estenderam a classificação para materiais orgânicos e inorgânicos. Esses resíduos foram subdivididos e dentro dos orgânicos existem uma subdivisão entre resíduos putrescíveis e não putrescíveis e dentro dos inorgânicos como degradáveis e não degradáveis. Já em 1995 Grisolia et al. (1995) definiram três grupos de componentes: Classe A os inertes, Classe B os deformáveis e Classe C os biodegradáveis, e a classificação dos resíduos era feita plotando as porcentagens de cada grupo em um diagrama triangular. Dixon et al. (2006) tentando aprimorar os sistemas de classificação propuseram um sistema de classificação de resíduos baseado em quatro aspectos: tipo de material, tamanho, forma e potencial de degradação. Esse sistema de classificação é um dos mais robustos por levar em conta vários aspectos. O problema, segundo Zekkos et al. (2010), é que é pouco prático devido ao alto tempo consumido para desenvolver a caracterização.

Adicionalmente a esses métodos de classificação, existem outros tipos de classificações que podem levar em conta o nível de renda da população, o tipo de atividade que a gera (doméstico ou comercial) (Miguel et al., 2016), ou a classificação de acordo ao tipo de estação do ano (outono, inverno, primavera, verão) (Gidaracos et al., 2006).

#### **2.4. CHORUME**

O lixiviado ou chorume é um líquido contaminante que drena de um aterro sanitário. O lixiviado é formado basicamente pelo líquido originado da decomposição do lixo e de fontes externas como chuva, lençol freático, nascentes. A sua composição é variada e depende de fatores como a idade do aterro e tipo de resíduo contido no aterro (Henry, et al., 1996).

Na Tabela 2-3 são apresentados alguns valores típicos de componentes do lixiviado para aterros novos (com menos de dois anos) e antigos (com mais de 10 anos). A sigla COD é a demanda química de oxigênio e é a medida da quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente o material orgânico presente. A sigla BOD é a demanda bioquímica de oxigênio e é a medida da quantidade de oxigênio requerida para aclimatar microrganismos para degradar biologicamente a matéria orgânica presente. BOD e COD são testes comumente usados para medir indiretamente a quantidade de componentes orgânicos na água. A sigla TOC é o carbono orgânico total.

Na Figura 2.3 são apresentados os fatores que influenciam a quantidade de chorume dentro dos aterros sanitários. Vemos que claramente as condições climáticas influenciam a geração de chorume. Para regiões secas, com baixa taxa de precipitação anual, a quantidade total de lixiviado gerado pode ser menor do que em regiões com alta precipitação ou regiões úmidas onde a evapotranspiração é maior.

Uma vez que a capacidade do lixo de reter o líquido é alcançada, o lixiviado migra através do solo subjacente em direção ao lençol freático. Daí a importância de localizar os aterros sanitários sobre solos impermeáveis e não permitir que o lixiviado se acumule dentro do aterro. Os sistemas de drenagem de chorume, assim como a implementação de cobertura de argila ou coberturas de membrana, junto com o monitoramento do sistema de água subterrânea, se fazem necessários para prevenir contaminação de aquíferos por percolação de lixiviado.

Tabela 2-3: Características do lixiviado de aterros sanitários. COD: demanda química de oxigênio, BOD: demanda bioquímica de oxigênio e TOC: carbono orgânico total. Adaptada de Tchobanoglous et al. (1993).

Idade do Aterro	Novo (< 2 anos)		Antigo (>10anos)
Componentes	Intervalo (mg/L)	Valor típico (mg/L)	Valor típico (mg/L)
COD	3000-60000	18000	100-500
BOD	2000-30000	10000	100-200
TOC	1500-20000	6000	80-160
Total de sólidos suspensos	200-2000	500	100-400
Total de nitrogênio	20-1500	400	100-200
Total de fósforo	5-100	30	5-10
Alcalinidade (como CaCO <sub>3</sub> )	1000-10000	3000	200-1000
Sais solúveis (Cl, SO <sub>4</sub> )	200-4000	800	100-500
Ferro	50-1200	60	20-200
Chumbo	1-10	2	0.01-0.5
Zinco	25-250	50	0.1-1
Ph (sem unidades)	5-8	6	6.6-7.5

#### 2.4.1. Balanço hídrico

O balanço hídrico consiste em calcular quanta água infiltra no solo em um tempo determinado (dias, meses ou anos). Dependendo das características do escoamento e tipo e condições do solo, assim como do clima do local, uma parte da precipitação irá infiltrar através da cobertura do solo, e a outra fração desta água será devolvida à atmosfera através da evapotranspiração. Se a infiltração excede a evapotranspiração por um tempo suficientemente longo, a quantidade de água que o solo é capaz de suportar (sua capacidade de campo) será excedida. A capacidade de campo é a umidade máxima que o solo (ou qualquer outro material, como o lixo) pode reter sem uma infiltração descendente contínua devido à gravidade.

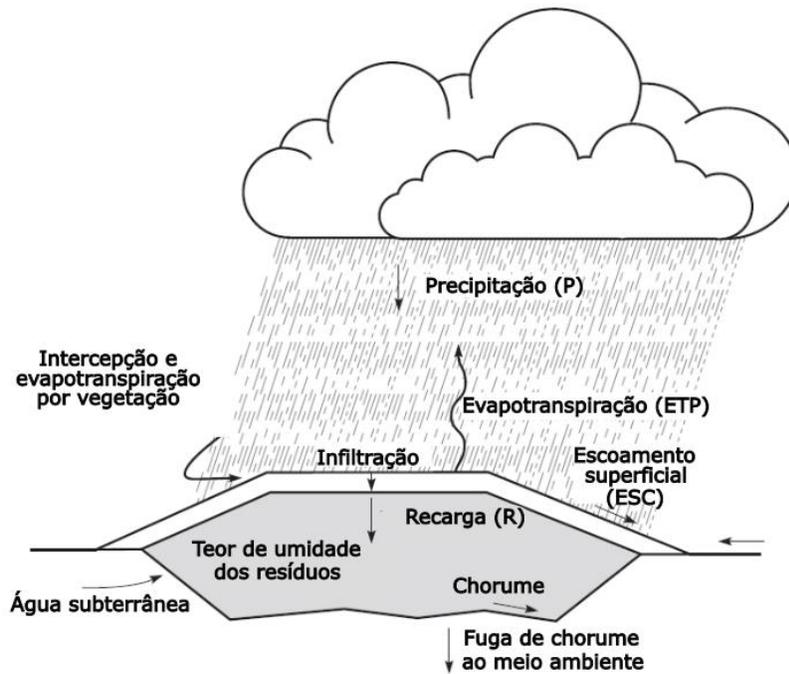


Figura 2.3: Esquema dos fatores que influenciam o balanço hídrico. Adaptada de Worrell & Vesilind (2011).

Todas as camadas de uma mistura de solo e lixo no aterro compactado também têm capacidade de campo (ou a capacidade de reter umidade). Se a capacidade de campo dessa mistura for excedida, o líquido (lixiviado) irá se infiltrar na próxima camada de solo ou resíduos. Uma mistura de solo ou lixo que não atinge a capacidade de campo não descarrega água nas camadas mais profundas (Worrell & Vesilind, 2011). Nos aterros já finalizados (com cobertura final), se a capacidade do solo da cobertura dos resíduos for excedida, a água se infiltra no solo e nos resíduos sólidos. Se, por sua vez, a capacidade de campo dos resíduos também for excedida, o lixiviado flui para o sistema de coleta de lixiviados.

A quantidade de chorume dentro do aterro pode ser calculada usando o balanço hídrico conhecendo-se parâmetros como precipitação anual ( $P$ , mm/ano), coeficiente de escoamento ( $c'$ ), quantidade de água armazenada dentro do solo ou os resíduos ( $S$ , mm/ano) e a evapotranspiração ( $ETR$ , mm/ano), usando a equação ( 2.1 ) e na Fig. 2.3:

$$R = P(1 - c') - S - ETR \quad (2.1)$$

onde R é a percolação ou recarga total para a camada de solo superficial (Figura 2.3).

Para realizar o balanço hídrico é necessário entender três fatores: a evapotranspiração, o armazenamento e o escoamento superficial.

A evapotranspiração é a quantidade de água disponível no solo de uma área dada que é transferida para a atmosfera, e que depende do tipo de solo e vegetação da área específica (Fenn et al., 1975). A evapotranspiração acontece pela perda de água do solo por evaporação e a perda de água da planta por transpiração. Quando o teor de umidade do solo está próximo à sua capacidade de campo, a evapotranspiração acontece na sua máxima taxa de potencial. Para calcular a evapotranspiração, são necessários dados de temperatura média e radiação solar média.

O escoamento superficial é quando uma fração da precipitação que não é infiltrada começa a escoar pela superfície com um fluxo no sentido da linha de maior declive do terreno. O escoamento depende de fatores como a intensidade e duração da precipitação, a condição de umidade do solo antes das chuvas, a permeabilidade e a capacidade de infiltração do solo de cobertura, os declives e a quantidade e tipo de vegetação da cobertura (Fenn et al., 1975). Para realizar o balanço hídrico, é necessário estimar a fração de escoamento da água precipitada, e para isso podem ser usados coeficientes de escoamento empíricos (c'). Na Tabela 2-4 são apresentados alguns coeficientes de escoamento para distintos tipos de solos.

*Tabela 2-4: Coeficientes de escoamento para vários tipos de solos com inclinação diferente. Adaptada de Worrell & Vesilind (2011).*

<b>Superfície</b>	<b>Coeficiente de escoamento</b>
Solo arenoso, plano a 2% de inclinação	0.05–0.10
Solo arenoso, 2% a 7% de inclinação	0.01–0.15
Solo arenoso, mais de 7% de inclinação	0.15–0.20
Solo pesado, plano a 2% de inclinação	0.13–0.17
Solo pesado, 2% a 7% de inclinação	0.18–0.22
Solo pesado, mais de 7% de inclinação	0.25–0.35

O armazenamento de umidade do solo depende principalmente do tipo de solo, da sua estrutura e da capacidade de campo, assim como da profundidade da camada de solo. Na Tabela 2-5, são apresentados valores de capacidade de campo para vários tipos de solo e os RSU.

*Tabela 2-5: Capacidades de campo de alguns solos e resíduos sólidos. Adaptado de Fenn et al. (1975).*

<b>Tipo de solo</b>	<b>Capacidade de campo (mm/m)</b>
Areia fina	120
Arenoso-argiloso	200
Franco-limosos	300
Argilo-limosos	375
Argila	450
RSU	200–350

## **2.5. CARACTERÍSTICAS DOS RSU**

O conhecimento do comportamento mecânico e das características geotécnicas dos RSU nos aterros sanitários é indispensável para o projeto, a prevenção de ocorrência de falha e o bom desenvolvimento do sistema, assim como para recuperar os antigos lixões ou aterros fechados para o desenvolvimento infra-estrutural. Apesar da importância de entender o comportamento físico e mecânico dos RSU, vários autores como Dixon et al. (2011), Miguel et al. (2016) e Naveen (2018) concordam em que ainda falta conhecimento do comportamento dos RSU como material de engenharia.

Para o projeto e aumento de capacidade de aterros sanitários, assim como para análises sísmicas que inclui a estimativa do deslocamento sísmico e análises de resposta sísmicas do local, são necessárias as propriedades dos RSU como parâmetros de entrada. Algumas das propriedades dinâmicas necessárias são a velocidade da onda de cisalhamento  $V_s$  ou módulo de cisalhamento de pequena tensão ( $G$  ou  $G_0$ ), coeficiente de Poisson e o peso específico (Naveen, 2018). Outra propriedade importante usada nas análises de estabilidade e assentamento é o teor de umidade, já que influencia na taxa

de adensamento, assim como na resistência ao cisalhamento e no peso específico (Zekkos et al., 2010).

A seguir é apresentada uma revisão bibliográfica das propriedades e parâmetros dos RSU, que foram analisados nesse projeto e que são importantes caracterizar para visualizar as propriedades dinâmicas dos resíduos sólidos urbanos. Serão apresentadas parâmetros mecânicos como o módulo de cisalhamento, coeficiente de Poisson, módulo de Young e as propriedades físicas como o peso específico e o teor de umidade dos RSU.

### 2.5.1. Parâmetros Elásticos nos RSU

Quando é aplicado algum tipo de força em um corpo, pode haver mudanças na forma e/ou no volume deste corpo. A teoria da elasticidade estuda as relações entre os esforços (força por unidade de área) e as deformações causadas. Até o limite de elasticidade de um material, a deformação é diretamente proporcional ao esforço aplicado, o que é conhecido como a Lei de Hooke. A deformação elástica é reversível permitindo que ao remover o esforço, a deformação também seja removida. O comportamento elástico intrínseco dos materiais é descrito pelos parâmetros, ou módulos, elásticos definidos a partir de relações entre tensão e deformação válidas no regime elástico. Dentre os parâmetros elásticos tem-se: Módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ou razão de Poisson) ( $\nu$ ), módulo de compressibilidade (K) e módulo de rigidez ou cisalhamento (G). Quando o material tem um comportamento elástico, qualquer resposta do sistema pode ser aproximada se dois dos seus parâmetros elásticos forem conhecidos.

A determinação dos parâmetros elásticos é necessária para entender o comportamento do RSU frente a cargas dinâmicas como as provenientes de maquinário vibrante, explosões e terremotos assim como para avaliar o desempenho do declive íngreme dos sistemas de revestimento, do qual depende a estabilidade e integridade dos resíduos. Esses parâmetros dependem da compactação dos resíduos, do tipo de resíduos e da profundidade do aterro. Choudhury et al. (2009) enfatiza que a velocidade da onda cisalhante ( $V_s$ ), a massa específica ( $\rho$ ), o módulo de cisalhamento (G) e a resistência ao cisalhamento são as propriedades e parâmetros dinâmicos mais importantes e precisam ser avaliadas cuidadosamente já que tem impacto direto no comportamento sísmico dos aterros.

Na literatura, as referências sobre os parâmetros elásticos em RSU são escassos como afirma por Sharma et al. (1990), Dixon et al. (2005) e Naveen (2018). Esses parâmetros podem ser determinados por ensaios de laboratório ou in-situ. Dentro dos ensaios de laboratório comumente utilizados estão: compressão triaxial, cisalhamento direto e coluna ressonante, porém ensaios em amostras deformadas de RSU não fornecem resultados representativos, já que os parâmetros elásticos são dependentes da densidade e do nível de tensão que é difícil reproduzir no laboratório (Dixon et al., 2005). Dentro dos ensaios in-situ encontram-se os métodos de propagação de onda em furos (cross-hole, down-hole), sísmica de refração de onda e análises de onda superficiais (Sharma et al. 1990, Matasovic et al. 2011, Dixon et al. 2005).

Alguns autores como Sharma et al. (1990), Kavazanjian et al. (1996), Carpenter et al. (2013) e Houston et al. (1995), utilizaram métodos geofísicos para determinar os parâmetros elásticos como velocidade da onda cisalhante  $V_s$ , módulo de Young e coeficiente de Poisson usando a relação entre as velocidades de onda cisalhante, velocidade de onda compressiva e a densidade. Na Tabela 2-9 se encontram alguns dos estudos realizados em aterros sanitários que usaram métodos geofísicos in situ para determinar os valores dos parâmetros.

### *Módulo de cisalhamento*

Entre os parâmetros elásticos, o módulo de cisalhamento  $G_{max}$  ou  $G_0$ , também conhecido como módulo de cisalhamento de pequena tensão ou máximo, é considerado o parâmetro mais importante na caracterização dinâmica dos solos (Lopes et al. 2003), sendo que é um parâmetro essencial para realizar análises de estabilidade dinâmica. O módulo  $G_{max}$  ou  $G_0$  quando avaliado para pequenas deformações é chamado de módulo de cisalhamento máximo, representado por  $G_{max}$  ou  $G_0$  e é representativo da primeira porção da curva tensão-deformação (Figura 2.4). O uso de velocidade de ondas sísmicas permite avaliar in situ o módulo de cisalhamento  $G_{max}$ , já que depende da densidade e da velocidade de onda cisalhante  $G_0 = \rho V_s^2$ .

Porém o módulo  $G_0$  depende da densidade, e mudanças na densidade em profundidade são geralmente pequenas em comparação com a mudança no módulo de cisalhamento ( $G_0$ ) e portanto, a densidade pode, e é normalmente ignorada, ou assumida como constante (Naveen et al., 2017). Para medir o módulo de cisalhamento  $G$ , por meio da

velocidade de onda cisalhante  $V_s$ , alguns autores assumiram um valor para o peso específico de RSU e calcularam os valores de  $G$  para o corpo de resíduos (Castelli & Maugeri, 2014) e (Houston et al., 1995). E outros autores como Zalachoris (2010) mediram os valores de densidade e módulo de cisalhamento in situ.

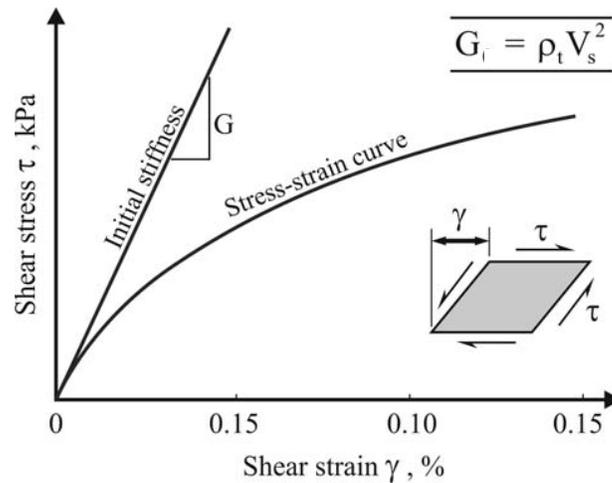


Figura 2.4: Módulo de cisalhamento máximo a partir da curva de tensão. Adaptado de Jamiolkowski (2012)

O estudo de Zekkos et al. (2011) destaca os efeitos da composição do lixo, tensão confinante, peso específico, tempo sob confinamento e frequência de carga nas propriedades dinâmicas que foram sistematicamente investigadas em um estudo anterior (Zekkos et al., 2008) e estão resumidas na Tabela 2-6.

Tabela 2-6: Efeito de diferentes critérios no módulo de cisalhamento, adaptada de Zekkos et al. (2011)

<b>Critério</b>	<b>Efeito no módulo de cisalhamento máximo <math>G_0</math></b>
Composição	Muito importante
Tensão confinante	Importante
Peso específico	Importante
Tempo sob confinamento	Importante
Frequência de carga	Importante

O módulo de cisalhamento a pequeno nível de tensão é usado na curva de redução normalizada do módulo de cisalhamento. Um exemplo disso é o estudo realizado por Zekkos et al. (2013), que obteve o módulo de cisalhamento de pequena nível de tensão  $G_0$  para diferentes tensões aplicadas, onde determinou que  $G_0$  variava de acordo a composição entre 22 e 45MPa.

### *Módulo de Young*

O módulo de Young, também conhecido como módulo elástico (E) ou rigidez estática, é usado para caracterizar o comportamento de deformação ou compressão de resíduos. Castelli et al. (2014) indicam que o valor do assentamento ou compressão dos RSU depende da composição e das propriedades dos constituintes individuais. Portanto, a avaliação dos parâmetros de compressão requer uma descrição extensa e classificação dos materiais residuais.

O módulo de Young é a tangente inicial da curva tensão-deformação (Figura 2.5). Analisando as curvas tensão-deformação, Singh (2008) estimou os parâmetros da hipérbole para achar o módulo de Young de dados de tensão-deformação obtido de ensaios triaxiais em vários estudos. Os resultados obtidos por ele são apresentados na Tabela 2-7.

Castelli et al. (2014), referenciam os valores típicos para varios grupos de constituintes de RSU (obtidos de Singh et al., 2007), sendo apresentados na Tabela 2-8. Deve-se salientar que os valores de E e  $\nu$  mostrados na Tabela 2-8 são as propriedades da matriz e não do material em si, representando as propriedades elásticas do conjunto de constituintes, que também dependem da porcentagem (em peso) do conjunto. Os valores do módulo elástico E obtidos por Castelli et al. (2014) variam entre 20.5 e 46.0 MPa, usando um peso específico de 8KN/m<sup>3</sup> e dados de velocidade obtidos do teste do dilatômetro sísmico (SDMT).

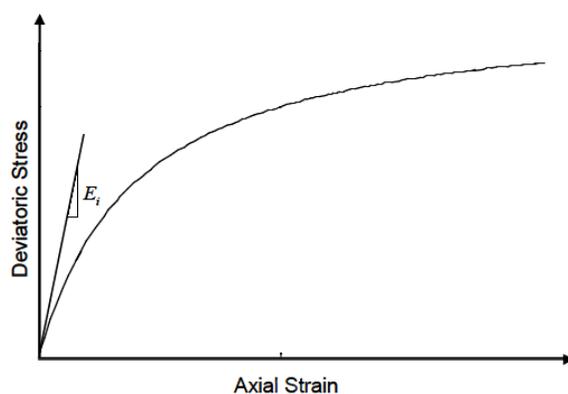


Figura 2.5: Curva hiperbólica de tensão-deformação, o módulo de Young  $E_i$  é a tangente inicial da curva.

Tabela 2-7: Estimativa do módulo de Young tangente inicial  $E_i$  realizada por (Singh, 2008) do estudo dele e de outros estudos publicados na literatura.

Tests from Published Literature				Tests by Authors				
	Type of test	$\sigma'_3$ (kPa)	$E_i$ (kPa)		Type of test	Sample ID	$\sigma'_3$ (kPa)	$E_i$ (kPa)
Vilar and Carvalho (2004)	CD	400	9018	Spadina Landfill	CU	I-1	50	4687
	CD	200	5153		CU	I-2	100	6115
	CD	100	2772		CU	I-3	150	10388
	CU	108	2953		CU	I-4	200	14344
	CU	208	6551		CU	I-5	25	4897
	CU	408	11913		CU	I-6	75	4390
Machado et al. (2002)	CD	400	14607	CU	R-1	100	4424	
	CD	200	5426	CU	R-2	125	4907	
	CD	100	2547	CU	R-3	50	1813	
	CU	50	5525	CU	R-4	200	4431	
	CU	200	8446	CU	R-5	150	4063	
Caicedo et al. (2002)	CU	350	10153	CU	LC-1	50	2906	
	CU	50	5525	CU	LC-2	75	3886	
	CU	200	8446	CU	LC-3	100	4556	
Jessberger and Kockel (1993)	CU	350	10153	CU	LC-4	150	5365	
	CD	100	4700	Brock West Landfill	CU	I-1	150	10587
	CD	200	4889		CU	I-2	35	2306
	CD	300	5801		CU	I-3	60	2818
CD	400	8696	CU		I-4	60	2497	
Kockel (1995)	CD	400	17317	CU	R-1	50	6995	
	CD	200	9018	CU	R-2	60	3528	
	CD	100	4646	CU	R-3	120	7898	
	CD	50	3733	CU	R-5	125	11053	
Grisolia et al. (1995)	CD	300	2250	CU	R-6	100	10265	
	CD	100	1195	CU	R-7	100	10475	
	CD	50	752	CU	R-8	30	2349	
				CU	R-9	60	9528	

Note :  $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$  is the value of deviatoric stress at 20% axial strain; CD- Consolidated drained test; CU- Consolidated undrained test

Tabela 2-8: Parâmetros elásticos  $E$  e  $\nu$  para constituintes de RSU. (Singh et al., 2007)

Característica	Constituintes	Faixa (% em peso)	E (MPa)	$\nu$
Rígido e incompressível	Metais, vidro, madeira, cerâmica	5-17	75-110	0.26–0.49
Material semelhante ao solo	Material semelhante ao solo	6–25	10–20	0.25–0.33
Degradável e compressível	Alimentos, resíduos de quintais e animais	16–43	0.5–0.7	0.05–0.15
Elementos de reforço e tração	Papel, cartão, plásticos flexíveis e rígidos, pneus	16–60	1.5–3.0	0.28–0.32

### *Coefficiente de Poisson*

O coeficiente de Poisson é um parâmetro dos materiais muito importante, porque diz respeito à compressibilidade relativa de qualquer material e é usado na caracterização geotécnica. Quando o valor do coeficiente de Poisson muda, ao mudar a tensão induzida, indica a degradação do material sob qualquer condição de carga.

O coeficiente de Poisson também é usado para acessar a velocidade de onda compressiva  $V_p$  a partir de dados da velocidade de onda cisalhante  $V_s$  (ver 3.1.2. Propriedades elásticas do meio). A incerteza de assumir um coeficiente de Poisson para avaliar a  $V_p$ , só se torna um fator quando o valor da razão de Poisson excede 0,4 e se aproxima de 0,5. Isso só ocorre quando os resíduos se aproximam da saturação (Kavazanjian, 2003), como por exemplo, em biorreatores ou em lixões sem impermeabilização de fundo e que se situam abaixo do nível de água.

Outro uso do coeficiente de Poisson é na definição do parâmetro  $K_0$  necessário na determinação da tensão lateral. O parâmetro  $K_0$  (pressão lateral em repouso), é a relação entre as tensões efetivas laterais e verticais sob as condições de não deformação lateral, e sua relação com o coeficiente de Poisson está dada pela equação ( 2.2 ) (Singh, 2008):

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (2.2)$$

A medida do coeficiente de Poisson tem sido realizada pelos pesquisadores em laboratório e in situ usando métodos sísmicos, uma vez que o coeficiente de Poisson depende das velocidades  $V_p$  e  $V_s$ .

Houston et al. (1995) usou o ensaio sísmico downhole para encontrar as velocidades  $V_p$  e  $V_s$  no aterro de Maricopa no Arizona e encontrou valores de coeficiente de Poisson variando entre 0,3 para baixas profundidade (1,5 m) e 0,11 para profundidades maiores.

No estudo de Matasovic et al. (1998) foi obtido o perfil de coeficiente de Poisson a partir de dados de downhole da velocidade de onda de cisalhamento e velocidade de onda de compressão no mesmo furo no aterro OII na Califórnia. O perfil obtido pelos autores acima referidos se encontra na Figura 2.6.

Zekkos et al. (2008) verificaram que a maioria dos ensaios de laboratório e de campo realizados em RSU indicam valores de coeficiente de Poisson razoáveis para maciços de RSU não saturados variando entre 0,05 e 0,35, com valores mais altos sendo mais apropriados para resíduos mais densos e/ou resíduos com alta composição do solo.

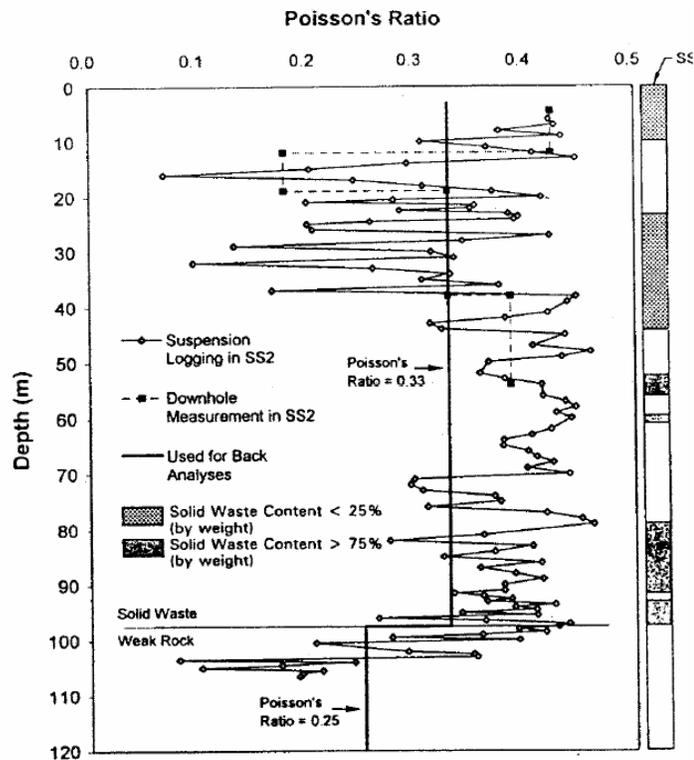


Figura 2.6: Perfil de coeficiente de Poisson obtido por (Matasovic & Kavazanjian, 1998) para o aterro OII em Califórnia.

Tabela 2-9: Valores de parâmetros elásticos obtidas em alguns aterros sanitários do mundo usando as velocidades  $V_p$  e  $V_s$  e a densidade

Autor	Aterro Sanitário	Método	Prof. (m)	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	G (MPa)	E (MPa)
(Sharma et al., 1990)	Richmond-California	Down-hole	0-15.3	716.8	198.3	736.9	0.49	28.9	84.4
(Kavazanjian et al., 1996)	Azuza Landfill, California- USA	SASW	0-30	Sem informação	80-300	1072-1530	Sem informação	6.9-137.7*	Sem informação
(Houston et al., 1995)	Northwest Regional Landfill - Arizona	Down-hole	1.52-6.10	235-300	124-184	Sem informação	0.3-0.11	16.1-35	42-84.1
(Carvalho, 1999)	Bandeirantes Landfill, Sao Paulo, Brazil	Downhole and crosshole	0-28	190-400	92-208	887-1430	0.35-0.27	8-16	25-37
(Pereira et al., 2002)	Valdemingómez (Espanha)	Sem informação	1-31	Sem informação	100 - 250	Sem informação	Sem informação	7.2 - 31	Sem informação
(Carpenter et al., 2013)	Veolia ES Orchard Hills (Rockford, Illinois)	MASW e sísmica de refração	0-5	380-460	150-170	Sem informação	0.29 - 0.46	Sem informação	Sem informação
(Sahadewa et al., 2015)	Austin Community Landfill, Texas	SASW	Sem informação	295-512	107-256	1520	0.34	23-31	Sem informação
(Castelli & Maugeri, 2014)	Aterro "Cozzo Vuturo", Italia	SDMT	16		100-150	815,7		8.2-18.3*	20.5-46
(Abreu et al., 2016)	São Carlos Landfill, São Paulo, Brazil	Crosshole MASW	0-20	197-451	92-214	918-1530	0.24-0.42	8-25	Sem informação

\*Calculado dos dados fornecidos pelo autor

MASW: Análises multicanal de ondas superficiais

SASW: Análises espectral de ondas superficiais

SDMT: Teste do dilatômetro sísmico

### 2.5.2. Propriedades físicas

Dentro das propriedades físicas dos RSU estudadas se encontram o peso específico e o teor de umidade.

#### *Peso específico*

O peso específico ( $\gamma$ ) é uma das propriedades mais importantes no estudo dos RSU. Segundo (Kavazanjian, 2006), o peso específico deve ser conhecido para estudos de integridade do revestimento, da capacidade do sistema de drenagem geossintética, da integridade estrutural dos tubos e condutos, assentamento e estabilidade da fundação e da resposta sísmica e estabilidade. Apesar de ser muito necessário, o peso específico é raramente medido diretamente in situ.

O peso específico é a relação entre o peso e o volume da massa de resíduos e para os RSU em aterros sanitários, os valores variam de acordo à composição dos resíduos, a energia de compactação aplicada e à pressão de confinamento que dependente da profundidade do aterro. Segundo Zekkos et al. (2006) os valores de peso específico reportados por vários estudos variam entre 3 kN/m<sup>3</sup> para resíduos pouco compactados até 17 kN/m<sup>3</sup> para resíduos bem compactados.

O estudo de Kavazanjian (1999) apresentou um perfil “típico” de peso específico (Figura 2.7) para aterros no sul da Califórnia, baseado na correlação entre as velocidades da onda de cisalhamento. Porém, o autor especifica que esses perfis não devem ser considerados como “representativos do peso específico total dos RSU em todos os climas”, já que esses perfis foram feitos para aterros localizados no sul da Califórnia, caracterizada por ser uma região semi-árida a árida. Além disso, as regulamentações locais geralmente proíbem o descarte de líquidos em aterros de RSU nessa região, pelo tanto esses perfis de peso específico só devem ser considerados representativos do peso específico dos resíduos sólidos secos. O autor também considera que para aterros em climas mais temperados, com maior pluviosidade e onde os líquidos são descartados ou recirculados, ou onde os resíduos estão abaixo do lençol freático, o peso do líquido deve ser considerado no peso específico total. Os valores de peso específico reportados pelo autor estão entre aproximadamente 12 a 16 kN/m<sup>3</sup> perto da superfície e 14-17 kN/m<sup>3</sup> a uma profundidade de 60 m.

Com base nos dados do peso específico in situ de varios estudos e nas tendências observadas em testes laboratoriais de larga escala, Zekkos et al. (2006) desenvolveram uma relação hiperbólica para representar um perfil de peso específico dos RSU. A relação proposta pelos autores é a mostrada na equação ( 2.3 ).

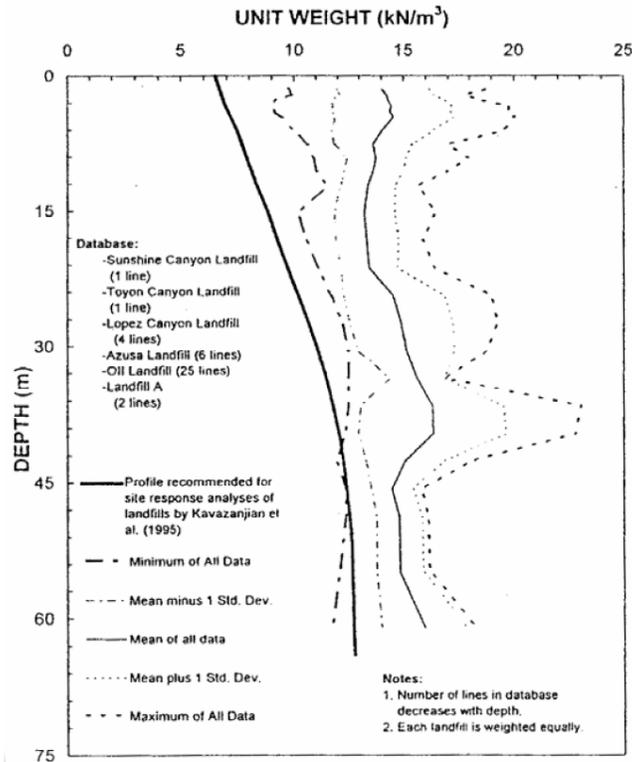


Figura 2.7: Perfil de peso específico para RSU obtido por (Kavazanjian, 1999).

$$\gamma = \gamma_i + \frac{z}{\alpha + \beta z} \quad (2.3)$$

Onde  $\gamma_i$  é o peso específico próximo da superfície medido in situ,  $z$  é a profundidade (em metros) para a qual o peso específico ( $\gamma$ ) está sendo estimado;  $\alpha$  e  $\beta$  são os parâmetros de modelagem que dependem das características do aterro que será modelado,  $\alpha$  é uma função do aumento do peso específico próximo da superfície com valores que variam de 0 a 10 m<sup>4</sup>/kN e  $\beta$  é uma função da diferença no peso específico entre a superfície e a grande profundidade com valores que variam entre 0 e 1 m<sup>3</sup>/kN., Zekkos et al. (2006), propuseram valores para os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$ , e  $\gamma_i$  para três diferentes materiais de

cobertura de solo e esforço de compactação. Os valores dos parâmetros propostos pelos autores são apresentados na Tabela 2-10. Algumas das limitações do modelo empírico indicadas pelos autores incluem que, todos os dados usados para desenvolvê-lo eram de resíduos “totalmente drenados”, ou seja, estavam abaixo da capacidade de campo. Portanto, o modelo deve ser aplicável a qualquer aterro em que os resíduos estejam abaixo da capacidade de campo. O perfil de peso específico para os três diferentes tipos de solo e compactação proposto por Zekkos et al. (2006) é apresentado na Figura 2.8.

Tabela 2-10: Valores dos parâmetros de ajuste do modelo hiperbólico de peso específico proposto por Zekkos et al. (2006) para diferentes tipos de cobertura e esforço de compactação.

Energia de compactação e conteúdo de solo de cobertura	$\gamma_i$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (m <sup>4</sup> /kN)	$\beta$ (m <sup>3</sup> /kN)
<b>Baixo</b>	5	2	0.1
<b>Tipico</b>	10	3	0.2
<b>Alto</b>	15.5	6	0.9

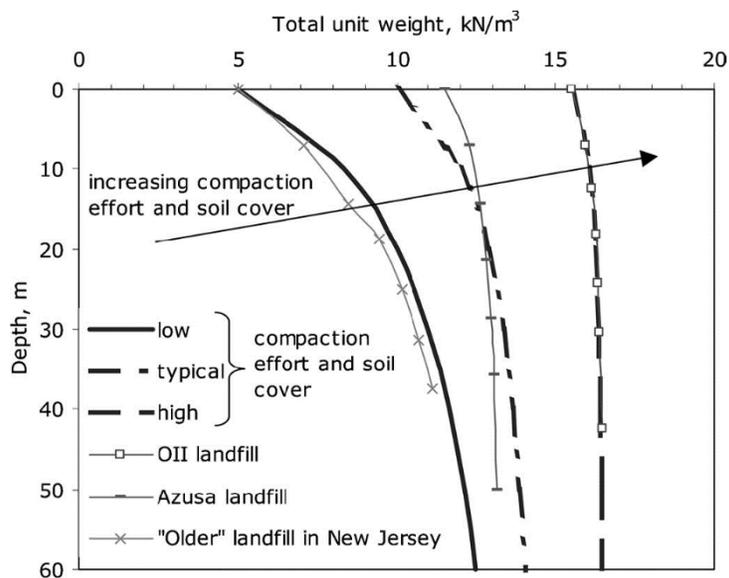


Figura 2.8: Perfil de peso específico proposto por Zekkos et al. (2006).

Um modelo para encontrar o peso específico baseado em valores de velocidades de onda cisalhante  $V_s$  foi proposto por Choudhury et al. (2009). Esse modelo foi desenvolvido usando dados de  $V_s$  e peso específico fornecidos por vários pesquisadores (mais de 30 estudos), e foram analisados usando técnicas de ajuste de curvas dando como produto uma equação matemática simples que relaciona a  $V_s$  com peso específico mostrado na equação ( 2.4 ).

$$V_s = \frac{1}{0.0174 - 0.000978 \gamma_{Residuos}} \quad (2.4)$$

No seu estudo, Konstantaki et al. (2015) usou a equação ( 2.4 ) para obter o peso específico dos resíduos usando os diferentes conjuntos de dados de velocidades obtidos da análise de reflexão da onda S, da MASW usando ondas de Rayleigh, e da MASW usando ondas Love, para uma profundidade de até 12 m do aterro Wieringermeer na Holanda. E comprovou a veracidade da equação ( 2.4 ), mostrando que os dados de velocidade estão em concordância com os dados usados por Choudhury et al. (2009) para desenvolver o seu modelo, eq. ( 2.4 ).

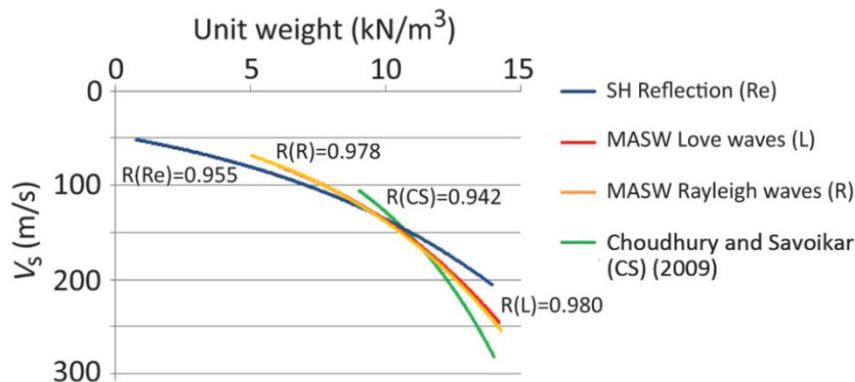


Figura 2.9: Relação entre o peso específico ( $\gamma$ ) e a velocidade de onda S ( $V_s$ ) do estudo de (Choudhury & Savoikar, 2009) com base no banco de dados dos aterros, e para os valores de  $V_s$  obtidos no estudo de Konstantaki et al. (2015) usando três métodos sísmicos diferentes. O ajuste hiperbólico foi realizado para os dados dos quatro estudos. Figura adaptada de Konstantaki et al. (2015).

Konstantaki et al. (2015) indicam que esse modelo é adequado e bastante confiável para áreas de contraste de alto peso específico, que também definem os caminhos do fluxo

de chorume, já que por ser um modelo hiperbólico, fortes contrastes nos valores de velocidade resultarão em mudanças moderadas no peso específico.

### *Teor de umidade*

O teor de umidade é definido como a razão da massa da água ( $m_a$ ) contida em uma amostra de solo pela massa do solo seco ( $m_s$ ) e é expresso em porcentagem:

$$W_w = \frac{m_a}{m_s} \quad (2.5)$$

O teor de umidade também pode ser encontrado usando o volume da água ( $V_a$ ) e o do solo seco ( $V_s$ ), chamado também teor de umidade volumétrico que é definido por:

$$\theta = \frac{V_a}{V_s} \quad (2.6)$$

O teor de umidade e o teor de umidade volumétrico estão relacionados pela seguinte equação:

$$W_w = \frac{\theta \rho_a}{\rho_s} \quad (2.7)$$

onde  $\rho_a$  e  $\rho_s$  são a massa específica da água ( $\rho_a = 1,000 \frac{kg}{m^3}$ ) e massa específica do solo seco.

O conhecimento do teor de umidade nos resíduos é importante no projeto de aterros sanitários devido à influência que tem na distribuição de pressão de chorume no corpo de resíduos e portanto, também na magnitude e distribuição das tensões e resistência ao cisalhamento (Dixon et al., 2005). A compressibilidade é uma das propriedades que é afetada pelas mudanças dinâmicas do conteúdo de umidade dentro do aterro. Muitos fatores podem desencadear a instabilidade do corpo de resíduos. No entanto, um alto

nível de chorume é, sem dúvida, um dos mais importantes como indicado por Jianguo et al. (2010).

Devido à heterogeneidade de componentes nos depósitos de resíduos, a mudança de valores de permeabilidade e umidade é grande, o que dificulta o estudo dessas propriedades. Além disso, a constante degradação de resíduos, assim como a influência de clima seco e chuvoso tornam o estudo do teor de umidade um pouco mais complexo.

Imhoff et al. (2007) apresentam um resumo dos métodos mais comumente usados para achar o teor de umidade dos resíduos sólidos urbanos dos aterros sanitários. Segundo os autores, os métodos mais usados são: sonda de nêutrons, sensores de resistência elétrica, técnicas eletromagnéticas, tomografia de resistência elétrica, marcadores de particionamento de gás e sensores de fibra ótica assim como furos e análise de amostras.

Algumas limitações dos métodos usados para encontrar o teor de umidade incluem que a análise por meio de sensores ou sondas, assim como medições diretas de umidade da amostra dão informação pontual do teor de umidade e não uma informação geral da propriedade no corpo inteiro, o que faz pouco atrativo o uso desses métodos (Grellier et al., 2006 b). Outra limitação se encontra no uso do balanço hídrico contínuo, já que apenas estima as mudanças gerais de umidade do corpo de resíduos e não faz um cálculo do conteúdo de umidade total dentro dela.

Dentro dos métodos geofísicos usados para avaliar indiretamente o teor de umidade da massa de resíduos, a medição das propriedades de resistividade elétrica dos resíduos tem surgido como uma estratégia promissora ( Grellier et al., 2006 a; Grellier et al., 2006 b; Jianguo et al., 2010; Guerin et al., 2004, Dumont et al., 2016). Uma técnica muito usada para isso é a tomografia de resistividade elétrica (ERT), que fornece valores de distribuição em larga escala da resistividade elétrica dos RSU (Dumont et al., 2016).

Grellier et al. (2007) usaram a lei de Archie ( $\rho = a\rho_1\theta^{-m}$ ) para relacionar a resistividade dos solos com o teor de umidade e acharam os valores de dos parametros  $a$  e  $m$  com os quais encontraram o teor de umidade volumetrico do RSU no aterro sanitario de Orchard Hills localizado em Illinois USA. Dumont et al. (2016) também empregaram a lei de Archie para converter valores de resistividade em umidade e acharam valores de para o RSU do aterro sanitario localizado em Mont-Saint-Guibert na Belgica.

Abreu (2015) realizou uma compilação de umidades dos RSU determinadas em diferentes pesquisas, resumida na Tabela 2-11.

*Tabela 2-11: Compilação de umidades de RSU determinadas em diferentes pesquisas, adaptada de Abreu (2015).*

<b>Referência</b>	<b>Origem dos RSU</b>	<b>Umidade</b>
<b>Coumoulus et al. (1995)</b>	Aterro Ano Liossia, em Atenas, Grécia	10 a 180% (base seca)
<b>Matasovich e Kavazanjian (1998)</b>	Aterro Oil, Califórnia, EUA	15 a 41%
<b>Zornberg et al. (1999)</b>	Aterro Azuza, Califórnia, EUA	7 a 52% (base seca)
<b>Carvalho (1999)</b>	Aterro Sanitário Bandeirantes, São Paulo, SP, Brasil	45 a 110% (base seca)
<b>Santos (1997)</b>	Aterro da Muribeca (Célula 1, mais antiga)	28,2 e 108,0% (base seca)
<b>Mariano (1999)</b>	Aterro da Muribeca (Célula 1, mais antiga)	19,5 e 149,0% (base seca)
	Aterro da Muribeca (Célula 2, mais nova)	15,1 e 116,4% (base seca)
<b>Melo (2003)</b>	Aterro da Muribeca (Célula 2, mais nova)	18 a 61% (base seca)
<b>Nascimento (2007)</b>	Aterro Metropolitano Centro, Salvador, BA, Brasil	63 a 137% (base seca)
<b>Zekkos (2005)</b>	Aterro Tri-Cities, Califórnia, EUA	12 a 25% (base seca)
<b>Stoltz et al. (2009)</b>	Aterro sanitário na França	50 a 129 %
<b>(Abreu, 2015)</b>	Aterro de Sanitário São Carlos - SP	30-67% (base seca)

## **2.6. MÉTODOS SÍSMICOS EM ESTUDOS DE ATERROS SANITÁRIOS E LIXÕES**

No início, os métodos sísmicos não eram muito utilizados em aterros sanitários ou lixões devido à alta absorção de energia sísmica que apresentam os RSU e a dificuldade para a estimativa do modelo de velocidades. Atualmente esses métodos têm sido aperfeiçoados e utilizados no estudo de lixões e aterros sanitários com várias finalidades. Aplicações comuns incluem caracterização da integridade estrutural e da geologia local, e mapeamento da continuidade lateral de resíduos aterrados (Soupios & Ntarlagiannis, 2017).

Na maioria dos casos, os aterros são caracterizados por velocidades muito menores (a velocidade da onda P pode variar de 100 a mais de 700 m/s) do que os sedimentos circundantes, assim o contraste sísmico é alto e os métodos de refração sísmica são

adequados. Soupios et al. (2017), fizeram uma revisão e atualização dos métodos geofísicos usados em aterros sanitários, indicam que os métodos sísmicos como a sísmica de refração são uma boa escolha para delinear as fronteiras dos aterros ou lixões, usando a característica do alto contraste sísmico entre resíduos e os sedimentos.

Outra das principais finalidades de uso de métodos sísmicos em estudos de RSU é a determinação de parâmetros elásticos necessários para entender o comportamento do RSU frente a cargas dinâmicas como as provenientes de maquinário vibrante, explosões e terremotos, assim como para avaliar o desempenho do declive íngreme dos sistemas de revestimento, do qual depende a estabilidade e integridade dos resíduos. A partir das velocidades das ondas sísmicas P e S e da densidade dos materiais em subsuperfície, é possível obter os valores dos parâmetros elásticos, tais como o módulo cisalhamento (G), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e o módulo de elasticidade (E). Alguns estudos que avaliam as velocidades  $V_p$  e  $V_s$  ou as propriedades dinâmicas com essa finalidade são Sharma et al. (1990), Houston et al. (1995), Zekkos et al. (2013), Kavazanjian et al. (1996) entre outros.

Outra finalidade do uso de métodos sísmicos em estudos de RSU, é no estudo inicial de lixões cujo histórico de operações não é conhecido, visando achar a base dos resíduos e os limites dos lixões. Alguns estudos desse tipo são Kavazanjian et al. (1996), Konstantaki et al. (2015), Carpenter et al. (2013) entre outros.

O método sísmico mais utilizado *in situ* em aterros sanitários é o método de análise espectral de ondas superficiais (SASW-Spectral Analysis of Surface Waves) que consiste em posicionar dois geofones e a fonte de energia de ondas superficiais alinhados, as medidas de fase feitas pelos geofones são transformadas e convertidas em gráficos de velocidade vs. comprimento de onda. Alguns dos autores que tem usado esses métodos são: Kavazanjian et al. (1996) e Zekkos et al. (2013).

A sísmica de refração é menos utilizada em estudos de RSU, mas os valores de velocidades obtidos com esse método são similares aos obtidos usando SASW (Kavazanjian, 2003). Esse método tem sido usado por vários autores como Wongpornchai et al. (2009), De Iaco et al. (2003), Doll et al. (2001) e Carpenter et al. (2013).

Outro método que nos últimos anos vem desenvolvendo-se em estudos de RSU é o método Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). Como exemplo da sua aplicação se encontra o estudo de e Carpenter et al. (2013) e o estudo de Konstantaki et al. (2015), onde usaram dispersão de ondas Rayleigh e ondas Love para achar as velocidades e delimitar o aterro sanitário Wieringermeer na Holanda.

Outro método sísmico muito utilizado é o chamado cross-hole, que embora seja um método intrusivo devido à necessidade de fazer as medições em furos, os dados obtidos são mais confiáveis por serem uma medida mais direta das velocidades de ondas sísmicas. Alguns dos estudos em aterros usando o método cross-hole são: Sharma et al. (1990), Houston et al. (1995) e Abreu et al. (2016).

O método sísmico de reflexão não é muito utilizado no estudo de RSU, algumas razões do seu pouco uso são as indicadas por Soupios et al.(2017): a) altos níveis de dispersão e atenuação inelástica fazem com que os resíduos não consolidados sejam geralmente pobres transmissores de ondas sísmicas, (b) ruído gerado pela fonte (isto é, ondas refratadas, guiadas e de superfície) podem mascarar reflexos superficiais, e (c) fortes variações de velocidade lateral (ambiente não homogêneo) podem inibir o registro de eventos de forma hiperbólica, tornando identificação de reflexões difíceis. Porém, recentemente, uma aplicação com sucesso da sísmica de reflexão foi a realizada por Konstantaki et al. (2015), onde usaram a reflexão da onda S para mapear heterogeneidades de alta resolução em um aterro e estimar as mudanças de densidade, tudo isso usando parâmetros de aquisição específicos e etapas especiais de processamento durante as análises de velocidade.

A aquisição conjunta de múltiplos dados geofísicos, juntamente com amostragem direta e dados geotécnicos, pode melhorar a caracterização do aterro, como indicado por Soupios et al. (2017), Konstantaki et al. (2015).

### *Velocidades de ondas elásticas em aterros sanitários*

As velocidades de onda dos RSU variam de aterro a aterro devido a vários fatores como a composição dos resíduos e o clima da região, sendo que para aterros localizados em regiões de clima seco as velocidades encontradas são maiores que as encontradas em regiões com clima úmido. Kavazanjian et al. (1996) desenvolveram um perfil de Vs

apresentado na Figura 2.10, onde foi usado o método SASW em seis aterros sanitários localizados no Sul de Califórnia, região que é caracterizada por ter clima temperado a árido. Mais tarde, depois de comparar as velocidades obtidas no estudo anterior com outros estudos desenvolvidos igualmente em áreas de clima temperado ou seco (Rix et al., 1998 e Manassero et al., 1996); Kavazanjian et al. (1996) sugeriu o uso do perfil de Vs (obtido para o sul de Califórnia) em estudos com ausência de valores de Vs específicos para aterros localizados em áreas de clima seco ou temperado.

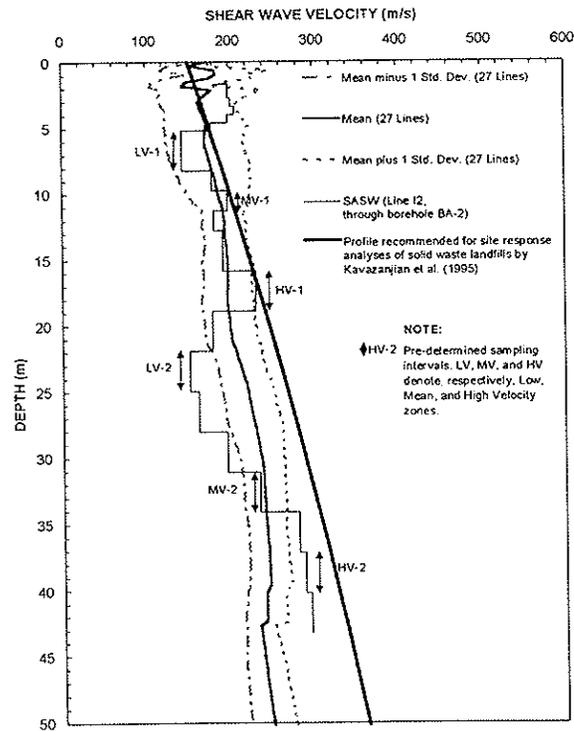


Figura 2.10: Perfil de Vs obtido usando SASW no estudo de (Kavazanjian et al., 1996)

Por outra parte, para regiões de clima úmido os estudos de velocidades são escassos. Um exemplo é o estudo de Abreu et al. (2016) desenvolvido no aterro sanitário de São Carlos-SP, uma região de clima úmido e subtropical caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos secos leves. Nesse estudo foram usados em conjunto dois métodos geofísicos, o cross-hole e o MASW, para caracterizar as velocidades  $V_p$  e  $V_s$  dentro do aterro. Os resultados obtidos mostram velocidades  $V_s$  variando entre 92 e 214 m/s e velocidades  $V_p$  variando entre 197 e 451 m/s.

No estudo de Zekkos et al. (2011) foi realizada uma comparação de perfis de velocidade  $V_s$  para varios estudos na literatura e encontraram que até os 30 m de profundidade a velocidade  $V_s$  varia entre valores menores a 50 m/s até valores superiores a 200 m/s, sendo que na maioria dos estudos é observada uma crosta de material mais duro logo abaixo da superfície. Também observaram que no geral a velocidade aumenta com a profundidade e na maioria de estudos na profundidade de 30 m as velocidades chegaram a estar entre 200-300 m/s. Os autores também ressaltam que apesar de que os intervalos relatados são relativamente grandes, os perfis de velocidade das ondas de cisalhamento em qualquer aterro são geralmente mais consistentes e exibem menor variabilidade (para estudos realizados no mesmo aterro), destacando a importância da velocidade de onda de cisalhamento específica do local medições e ensaios de resíduos.

Zekkos et al. (2014) desenvolveram dois modelos, um empírico e outro semi-empírico para estimar a velocidade de onda cisalhante  $V_s$ . O modelo empírico tem uma expressão matemática mais simples, que é uma função apenas da profundidade. Os parâmetros de ambos os modelos foram derivados da calibração de um total de 49 perfis de velocidade de onda de cisalhamento in situ em 19 aterros sanitários de RSU, entre os quais estão 13 perfis de quatro aterros localizados em Michigan gerados como parte desse estudo e 36 perfis adicionais de velocidade de onda de cisalhamento de 15 aterros disponíveis na literatura. O modelo empírico proposto pelos autores, usa a forma hiperbólica para ajustar  $V_s$  com os perfis de profundidade de várias curvaturas por meio da equação ( 2.8 ):

$$V_s = V_{si} + \frac{z}{\alpha_{V_s} + z \beta_{V_s}} \quad (2.8)$$

Onde  $V_{si}$  é a velocidade estimada da superfície dos RSU (sem considerar a cobertura),  $\alpha_{V_s}$  e  $\beta_{V_s}$  são os parâmetros de ajuste da equação e  $z$  a profundidade. Os autores propõem que  $V_{si}$  varie entre 48 e 159 m/s, com valor médio de 89 m/s,  $\alpha_{V_s}$  varie entre 0,04 e 0,19, com valor médio de 0,08 e que  $\beta_{V_s}$  varie entre 0,003 e 0,012 m/s, com valor médio de 0,006.

Um dos parâmetros mais importantes para caracterização geotécnica de aterros sanitários é o módulo de cisalhamento máximo, que depende diretamente da velocidade  $V_s$  e da densidade ou módulo unitário. O uso de métodos geofísicos sísmicos tem se

focado na obtenção da  $V_s$  mais do que na obtenção da  $V_p$ , sendo essa última menos estudada em aterros sanitários.

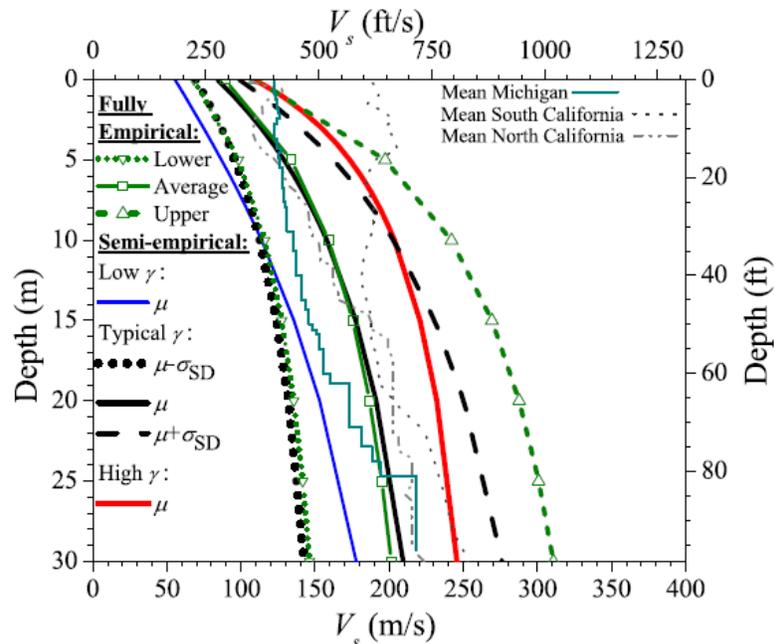


Figura 2.11: Modelo empírico e semi-empírico para velocidade  $V_s$  para RSU proposto por Zekkos et al. (2014).

Uma das finalidades de caracterizar  $V_p$  dentro de aterros sanitários ou lixões é para delimitar a área de RSU em lugares onde não se tem conhecimento dos limites e profundidades dele (como lixões antigos). Esse é o caso do estudo de Wongpornchai et al. (2009), que fazem uma tomografia sísmica de refração para delimitar um lixão. A camada superior foi interpretada pelos autores como solo superficial tendo uma velocidade de onda de 124 a 849 m/s e uma espessura de 1,2 a 9 m. A camada intermediária foi interpretada como resíduos e areia argilosa com velocidade de onda de 600 a 1.719 m/s e espessura de 2 a 13,9 m. A camada inferior foi interpretada como areia saturada e cascalho na base do aterro sanitário com uma faixa de velocidade de onda de 1.351 a 2.000 m/s e uma espessura de 1,5 a mais de 6,5 m.

Outra aplicação dada à velocidade de onda compressiva para RSU nos aterros sanitários é no grau de saturação que tem influência sobre as velocidades de propagação das ondas P (Cossu et al., 2005).

Alguns resultados de velocidades  $V_p$  ou  $V_s$  realizados em aterros sanitários ao redor do mundo são apresentados na Tabela 2-9.

## **2.7. MÉTODOS DE ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA EM ESTUDOS DE ATERROS SANITÁRIOS**

Os métodos elétricos são os métodos geofísicos mais utilizados nos estudos de RSU (Soupios & Ntarlagiannis, 2017; Dahlin et al., 2010). Os métodos geoeletricos são adequados porque as propriedades elétricas estão fortemente relacionadas ao teor de água, salinidade e porosidade, características muito fortes e variáveis nos RSU devido à sua heterogeneidade e à formação de bolsões de chorume.

A combinação de métodos elétricos é muito usada em estudos de RSU. Alguns exemplos de estudos são: Cardarelli & Di Filippo (2004), Abdullahi et al. (2011) e Dahlin et al. (2010) e Konstantaki (2016).

No estudo de Cardarelli & Di Filippo (2004) foram integradas as técnicas de sondagem elétrica vertical, tomografia de resistividade elétrica, polarização induzida e refração sísmica para avaliar a geometria do aterro, os níveis de saturação do chorume e a espessura dos resíduos.

No estudo de Abdullahi et al., (2011) foram integradas as técnicas de tomografia de resistividade elétrica, imagem de polarização induzida, EM baixa frequência e tomografia de refração sísmica. Os métodos elétricos foram usados para delinear as plumas de chorume e a sísmica de refração foi usada para determinar a profundidade do lençol freático, bem como as estruturas responsáveis pela migração das plumas de chorume. O estudo foi realizado no local de descarte de RSU Unguwan Dosa na metrópole de Kaduna em Nigéria.

Por outro lado, Dahlin et al., (2010), descreveram e compararam os resultados de medidas de resistividade e IP em locais na Suécia e na África do Sul. Os autores indicam que a polarização induzida em particular tem sido usada com sucesso para distinguir resíduos enterrados de seus arredores. Porém, destacam que a origem das altas cargas, muitas vezes observada nos resíduos, ainda não é entendida, mas sugerem que muito provavelmente isso se deva em parte ao conteúdo metálico presente

nos RSU. Além disso, existem indicações de que a presença de matéria orgânica biodegradável também seja significativa.

O estudo de Konstantaki (2016) usou métodos sísmicos e elétricos como ER e IP para mapear e caracterizar os RSU e assim compreender o processo de degradação dos RSU. No estudo, foram combinados os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida, e a autora conclui que o uso IP melhora a interpretação do corpo de resíduos em dois aspectos: (a) permitindo identificar detalhadamente os bolsões de chorume (removendo a ambiguidade devido a possíveis artefatos de inversão no resultado da ERT) e (b) melhorando a interpretação da posição da base do corpo de resíduos.

Os métodos geoeletricos são usados no estudo de RSU com objetivos variados, como por exemplo, na detecção de danos na cobertura dos aterros (Genelle et al., 2014; Carpenter et al., 1991), no mapeamento e monitoramento de umidade ou concentração de chorume (Melges Bortolin et al., 2010; Moura et al., 2003), assim como na obtenção do teor de umidade (Dumont et al., 2016; Grellier et al., 2007; Feng et al., 2017). Este último objetivo é o mais complexo de se obter e são poucos os trabalhos encontrados que estabelecem alguma relação direta entre a resistividade e o teor de umidade dentro do corpo de resíduos. Em seguida está a descrição mais detalhada do uso de métodos geoeletricos nos RSU.

#### *Mapeamento e monitoramento de lixiviado*

Os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida têm sido amplamente utilizados para mapear e monitorar a concentração de chorume dentro e fora dos aterros, sendo este o principal uso desses métodos em estudos de aterros sanitários e sendo estendido também para lixões e aterros controlados.

Os lixões e os aterros controlados causam impactos ambientais, pois são formas de disposição de resíduos que não dispõem de sistemas de impermeabilização ou controle de lixiviados, produzindo a contaminação de aquíferos nas zonas onde estão localizados. As altas condutividades que caracterizam o lixiviado com a presença de sais e metais na sua composição, permitem que os métodos geoeletricos como ER e IP sejam úteis na hora de localizar as áreas contaminadas, assim como a direção do fluxo de contaminação. Isso permite avaliar as consequências ambientais da existência de um

depósito de resíduos sólidos urbanos (RSU). Moreira et al. (2008) estabelece que “a redução nos valores de resistividade em áreas contaminadas por compostos inorgânicos, como no caso de aterros sanitários ou lixões, é resultado direto da elevada carga de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) que caracteriza o líquido proveniente da decomposição de resíduos sólidos”, por esse motivo a camada de resíduos apresenta baixa resistividade em comparação com a camada de cobertura ou a base da célula experimental.

No mundo existem inúmeros estudos desenvolvidos com a finalidade de avaliar e mapear a extensão de áreas contaminadas por lixiviado. Alguns deles usando métodos de eletrorresistividade ou polarização induzida ou uma combinação dos dois métodos, já no Brasil o uso dos dois métodos vem aumentando. No trabalho de Bortolin & Malagutti Filho, 2010, é apresentada uma ampla revisão bibliográfica dos estudos de mapeamento e monitoramento de áreas contaminadas usando métodos de eletrorresistividade e Polarização Induzida utilizados no Brasil até 2010. A compilação dessa revisão bibliográfica se encontra na Tabela 2-12, com estudos recentes atualizados.

#### *Detecção de danos no sistema de revestimento e cobertura em aterros*

Os sistemas de revestimento e cobertura são projetados para evitar a percolação de chorume nas águas subterrâneas. O sistema de cobertura minimiza a infiltração de água dentro do aterro minimizando a produção de lixiviado. Quando esses sistemas são danificados, o aquífero pode estar em risco devido a contaminação. Três fatores que podem causar dano nos sistemas de cobertura ou revestimento são apresentados no estudo de Genelle et al. (2014), a saber:

- Ação de estresse mecânico, hidráulico e climático na superfície.
- A incorreta preparação e instalação dos materiais de cobertura ou revestimento.
- Uso de diferentes materiais de cobertura, como a mudança nas espessuras ou materiais com que foi iniciada a cobertura.

O custo elevado de tratamento do chorume, assim como o de remediação por contaminação de chorume, fazem com que gastos em manutenção e monitoramento de danos nos sistemas sejam a melhor opção. A localização de áreas danificadas ou fracas incluem a detecção de fraturas e variação em espessuras na argila. A maioria das geomembranas usadas são isolantes elétricos, mas vazamentos criam uma passagem

de corrente que é observada com métodos geoeletricos como tomografia elétrica de resistividade.

Carpenter et al. (1991) aplicaram a sondagem elétrica vertical usando arranjos Wenner e Schumberger. O objetivo do uso da SEV foi achar a espessura da camada de cobertura e achar áreas de fraturas na cobertura. As áreas com resistividades maiores durante o clima seco foram designadas como fraturas dentro da cobertura.

Genelle et al. (2011) apresentam resultados de aplicação de tomografia elétrica de detalhe (dipolo de 0,5 m) e outros métodos geofísicos como metodo potencial espontâneo (SP) na detecção de duas fissuras na cobertura de argila (Figura 2.12). O experimento foi desenvolvido em duas partes experimentais em um aterro de lixo industrial na França. Com o ensaio elétrico foi possível identificar as duas fissuras e outras características como o contato entre a argila, cascalho argiloso condutor e o aluvião argiloso. Genelle et al. (2014) apresentam resultados de tomografia de resistência elétrica com a finalidade de obter modelos de resistividade 2D e achar zonas de dano na cobertura. Os resultados mostraram duas zonas com resistividades muito baixas indicando alta presença de chorume devido as fraturas na cobertura. Essa fratura foi confirmada por perfurações que também confirmaram que nessas zonas a cobertura não foi construída de acordo com o plano original de cobertura projetado para o local.

Tabela 2-12: Estudos de mapeamento e monitoramento de áreas contaminadas usando métodos de eletrorresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP) no Brasil. Adaptada e atualizada do trabalho de Bortolin & Malagutti Filho (2010).

<b>Autor</b>	<b>Aterro</b>	<b>Método</b>	<b>Técnica</b>	<b>Objetivos Conseguidos</b>
<b>(Cavalcanti et al., 2001)</b>	Aterro Metropolitano Centro (Salvador-Bahia)	ER, IP	SEV	Definição da localização do lençol freático e do topo rochoso, servindo como subsídio para a instalação de poços de monitoramento.
<b>(Shiraiwa et al., 2002)</b>	Lixão desativado (Cuiabá- Mato Grosso)	ER, EM, GPR		Detectação da contaminação por chorume desde a superfície até a profundidade da zona saturada.
<b>(Silva et al., 2002)</b>	Lixão desativado (Ribeirão Preto- SP)	ER, EM	CE	Verificação da existência de contaminação no subsolo da área, atingindo inclusive o lençol freático.
<b>(Moura &amp; Malagueti Filho, 2003)</b>	Aterros controlados de Rio Claro e Piracicaba, SP	ER, IP	CE, SEV	Deteção de zonas de baixa resistividade elétrica, resultado da contaminação das áreas por chorume.
<b>(Porsani et al., 2004)</b>	Aterro de Rio Claro, SP	GPR, ER	SEV	Delineação de uma zona de contaminação devido a resíduos sólidos no aterro de Rio Claro.
<b>(Lago et al., 2006)</b>	Aterro de Bauru, SP	ER, IP, SP	CE, SEV	Diferenciação das cavas com resíduos (< 20 $\Omega$ .m) dos materiais naturais (> 100 $\Omega$ .m) e definição do tipo de resíduo em subsuperfície: >12 mV.V <sup>-1</sup> com sais dissolvidos e chorume. para materiais polarizáveis e < 4 mV.V <sup>-1</sup> para água subterrânea.
<b>(Fachin et al., 2006)</b>	Área de disposição de resíduos industriais de um curtume. Várzea Grande -Mato Grosso.	ER, EM, GPR	CE	Deteção de presença de contaminantes em subsuperfície.
<b>(Mondelli, 2008)</b>	Aterro de RSU de Bauru	ER	CE	Visualização da dimensão espacial e deteção do sentido das plumas de contaminação existentes nas áreas.

<b>(Moreira &amp; Braga, 2009a)</b>	Área localizada no distrito industrial do município de Araras, SP.	EM, GPR, ER e IP	CE	Estudo da evolução da pluma de contaminação.
<b>(Moreira &amp; Braga, 2009b)</b>	Aterro controlado do município de Cordeirópolis, SP.	ER, IP e SP	CE	Determinação da evolução da pluma de contaminação.
<b>(Melges Bortolin &amp; Malagutti Filho, 2010)</b>	Aterro controlado de Rio Claro, SP	ER	CE, SEV	Zonas de baixa resistividade, com valores menores ou iguais a 50 $\Omega$ .m, foram associadas à contaminação por chorume. Desse modo, foi possível identificar dois sentidos do fluxo da pluma: (1) em direção ao sul, e (2) em direção ao oeste.
<b>(Oliveira et al., 2011)</b>	Área de disposição de resíduos sólidos desativada, Caçapava do Sul - RS.	IP	CE	Caracterização da camada de resíduos por baixos valores de cargabilidade. Anomalias verticais abaixo da camada de resíduos são interpretadas como zonas de fratura com possível acúmulo de chorume, caracterizadas por baixos valores de cargabilidade.
<b>(Bacellar &amp; Catapreta, 2010)</b>	Aterro sanitário de Belo Horizonte- MG	ER	CE	Caracterização e delimitação da pluma de contaminação no vale do córrego dos Coqueiros, a jusante do talude principal do aterro, onde a contaminação possui aparentemente maior concentração.
<b>(Cavalcanti et al., 2014)</b>	Aterro controlado do Jokey Clube de Brasília	ER	CE	As seções de eletrorresistividade apresentaram valores de baixa resistividade e relacionada a valores de análise físico – química da água coletada em poços de monitoramento, foram associadas à presença da pluma de contaminação.
<b>(Moretto et al., 2017)</b>	Célula experimental no aterro sanitario Delta A, Campinas- SP	ER	CE	Os testes de CE permitiram a identificação de zonas de concentração de chorume dentro da massa de resíduos e da camada resistiva (geomembrana de PEAD).

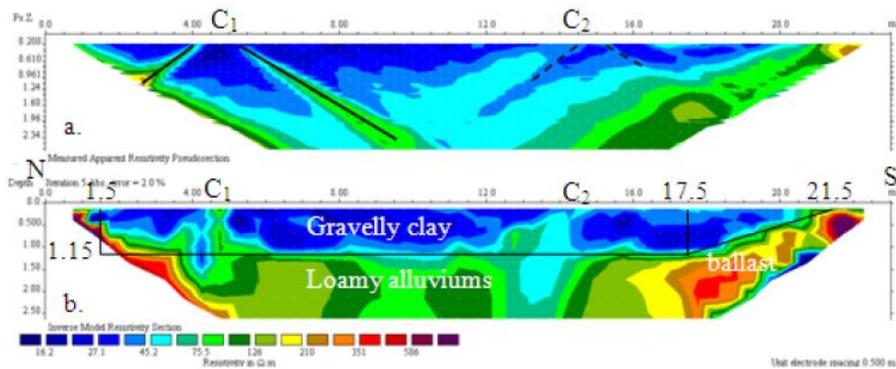


Figura 2.12: Resultado de Tomografia de resistividade elétrica obtida por Genelle et al. (2011). a) Resistividade aparente medida (arranjo dipolo-dipolo). b) Modelo de inversão robusta de resistividade. C1 e C2 representam as duas fissuras detectadas.

### Obtenção do teor de umidade

Os autores Grellier et al. (2007); Dumont et al. (2016) e Feng et al. (2017), analisaram a relação entre o teor de umidade e a resistividade usando medições diretas de umidade e comparando com os valores obtidos de resistividade, através da lei de Archie (Archie, 1942) que relaciona a resistividade elétrica com a porosidade e a saturação das rochas e dos solos.

Grellier (2005) propôs uma equação simplificada da Lei de Archie para RSU, onde o teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ) substitui a porosidade e a saturação, difíceis de medir nos resíduos, ficando a equação ( 2.9 ) como a relação entre a resistividade e o teor de umidade volumétrico dos resíduos:

$$\rho = a\rho_1\theta^{-m} \quad (2.9)$$

onde  $\rho$  é a resistividade elétrica interpretada,  $\rho_1$  a resistividade elétrica dos resíduos,  $\theta$  o teor de umidade volumétrico,  $a$  e  $m$  são parâmetros empíricos. Archie (1942) propôs que  $a$  varie entre 0,6 e 2 com  $a < 1$  para porosidade intergranular (como no caso dos RSU) e  $a > 1$  para porosidade fraturada, e  $m$  com um valor ao redor de 2.

A metodologia usada por Grellier et al. (2007) pode ser resumida nos seguintes passos:

- i. Determinar a resistividade elétrica com profundidade nos locais escolhidos para perfurar e obter amostras dos resíduos usando métodos de eletrorresistividade.

- ii. Imediatamente após as medições de ER, perfurar os furos nos locais escolhidos para coletar as amostras de resíduos em diferentes profundidades.
- iii. Determinar o conteúdo de umidade no laboratório das amostras obtidas.
- iv. Comparar um a um os perfis de resistividade elétrica e conteúdo de umidade nos locais da perfuração, correlacionando diretamente a resistividade elétrica e o teor de umidade dos resíduos mediante a equação ( 2.9 ) para achar os valores dos parâmetros  $a$  e  $m$ .
- v. Com os valores dos parametros encontrados, estimar a distribuição espacial do teor de umidade usando os resultados de tomografia de resistividade elétrica.

Grellier et al. (2007) acharam valores de  $a = 0.75$  e  $m = 1.6 - 2.15$  com os quais mapearam o teor de umidade volumétrico do RSU no aterro sanitário de Orchard Hills localizado em Illinois USA.

Dumont et al. (2016), usaram a mesma metodologia e acharam valores de  $a = 1.53$  e  $m = 2.101$  para o RSU do aterro sanitario localizado em Mont-Saint-Guibert na Bélgica. Na Figura 2.13 são apresentados os valores de teor de umidade obtidos usando relação entre resistividade e umidade pelo autor acima referido.

Outro estudo que usou a mesma metodologia foi o desenvolvido no aterro Laogang Landfill na China por Feng et al., (2017) e encontraram valores de  $a = 0,81$  e  $m = 1,66$ . Os autores, fizeram a comparação do resultado deles com resultados de outros estudos anteriores (Grellier et al. (2007); Dumont et al. (2016)) e concluem que os parâmetros obtidos no estudo estão dentro de uma faixa razoável se comparado com o apresentado por os outros estudos.

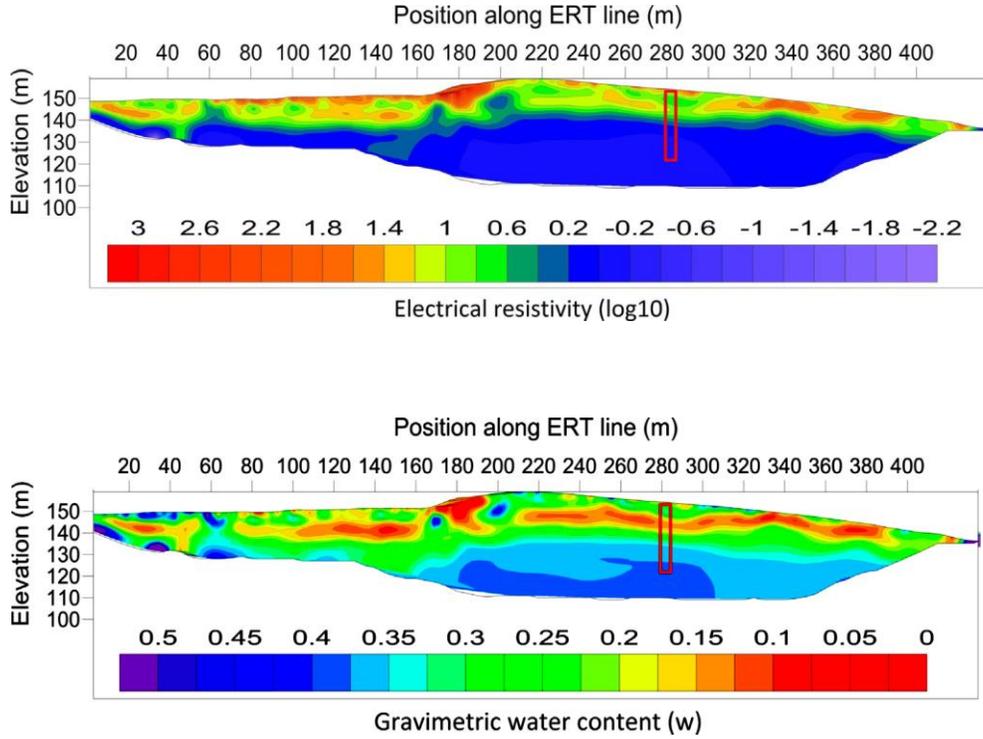


Figura 2.13: Teor de umidade gravimétrico dentro do aterro sanitário Mont-Saint-Guibert. O valor de umidade foi calculado da tomografia de resistividade elétrica e dos valores de temperatura e densidade medidos (Dumont et al., 2016).

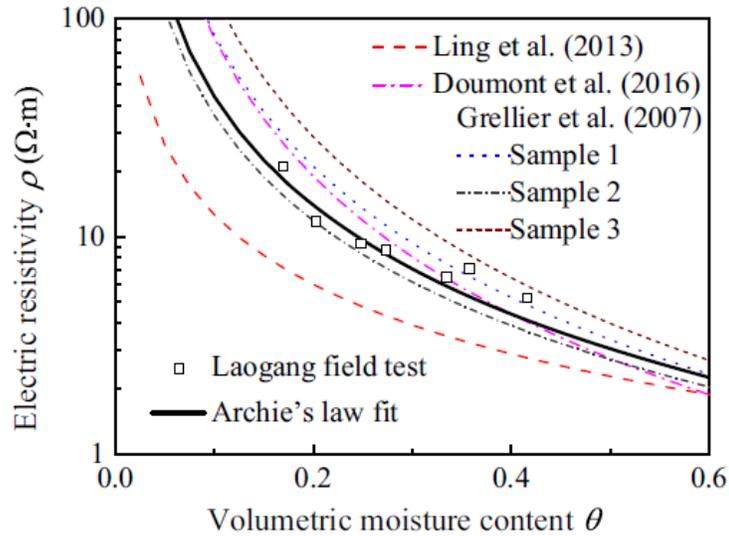


Figura 2.14: Relação entre resistividade elétrica e teor de umidade volumétrico obtido por Feng et al., (2017) comparado com os resultados obtidos por outros autores (Grellier et al., 2007; Dumont et al. 2016)

## Capítulo 3 – Métodos geofísicos aplicados

Para a realização desse projeto foram aplicados métodos geofísicos sísmicos e geoeletricos para a obtenção direta ou indireta das propriedades geomecânicas dos RSU. O uso de vários métodos geofísicos para caracterizar uma determinada área reduz as possíveis incertezas que existem ao usar um único método. Nesse projeto foram usados três métodos sísmicos diferentes para a obtenção das velocidades de onda compressiva (P) e cisalhante (S): Tomografia Sísmica de Refração (TSR), análises multicanais de ondas superficiais (MASW das siglas em inglês) e o Ensaio Crosshole. Esses métodos foram aplicados nos RSU depositados na célula experimental e no lisímetro, onde também foram aplicados os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida para caracterizar a resistividade na célula e converter esses dados de resistividade em teor de umidade.

Nesse capítulo são apresentados os fundamentos teóricos dos métodos geofísicos aplicados ao longo do projeto, começando pelos métodos sísmicos e continuando com os métodos geoeletricos.

### 3.1. MÉTODOS SÍSMICOS

Os métodos sísmicos consistem na propagação de ondas sísmicas em subsuperfície, onde sofrem refração e reflexão nas várias camadas geológicas que atravessam, e voltam na superfície onde são registradas pelos sismógrafos. Os sismômetros são instrumentos que detectam o movimento do terreno causado pelas ondas, e esse movimento é registrado pelos sismógrafos. Os tempos de percurso das distintas ondas sísmicas. A partir das análises dos tempos de percurso, são obtidas as profundidades e as velocidades das camadas estudadas, sendo possível mapear a estrutura geológica do terreno.

Nesta seção serão revisados os fundamentos teóricos principais dos métodos sísmicos, começando pelas ondas sísmicas, as propriedades elásticas do meio e os componentes dos levantamentos sísmicos, depois serão descritos os três métodos sísmicos usados nesse projeto.

### 3.1.1. Ondas Sísmicas

As ondas sísmicas são ondas que viajam na Terra e que são produzidas pela liberação instantânea de energia, causada naturalmente nas rochas ou induzida por uma fonte sísmica. Existem dois tipos de ondas sísmicas, as ondas de corpo que viajam pelo interior da Terra e as ondas de superfície que se propagam próximo à superfície da Terra. As velocidades das ondas, dependem das propriedades elásticas do meio pelo que viajam e da natureza de cada tipo de onda.

#### 3.1.1.1. Ondas de corpo

As ondas sísmicas de corpo estão divididas em dois tipos: as ondas P e as ondas S (Figura 3.1). A onda mais rápida e que consegue se propagar em todos os meios é a onda P (P de primária já que é a onda mais rápida), essas ondas fazem com que as partículas vibrem em direção paralela à direção de propagação da onda, por isso, também são chamadas de ondas longitudinais e produzem compressão e expansão nas partículas das rochas. As ondas S (S de secundária por ser a segunda onda a chegar), não viajam por meios líquidos ou no ar e fazem com que as partículas vibrem na direção perpendicular à direção de propagação e produzam mudanças na forma das partículas, por isso também são chamadas de ondas transversais ou ondas de cisalhamento.

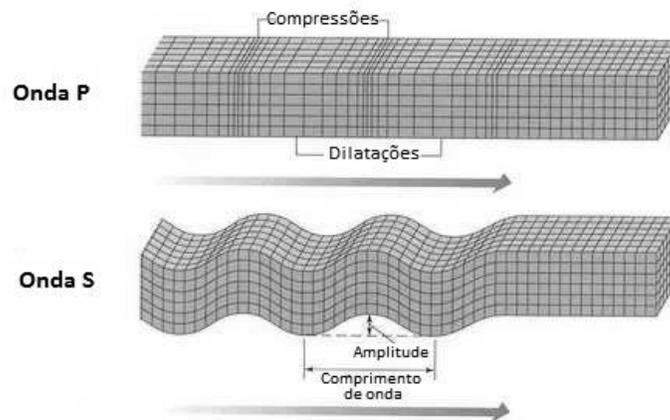
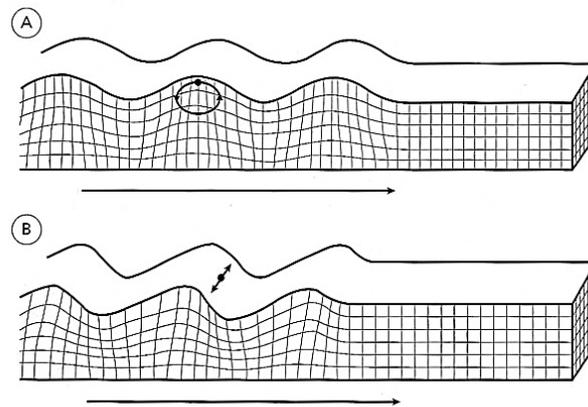


Figura 3.1: Movimento de partículas associada à passagem de ondas de corpo.

#### 3.1.1.2. Ondas de superfície

As ondas de superfície existem apenas no meio com uma superfície livre, e se propagam perto da superfície com uma espessura que é aproximadamente igual a um comprimento

de onda. Assim, no mesmo meio, ondas de diferentes comprimentos de onda chegam a diferentes profundidades; se o meio não for homogêneo, elas são propagadas com diferentes velocidades e diferentes atenuações nos distintos materiais. (Socco, et al., 2004). As ondas superficiais nascem da combinação das ondas de corpo P e S na superfície e viajam a velocidades menores do que as ondas de corpo. Existem dois tipos de ondas de superfície: as ondas Rayleigh e as ondas Love. Nas ondas Rayleigh o movimento das partículas se dá no plano vertical à direção de propagação da onda. Nas ondas Love as vibrações ocorrem no plano horizontal e são perpendiculares à direção de propagação da onda, similar da onda Sh.



*Figura 3.2: Movimento das partículas associado a passagem de ondas superficiais (A) Ondas Rayleigh (B) Ondas Love. Adaptado de Kearey et al. (2009).*

As ondas Rayleigh propagam-se paralelamente à superfície produzindo movimento elíptico nas partículas do solo. O movimento orbital da partícula se dá no sentido retrogrado já que são produzidas pela combinação das vibrações das ondas P e SV. A amplitude das ondas Rayleigh decresce exponencialmente com a profundidade limitando-se a uma profundidade de penetração de cerca de 0,4 vezes o comprimento de onda ( $0.4\lambda$ ). A velocidade das ondas Rayleigh é mais baixa do que as ondas S e no semi-espaço homogêneo é não dispersiva, no entanto, no caso de uma camada sobre um semi-espaço homogêneo ela se torna dispersiva quando o comprimento de onda está na faixa de 1 a 30 vezes a espessura da referida camada, ou seja, devido às mudanças de impedâncias acústicas das camadas com a profundidade a onda sofre mudanças progressivas na velocidade de fase de acordo com as frequências. Se a relação de

Poisson é válida para um sólido, a teoria de ondas Rayleigh proporciona uma velocidade ( $V_R$ )  $0.87V_S < V_R < 0.96V_S$  (Socco, et al., 2004).

### Dispersão geométrica

A dispersão de ondas superficiais acontece quando as ondas harmônicas de diferentes comprimentos de onda são propagadas a diferentes profundidades e para cada comprimento de onda a velocidade de fase  $V$  depende das propriedades elásticas e densidade do terreno pelo qual está sendo propagada (Foti, et al., 2018). A distribuição das velocidades de fase em função da frequência ou comprimento de onda é chamada de curva de dispersão. Um esquema representando a dispersão geométrica de ondas de superfície em meios verticalmente heterogêneos, é mostrada na Figura 3.3, que foi adaptada de Foti et al. (2018), onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da onda superficial com velocidade de fase  $V$  e  $f$  é a frequência do movimento vibratório do solo associado.  $V_A$  e  $V_B$  indicam a velocidade da onda de cisalhamento nas duas camadas afetadas pela propagação da onda de superfície.

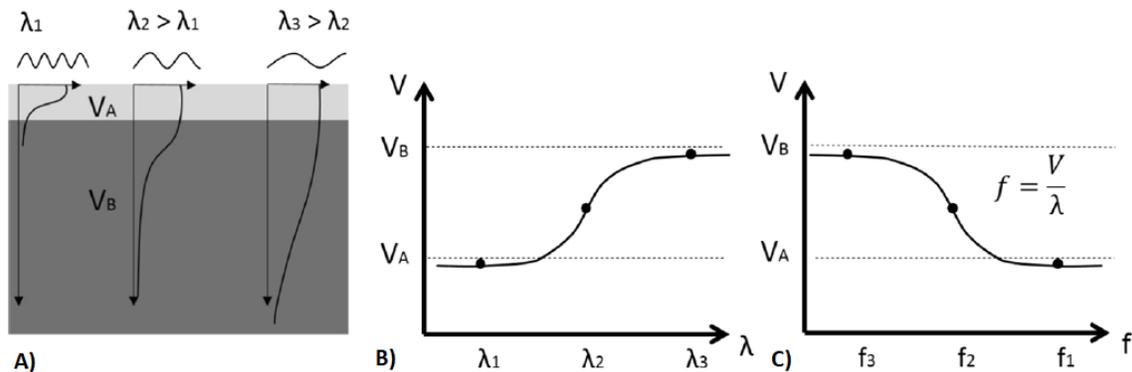


Figura 3.3: Dispersão geométrica de ondas superficiais. A) Decaimento de amplitude do modo fundamental em diferentes comprimentos de onda. B) Curva de dispersão no domínio comprimento de onda – velocidade da fase. C) Curva de dispersão no domínio frequência - velocidade da fase. Adaptada de Foti et al.(2018).

### 3.1.2. Propriedades elásticas do meio

Quando um corpo é submetido a tensão, sofre mudanças de forma ou de volume chamadas de deformações. Essas deformações são elásticas quando ao se retirar o esforço ou tensão aplicada, a deformação é reversível, ou seja, o corpo volta na sua forma

original. Todos os materiais têm um limite máximo de esforço dentro das deformações elásticas, além desse limite, o corpo fica deformado ou fraturado (Figura 3.4).

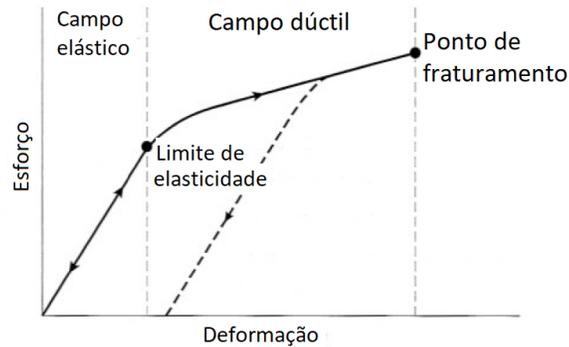


Figura 3.4: Curva Tensão-Deformação de um corpo sólido, adaptado do Kearey et al. (2009).

Esse comportamento elástico intrínseco aos materiais é descrito pelos parâmetros, ou módulos elásticos definidos a partir de relações entre tensão e deformação válidas no regime elástico. Entre os parâmetros elásticos tem-se: Módulo de Young ( $E$ ), coeficiente de Poisson (ou razão de Poisson) ( $\nu$ ), módulo de compressibilidade ( $K$ ) e módulo de rigidez ( $G$  ou  $\mu$ ) (Figura 3.5).

### *Módulo de Young*

Relação entre a força aplicada ( $F$ ) por unidade de área ( $A$ ) e a deformação longitudinal unitária:

$$E = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad (3.1)$$

### *Módulo de compressibilidade*

Expressa a razão tensão-deformação no caso de uma pressão hidrostática (compressão ou tração uniformemente em toda a sua superfície), onde o corpo apresenta deformação volumétrica. O módulo de compressibilidade é a relação entre a variação de pressão ( $P$ ) e variação unitária de volume.

$$K = \frac{P}{\Delta V/V} \quad (3.2)$$

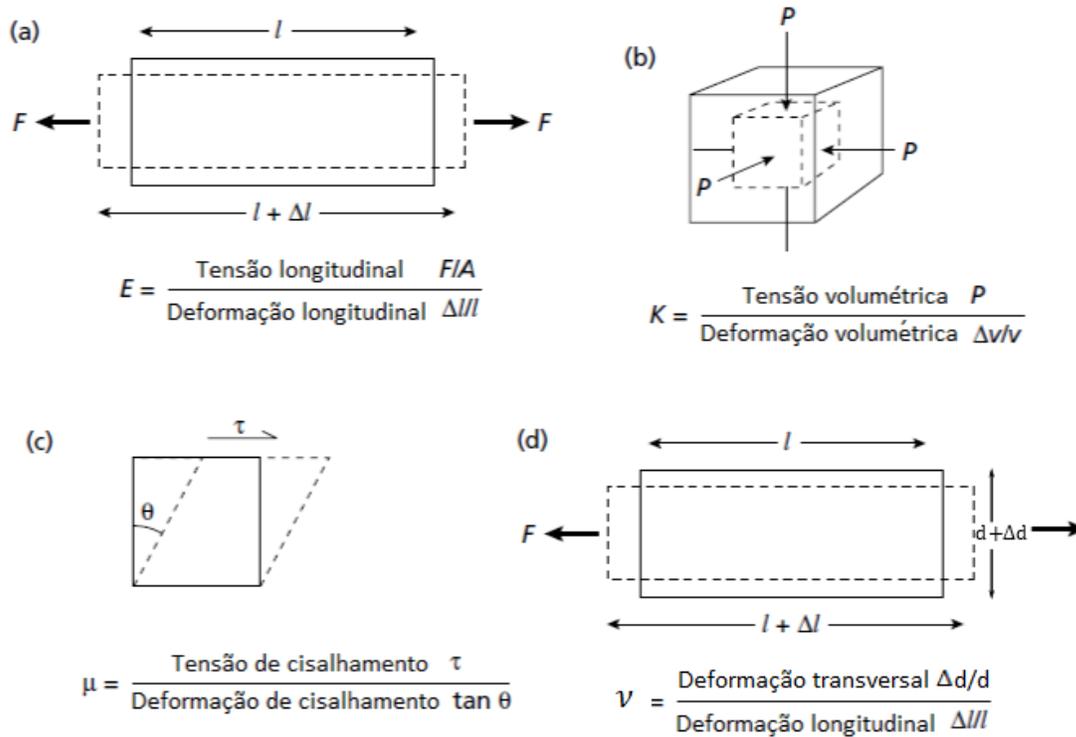


Figura 3.5: Os módulos elásticos. (a) Módulo de Young; (b) Módulo de compressibilidade; (c) Módulo de rigidez; (d) Coeficiente de Poisson. Adaptado de Kearey et al. (2009).

### Módulo de rigidez ou cisalhamento

É a relação entre o esforço transversal e as deformações de cisalhamento.

$$G = \frac{F/A}{\tan \theta} \quad (3.3)$$

### Coeficiente de Poisson

Relação entre a deformação transversal unitária e a deformação longitudinal unitária.

$$v = \frac{\Delta d/d}{\Delta L/L} \quad (3.4)$$

Exceto nas imediações da fonte, a tensão associada com a passagem de uma onda sísmica é pequena e pode ser considerada como sendo elástica. Nesta hipótese as velocidades de propagação de impulsos sísmicos são determinadas pelos módulos elásticos e densidades dos materiais por onde passam as ondas elásticas, sendo que as velocidades da onda P e S são dadas, respectivamente, por:

$$V_p = \left[ \frac{K + 4/3G}{\rho} \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

$$V_s = \left[ \frac{G}{\rho} \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

Esses módulos elásticos e a densidade das rochas variam devido à composição, a textura, a porosidade e aos fluidos nos poros. As ondas S não se propagam no espaço poroso, fazendo com que a velocidade  $V_s$  dependa somente das propriedades dos grãos da matriz e de sua textura. Caso contrário, a velocidade das ondas P é influenciada pelos fluidos nos poros (Kearey, et al., 2009).

Foi observado que as velocidades das ondas de corpo dependem das propriedades elásticas do meio, entretanto com a informação das velocidades e da densidade do meio ( $\rho$ ), é possível calcular os valores dos parâmetros elásticos, tais como coeficiente de Poisson, Módulo de Young, Módulo de Rigidez ou cisalhamento e Módulo de Compressibilidade, como observado nas equações 3.7 - 3.10.

$$v = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2} \quad (3.7)$$

$$E = V_p^2 \rho \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{1 - \nu} \quad (3.8)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (3.9)$$

$$K = \rho V_p^2 - \frac{4}{3} \rho V_s^2 \quad (3.10)$$

### 3.1.3. Componentes dos levantamentos sísmicos

São três os componentes básicos necessários em qualquer levantamento sísmico: Fonte controlada, sismômetros e sismógrafo. A especificação de cada um depende do tipo de levantamento sísmico requerido. A seguir serão descritos esses componentes.

#### 3.1.3.1. Fontes sísmicas

As fontes sísmicas são as encarregadas de gerar a energia para produzir as ondas sísmicas, têm que produzir energia suficiente num intervalo amplo de frequências, e essa energia produzida deve ser do tipo necessário para o levantamento requerido, ou seja, para gerar onda P ou onda S na profundidade necessária. A repetibilidade da forma de onda gerada pela fonte é outro fator muito importante, nos casos em que é necessário realizar a soma de sinais, para melhorar a relação sinal-ruído (Kearey, et al., 2009).

Existem vários tipos de fonte que podem ser agrupadas em três grupos principais: as fontes explosivas, as fontes vibratórias e as fontes de impacto superficial.

**Fontes explosivas:** São explosivos colocados em furos rasos, que detonam no terreno e se caracterizam por ter um amplo espectro de frequências. Entretanto sua aplicação não é comum pela dificuldade em seu uso e por requerer permissões específicas.

**Fontes vibratórias:** São equipamentos vibratórios montados em caminhões que vibram e imprimem ao solo essa vibração de longa duração, baixa amplitude e frequências variáveis. O custo é elevado.

**Fontes de impacto superficial:** São marretas ou grandes massas em queda sobre a superfície do terreno. A energia gerada por essa fonte é relativamente baixa, sendo essa uma das fontes mais usadas por sua simplicidade e baixo custo.

As fontes sísmicas também podem ser classificadas pela origem da energia sísmica como ativas ou passivas. As fontes ativas são aquelas fontes artificiais de construção humana, tais como as fontes mencionadas anteriormente (explosivas, vibratórias e de impacto superficial). Essas permitem escolher o local e controlar o tempo de sua aplicação. As fontes passivas são aqueles sinais sísmicos ambientais que ocorrem naturalmente na Terra, num ambiente cultural (e.g., tráfego de carros, trens, metrô, ruído industrial) ou pela natureza (terremotos, trovões, movimentos de maré, mudanças de pressão atmosférica) e não permitem ser controladas.

### 3.1.3.2. Sismômetros

Os sismômetros ou geofones são dispositivos utilizados para detectar os movimentos sísmicos do solo causados de forma natural ou artificial. Os sismômetros mais comuns são os geofones de bobina móvel, que são fixados no solo por um pino e consistem em uma bobina cilíndrica suspensa em uma mola no campo de um magneto permanente acoplado ao corpo do instrumento (Kearey, et al., 2009). Quando a onda atravessa no terreno o geofone é movido com a superfície. O movimento da bobina dentro do geofone gera uma diferença de potencial elétrico nos terminais que é convertido para o meio digital através do conversor analógico-digital do sismógrafo.

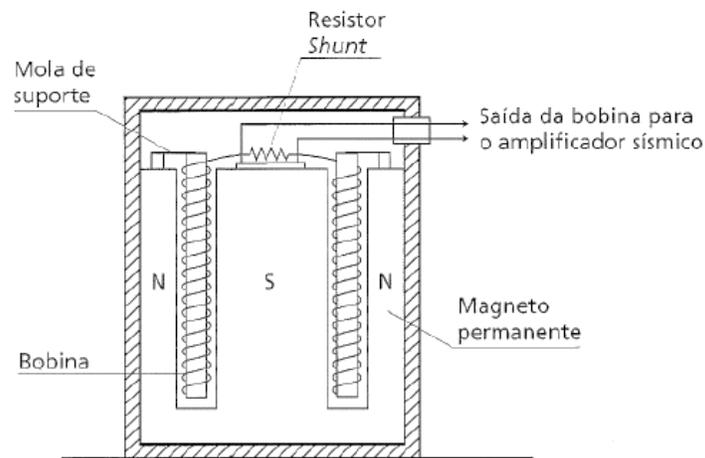


Figura 3.6: Seção transversal do geofone de bobina móvel vertical, adaptado de Kearey et al. (2009).

Existem sismógrafos que registram uma componente (ou vertical ou horizontal) ou três componentes (uma vertical e duas horizontais). Também os geofones são elaborados para registrar frequências naturais de 4.5, 10, 14, 28, 40 e 100 Hz. A escolha dele deve ser adequada à necessidade da aquisição, e devem ser escolhidos para ter uma frequência de ressonância bem abaixo da banda de frequências principal do sinal sísmico a ser registrado. Por exemplo para sísmica de reflexão as frequências mais usadas estão entre 4 -14 Hz para altas profundidades e de 40 Hz para profundidades rasas, já para análises de ondas superficiais são usados de 4.5 Hz.

### 3.1.3.3. Sismógrafo

Os sismógrafos são equipamentos que convertem o pulso gerado pelos sismômetros na forma digital e possuem a capacidade de armazenar esses dados. Existem vários tipos que aceitam entre 12, 24 e 48 canais, ou seja, podem registrar os movimentos de vários geofones conectados ao mesmo tempo.

### 3.1.4. Sísmica de Refração

O levantamento sísmico de refração analisa as ondas sísmicas que retornam à superfície depois de serem criticamente refratadas nas interfaces que separam diferentes camadas. Nos sismogramas, os primeiros eventos sísmicos que retornam à superfície correspondem à onda que caminhou direto da fonte até o geofone, ou à onda que refratou criticamente nas interfaces. Dessa forma, nos levantamentos de sísmica de refração a atenção é concentrada nas primeiras chegadas das ondas sísmicas.

No caso mais simples, de duas camadas com interface horizontal, como mostrado na Figura 3.7, o raio direto viaja de A para D a uma velocidade  $v_1$ , o raio refratado viaja ao longo da trajetória inclinada AB com o ângulo crítico  $\theta$  depois viaja ao longo da interface no trajeto BC a uma velocidade  $v_2 > v_1$  e finalmente volta a superfície no trajeto CD com o mesmo ângulo crítico  $\theta$  e  $v_1$ . O tempo total do percurso ABCD é:

$$t = \frac{z}{v_1 \cos\theta} + \frac{(x - 2z \tan\theta)}{v_2} + \frac{z}{v_1 \cos\theta} \quad (3.11)$$

Usando a lei de Snell pode o tempo pode ser expressado assim:

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2z \cos\theta}{v_1} = \frac{x}{v_2} + \frac{2z(v_2^2 - v_1^2)^{1/2}}{v_1 v_2} \quad (3.12)$$

Para o caso de multicamadas, o tempo de percurso total da onda é expressado como:

$$t_n = \frac{x}{v_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2z_i \cos\theta_{in}}{v_i} \quad (3.13)$$

Onde  $n$  é número de camadas horizontais  $i$  é o contador e  $\theta_{in} = \text{sen}^{-1}(v_i/v_n)$ .

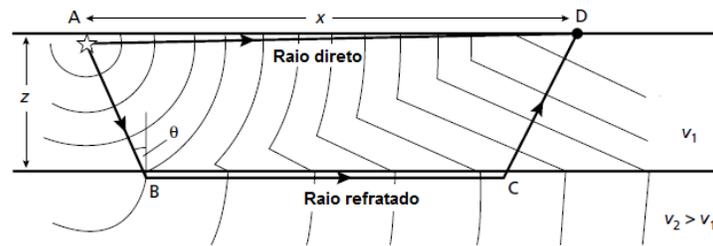


Figura 3.7: Refração de ondas para um modelo de duas camadas (Kearey et al., 2009).

Num caso mais realístico, as camadas geológicas podem estar inclinadas (Figura 3.8), fazendo com que o tempo de percurso mude. No caso de um raio criticamente refratado no refrator inclinado  $n$  a equação de tempo de percurso é:

$$t_n = \frac{x \sin\beta_1}{v_1} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i (\cos\alpha_i + \cos\beta_i)}{v_i} \quad (3.14)$$

Os casos apresentados até agora, são casos simplificados da geologia real, sendo que na realidade, camadas irregulares e com inclinações são as mais comuns. Para analisar esses casos existem métodos mais complexos, como o *método de interpretação t mais-t menos* e o *método recíproco generalizado*, que são baseados no conceito de *tempo de atraso*. Com a Figura 3.9, define-se o conceito de tempo de atraso como a diferença entre o tempo que tarda a onda em percorrer de A para B com velocidade  $V_1$  e de C para B com velocidade  $V_2$ :

$$\delta t = t_{AB} - t_{CB} = \frac{AB}{V_1} - \frac{BC}{V_2} = \frac{z \cos \theta}{V_1} \quad (3.15)$$

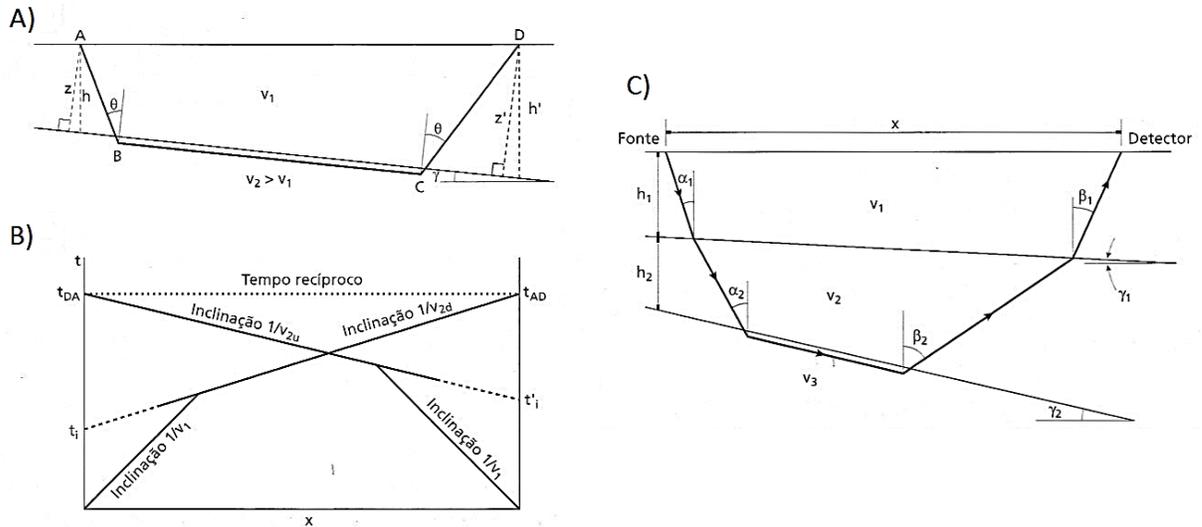


Figura 3.8: Refração de ondas para modelo com camada inclinada, A) Geometria da trajetória, B) curvas tempo x distancia, C) modelo de duas camadas sendo a última inclinada (Kearey et al., 2009).

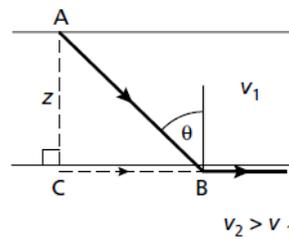


Figura 3.9: Conceito de tempo de atraso (Adaptada de Kearey et al., 2009).

O método mais-menos é usado em análises de interfaces irregulares como na Figura 3.10, onde é representado um modelo de duas camadas com interface não plana e as trajetórias de raios numa linha com tiro direto e reverso dados em S1 e S2 respectivamente, em direção a um detector localizado em D. O tempo de percurso total de um ponto de tiro até o outro é:

$$t_{S_1S_2} = \frac{l}{V_2} + \delta_{tS_1} + \delta_{tS_2} \quad (3.16)$$

onde  $\delta_{tS_1}$  e  $\delta_{tS_2}$  são os tempos de atraso nos respectivos pontos  $S_1$  e  $S_2$ . Para os raios viajando em direção a um detector localizado numa posição D, desde as duas pontas do arranjo (Figura 3.10, A), os tempos de percurso são:

$$\begin{aligned} t_{S_1D} &= \frac{x}{V_2} + \delta_{tS_1} + \delta_{tD} \\ t_{S_2D} &= \frac{l-x}{V_2} + \delta_{tS_2} + \delta_{tD} \end{aligned} \quad (3.17)$$

O termo menos, no método de interpretação mais-menos, se refere à diferença entre os tempos  $t_{S_1D}$  e  $t_{S_2D}$ :

$$t_{S_1D} - t_{S_2D} = \frac{2x-l}{V_2} + \delta_{tS_1} - \delta_{tS_2} \quad (3.18)$$

A inclinação  $1/V_2$  pode ser obtida através do gráfico termo menos ( $\delta_{tS_1} - \delta_{tS_2}$ ) versus a distância ( $2x-l$ ). O termo mais é o tempo de atraso obtido a partir da soma de  $t_{S_1D}$  e  $t_{S_2D}$ :

$$\delta_{tD} = \frac{1}{2}(t_{S_1D} + t_{S_2D} - t_{S_1S_2}) \quad (3.19)$$

Com o termo mais é possível calcular a profundidade do refrator no ponto D:

$$z = \frac{\delta_{tD} V_1 V_2}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad (3.20)$$

O método recíproco é uma técnica de inversão que usa os tempos de percurso dos tiros direto e inverso e dá uma solução gráfica para achar a geometria dos refratores. Esse método é adequado para configurações com refratores irregulares e mudanças laterais na velocidade do refrator.

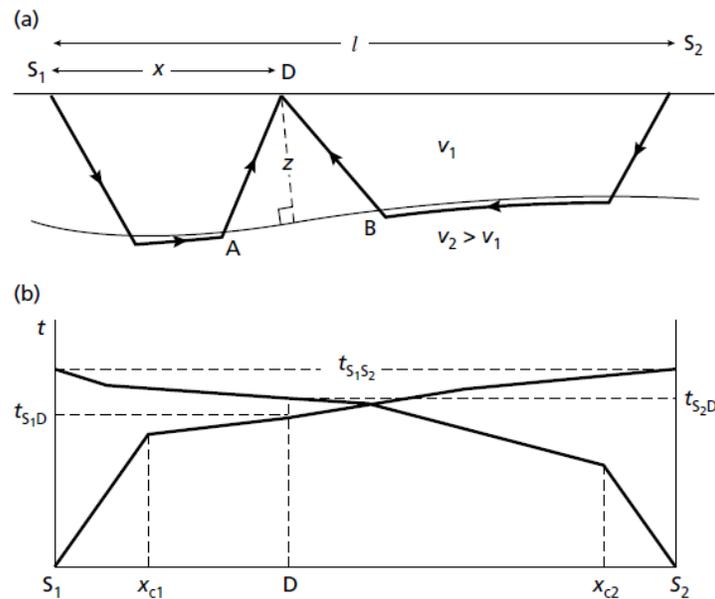


Figura 3.10: Modelo de interpretação mais-menos para uma camada. (a) Trajetória de raio refratado a partir de cada extremidade até um detector em uma posição intermediária e (b) Curvas tempo x distância nas direções direta e reversa. (Adaptada de Kearey et al. 2009).

### 3.1.2.1. Tomografia Sísmica de Refração (TSR)

O meio geológico na grande maioria das vezes, apresenta modelos complexos que incluem variações laterais de velocidade e gradientes verticais de velocidade que não permitem análises simples dos tempos de primeira chegada, como visto anteriormente com os métodos descritos. Para isso foi criada a Tomografia Sísmica de Refração (TSR) como uma alternativa à análise convencional de refração sísmica (Zhu, et al., 1989).

A tomografia sísmica de refração utiliza os tempos de primeira chegada em um levantamento sísmico com fonte e receptor na superfície, e divide a área explorada em células com velocidade constante para representar um modelo de velocidade da estrutura. O principal uso da tomografia de refração é a obtenção de modelos de velocidade nas baixas profundidades. A tomografia sísmica, ao contrário dos métodos descritos anteriormente, não se baseia em modelos estratificados, mas sim, em modelos em que se assumem gradientes de velocidades, permitindo assim, determinar as variações laterais e em profundidade de velocidade (Neves, et al., 2014).

O processamento começa com a importação e definição da geometria aos dados obtidos em campo, depois é realizada a determinação dos tempos de chegada das primeiras ondas sísmicas ou picagem das primeiras chegadas nos sismogramas. Em seguida, é calculado o modelo de velocidade inicial, o qual pode ser calculado por diferentes métodos, como: o método do gradiente vertical de velocidade (Seehan, et al., 2005); os método mais-menos (Hagedoorn, 1959); GRM (Palmer, 1980); VIRT (Visual interactive ray trace) (Whiteley, 2004); o método Delta-t-V (Rohdewald) e o método de inversão suave, sendo estes dois últimos métodos os usados no software Rayfract, que foi utilizado no processamento de dados nesse projeto.

O método Delta-t-V consiste em criar um modelo inicial pseudo-2D com a distribuição de velocidades em subsuperfície assumindo que a velocidade varia suavemente na direção vertical (Rohdewald, Seehan et al. 2005). Por outro lado, a inversão suave ou “*smooth inversion*” cria um modelo inicial unidimensional baseado nos resultados do Delta-t-V. Em seguida, ele estende esse modelo 1D para cobrir a área de estudo 2D. Na Figura 3.11 é mostrado um exemplo dos modelos iniciais usando o método Delta-t-V e o método “*smooth inversion*”.

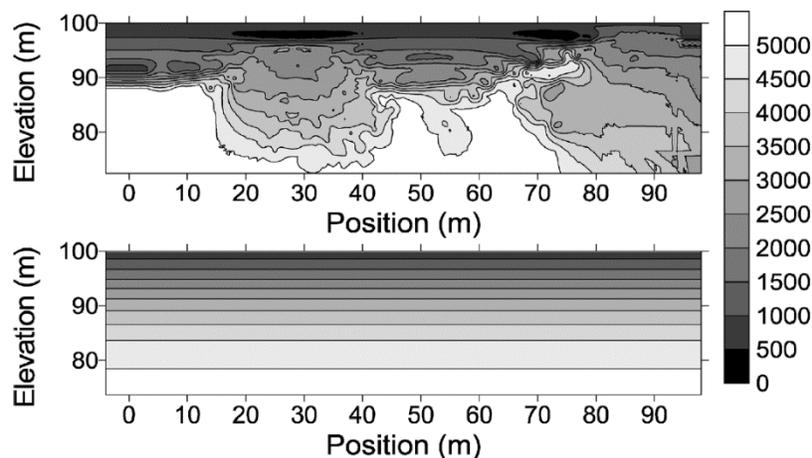


Figura 3.11: Exemplos de modelos iniciais usados pelo software Rayfract na TSR. Acima usando o método Delta-t-V, embaixo usando o método “*smooth inversion*”. Figura adaptada de Seehan et al. (2005).

Após a determinação do modelo inicial de velocidades, os trajetos das ondas sísmicas são obtidos considerando a abordagem do volume de Fresnel (Watanabe, et al., 1999).

O volume de Fresnel (Figura 3.12) contém uma fonte (S), um receptor (R) e é representado pelo ponto P que satisfaz a equação ( 3.21 ).

$$\tau_{SP} + \tau_{PR} - \tau_{SR} \leq \frac{1}{2f} \quad (3.21)$$

Onde o  $\tau_{SR}$  representa o tempo de percurso da fonte até o receptor e  $f$  é a frequência. Ou seja, o ponto P pertence ao volume de Fresnel unicamente se a diferença entre o tempo de percurso do raio que passa pelo ponto P e o menor tempo de viagem for inferior a metade do período.

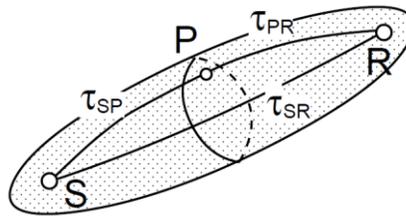


Figura 3.12: Esquema mostrando a abordagem do volume Fresnel, adaptado de (Watanabe, et al., 1999)

A tomografia sísmica usando o *software* Rayfract permite estimar o modelo de velocidades determinando os tempos de propagação das ondas sísmicas, através da resolução da equação Eikonal (Schuster, et al., 1993) por diferenças finitas no processo chamado de Wavepath Eikonal Traveltime inversion (WET). WET, parte de um modelo inicial de velocidade, resolve iterativamente a equação de onda para determinar os tempos teóricos e inverte os dados pela fórmula de retroprojeção. Schuster e Bosz (1993) propuseram o seguinte algoritmo de tomografia:

1. Picagem das primeiras chegadas dos sismogramas  $\tau_{rs}^{obs}$ .
2. Um modelo inicial de velocidades é proposto e a equação eikonal é resolvida pelo método de diferenças finitas (Qin, et al., 1992) para obter os tempos teóricos. E é calculado o tempo de percurso residual  $\Delta\tau = \tau_{rs} - \tau_{rs}^{obs}$
3. A função de fonte de ponderação é avaliada em todos os pontos dentro do meio. Ver eq. 11c (Schuster, et al., 1993).
4. O modelo inicial de velocidades é atualizado e em seguida os passos anteriores são repetidos iterativamente até se atingir o critério de convergência (melhor

ajuste entre os tempos teóricos e observados, isto é minimização da diferença entre estes tempos). O melhor ajuste entre os tempos teóricos e observados é aquele para o qual o RMS é menor.

Em cada iteração, os erros temporais são utilizados para ajustar o modelo de velocidade, minimizando as diferenças entre os tempos calculados e os observados.

### 3.1.2.2. Levantamentos de Sísmica de refração

Como em todos os levantamentos sísmicos, o objetivo é registrar nos sismogramas os movimentos do solo causados por uma fonte em uma localização conhecida. Na sísmica de refração, são analisados os raios refratados nas distintas camadas do terreno. Para isso, a fonte utilizada e os sismômetros devem ser os adequados para tal fim. O arranjo do levantamento sísmico de refração é simples: Sismômetros cravados no solo alinhados na linha de aquisição e a onda sendo gerada em diferentes deslocamentos de igual intervalo ao longo da linha de aquisição. A profundidade de penetração em um levantamento de refração sísmica é de aproximadamente  $1/5$  do comprimento do espalhamento dos geofones, incluindo o “offset” mínimo (comprimento da linha de aquisição).

Os requisitos necessários para levantamento de sísmica de refração são a fonte, os receptores ou geofones e o sismógrafo multicanal (Figura 3.13).



Figura 3.13: Equipamento necessário para levantamento de sísmica de refração. A) Fonte: Marreta de 8 kg. B) Geofone de uma componente (vertical). C) Sismógrafo multicanal.

**Fonte:** A fonte mais usada nos levantamentos de sísmica de refração são as marretas de 6 – 8 Kg e uma placa metálica por ser portáteis e de fácil uso. A profundidade máxima atingida com essa fonte é de 15 a 20 m. Porém, quando a profundidade de pesquisa é

maior do que 20 m, outras fontes podem ser usadas como fontes explosivas ou precursoras de queda livre.

**Sismômetros ou geofones:** Dependem do tipo de onda que quer ser estudado, sendo que os geofones verticais, são mais sensíveis às ondas P e os geofones horizontais são mais sensíveis às ondas S. A frequência de ressonância dos geofones usados para sísmica de refração está entre 4 e 28 Hz.

**Sismógrafo:** O sismógrafo usado pode ser de 12, 24 ou 48 canais, dependendo do tipo de detalhe que seja preciso.

### 3.1.5. Método MASW- Multichannel Analysis of Surface Waves

É um método que utiliza a dispersão de ondas superficiais (Dispersão geométrica) para estudar estruturas e camadas rasas, sendo a onda Rayleigh a mais usada no MASW.

A onda Rayleigh é o resultado da interferência das ondas P e SV e se caracteriza por possuir baixa velocidade, baixa frequência e alta amplitude, é caracterizada por ser dispersiva em espaços não homogêneos. O caráter dispersivo e a relação da velocidade de fase que a onda Rayleigh guarda com a onda S, é o que permite a obtenção de um perfil de velocidade de onda S em meios superficiais a partir da inversão da curva de dispersão.

Originalmente o método foi desenvolvido a partir do estado estacionário da onda Rayleigh (Richart Jr. et al., 1970). Posteriormente introduziu-se o método SASW - Spectral Analysis of Surface Waves (Nazarian et al. 1983; Stokoe et al. 1994), que utiliza dois receptores e uma fonte impulsiva. O método de análise multicanal das ondas de superfície (MASW) foi posteriormente desenvolvido pelo Serviço Geológico do Kansas (KGS) na Universidade de Kansas, baseando-se no trabalho de Song et al. (1989).

O método de análise multicanal das ondas de superfície (MASW) inclui o registro da onda Rayleigh em múltiplos receptores, extração das curvas de dispersão das ondas Rayleigh do diagrama de dispersão e inversão das curvas de dispersão para obtenção de perfis de velocidade de onda S superficiais. As principais vantagens do método MASW são (1) facilidade em reconhecer e interpretar as ondas de superfície (distinguindo os modos fundamentais dos mais altos), (2) a eficácia em eliminar as ondas de corpo, e (3) a

precisão na hora de escolher velocidades de fase e estimar as velocidades de ondas S por inversão. Como destacado por (Park, et al., 2007), a principal vantagem do MASW é a sua capacidade de ter plenamente em conta a natureza complexa das ondas sísmicas que sempre contêm ondas de ruído: como os indesejados modos mais altos de ondas de superfície, ondas de corpo, ondas dispersivas, ondas de tráfego, assim como as ondas de superfície em modo fundamental.

O método MASW pode ser categorizado como ativo ou passivo, dependendo do tipo de fonte usada. O MASW ativo usa fontes sísmicas artificiais como a marreta ou peso caindo, enquanto o MASW passivo, apresentado em 1999 por Miller et al. (1999), usa ondas de superfície geradas num ambiente cultural (e.g., tráfego de carros, trens, metrô, ruído industrial) ou pela natureza (terremotos, trovões, movimentos de maré, mudanças de pressão atmosférica). A profundidade de investigação pode chegar até 30 metros com fontes ativas enquanto com o método passivo chega a poucas centenas de metros, devido à natureza das ondas geradas passivamente que são usualmente de baixa frequência (1–30 Hz) com longitudes de onda oscilando entre de dezenas a centenas de metros, fornecendo uma profundidade alta de investigação (Park, et al., 2007).

#### *3.1.3.1. Levantamento de Análises multicanal de ondas superficiais.*

A aquisição de ondas de superfície MASW depende do tipo de fonte que se utiliza, seja ela ativa ou passiva. Em seguida serão descritos os levantamentos para fontes ativas e passivas separadamente.

##### MASW ativa

O arranjo de aquisição mais comum é composto por receptores verticais uniformemente espaçados alinhados com a fonte sísmica.

A energia gerada da fonte sísmica deve fornecer uma relação sinal-ruído adequada sobre a faixa de frequência requerida, dependendo da profundidade de investigação requerida. O comprimento de onda é uma função da frequência e da velocidade de fase do local, então, em uma área que seja mole, são requeridas frequências mais baixas para atingir a mesma profundidade de investigação do que em uma área rígida. Por isso, é preciso ter em conta a variação de velocidades esperadas para definir a fonte necessária. As fontes de impacto como a marreta permitem uma aquisição de dados eficiente, pois

fornece energia em uma ampla faixa de frequência e são mais baratas do que, por exemplo, as fontes vibratórias. No entanto, sua energia está limitada na banda de baixas frequências (entre 8 e 10 Hz), isso torna a marreta uma fonte útil apenas para comprimentos de arranjos relativamente curtos, sendo assim, existe uma limitação na profundidade de investigação a entre 10 e 20 m no máximo (Foti et al., 2018). Adicionalmente à fonte, um sistema de disparo “trigger system” adequado é necessário quando os dados sísmicos são empilhados durante a aquisição para melhorar a relação sinal/ruído, para tal fim, pode ser usado o interruptor de marreta.

Os receptores usados para a aquisição de dados de ondas de Rayleigh são os geofones verticais. Para profundidades de pesquisa superficiais (até 30 m), os geofones de frequência natural de 4,5 Hz são adequados. Segundo Foti et al. (2018), os geofones de frequência mais alta (por exemplo, 10–14 Hz) não são confiáveis para criar perfis com profundidades maiores do que cerca de 10-15 m.

O arranjo de aquisição é o mostrado na Figura 3.14, e consiste em um arranjo linear que inclui os receptores alinhados entre eles e a fonte. O espaçamento dos receptores ( $\Delta x$ ) é normalmente mantido constante ao longo do arranjo e deve ser adequado para amostrar de forma confiável comprimentos de onda curtos, sendo os valores sugeridos de espaçamento do receptor estão entre 0,5 a 4 m. O comprimento do arranjo ( $L$ ) é definido segundo a necessidade da profundidade de pesquisa requerida.

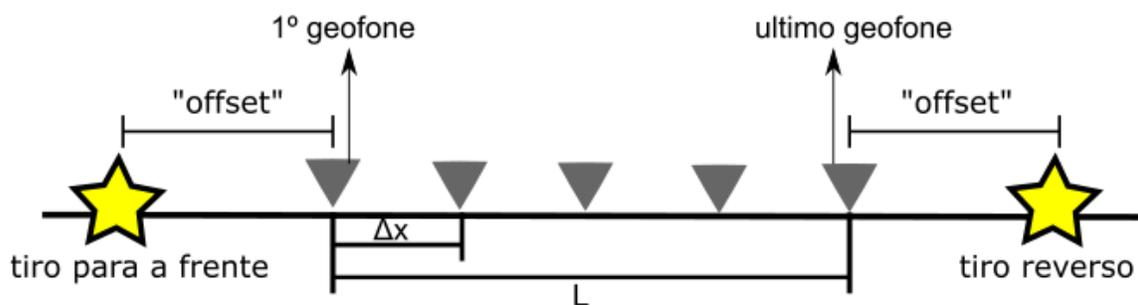


Figura 3.14: Esquema de arranjo linear de aquisição para MASW ativa.

Os parâmetros de aquisição requerem uma janela de tempo longa o suficiente para gravar todo o trem de ondas da superfície. Normalmente 2s é suficiente para a maioria dos arranjos, mas sugere-se usar janelas mais longas quando tiver sedimentos

inconsolidados (formações com baixa velocidade sísmica). Para análise de ondas de superfície em escalas de geo-engenharia, um intervalo de amostragem de 2 ms (frequência de amostragem de 500 Hz) é adequado na maioria das situações. (Foti et al., 2018).

### MASW passiva

A MASW passiva usa ondas de superfície geradas em um ambiente cultural ou pela natureza. Os receptores usados, são os geofones de frequência natural de 4,5 Hz (ou menos) suficientes para investigar grandes profundidades quando o nível de vibração ambiente for alto.

As configurações ou arranjos possíveis são vários e estão apresentados na Figura 3.15. As geometrias 2D sem direção preferencial (por exemplo, circular ou triangular) são altamente recomendadas, uma vez que tem sensibilidade similar do arranjo às frentes de onda que entram em diferentes direções. A abertura do arranjo (distância máxima entre dois receptores) influencia o comprimento de onda máximo medido e, portanto, a profundidade de penetração da medição.

Como parâmetros de aquisição, o intervalo de amostragem no tempo (sampler interval) é menor do que o usado para os dados ativos devido à necessidade de registros de longa duração, as frequências de amostragem típicas usadas variam de 100 a 200 Hz (5-10 ms). A aquisição de dados passivos requer um tempo de duração maior do que aquelas usadas para dados ativos. Registros de longa duração (30 a 120 min) são normalmente coletados e divididos em janelas menores (1 a 5 min) para processamento (Foti et al., 2018).

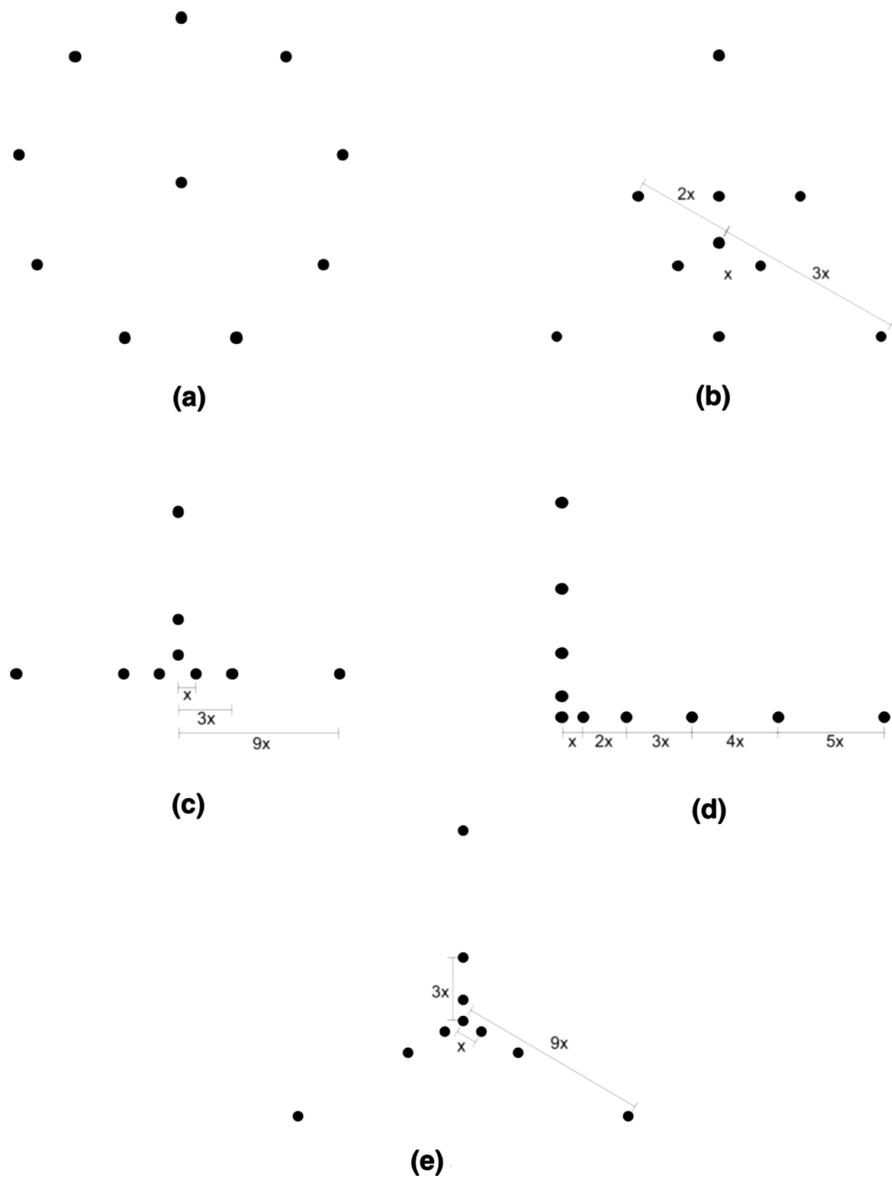


Figura 3.15: Arranjos usados nas aquisições de MASW passiva. Adaptado de Foti et al. (2018).

### 3.1.3.2. Processamento de MASW

O processamento de dados consiste em quatro passos básicos (Figura 3.16):

1. Aquisição de registros multicanal (registro de tiros)
2. Estimativa do modo fundamental das curvas de dispersão (uma curva por cada registro)
3. Inversão das curvas de dispersão para obter o modelo de velocidade 1D (profundidade)
4. Junção dos múltiplos resultados 1D para convertê-los em imagens 2D ou 3D.

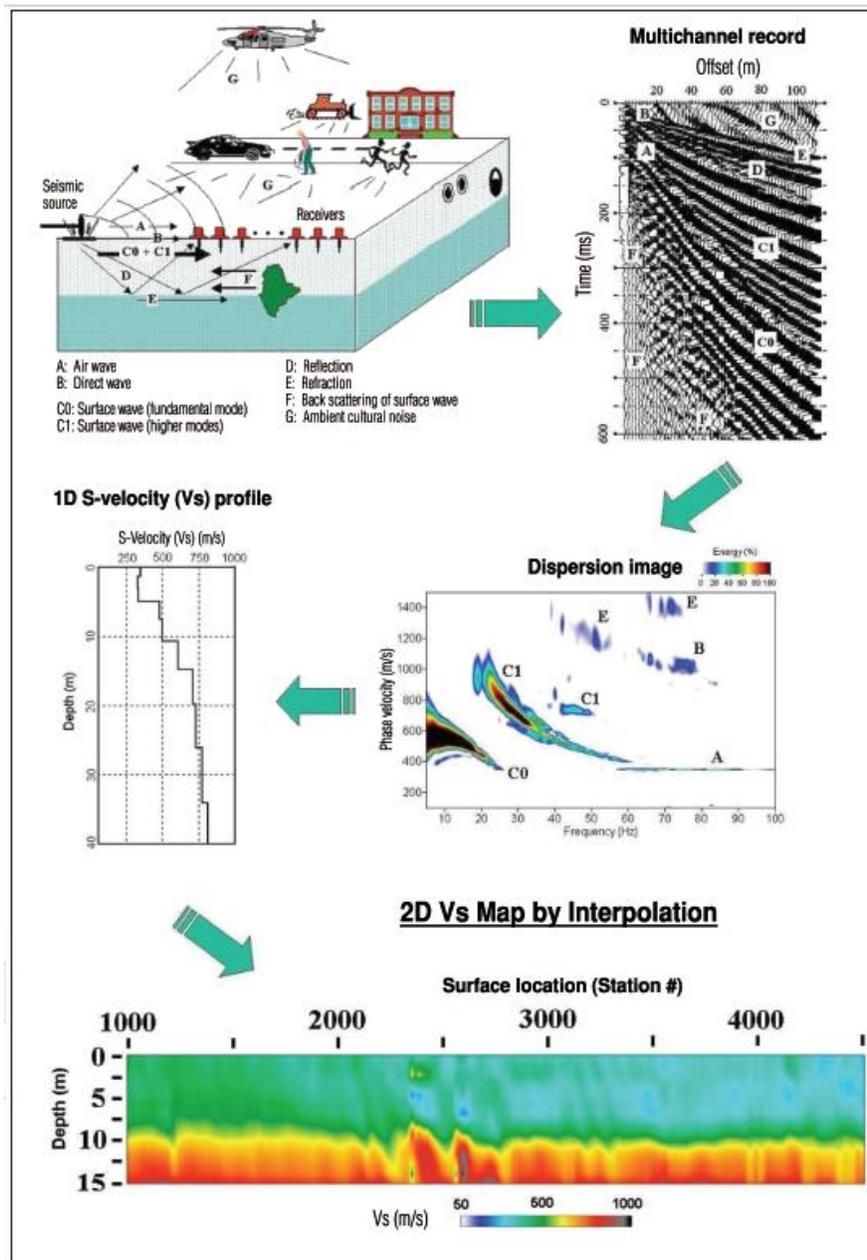


Figura 3.16: Passo a passo do processamento do método MASW, extraído de Park et al., (2007).

### 3.1.3.3. Obtenção da curva de dispersão

Existem várias técnicas de processamento usadas na hora de obter as curvas de dispersão. As técnicas usam a transformação do domínio do tempo para outro domínio. Alguns exemplos de transformadas são: A transformada  $(\rho-\omega)$  slowness-frequency

proposta por (McMechan, et al., 1981), a transformada frequência-número de onda ( $f-k$ ) (Yilmaz, et al., 1987) e a técnica phase-shift proposta por (Park et al. 1998).

A transformada ( $\rho-\omega$ ) slowness-frequency consiste em duas transformações do sismograma ( $x-t$ ). Em primeiro lugar, os dados são decompostos em elementos de velocidade de fase constante através da transformação da série temporal no domínio de fase slowness-time ( $\rho-\tau$ ). Depois a frequência ( $\omega$ ) associada com cada valor de velocidade de fase é obtida aplicando a transformada de Fourier (sobre  $\tau$ ) ao campo de ondas  $\rho-\tau$  (McMechan, et al., 1981).

Na transformada ( $f-k$ ), é aplicada a transformada de Fourier aos dados adquiridos no espaço e no tempo para transformar os traços no domínio do tempo ao domínio da frequência-número de onda ( $f-k$ ). A transformação fornece uma imagem da densidade de energia do registro da onda superficial no domínio  $f-k$  a partir do qual a curva de dispersão da onda de Rayleigh é identificada com base nos máximos espectrais. Subsequentemente, as velocidades de fase são calculadas utilizando a relação  $c = \frac{f}{k}$ , em que  $c$  é a velocidade de fase relacionado com o componente de onda da frequência  $f$  e com número de onda  $k$  (Yilmaz, et al., 1987).

A técnica phase-shift é a técnica utilizada no software Surfseis, e consiste em três passos básicos: i) transformação de Fourier e normalização da amplitude, ii) imagem de dispersão e, iii) extração de curvas de dispersão. Ólafsdóttir, (2016) faz uma extensa explicação dos três passos básicos do procedimento de obtenção da curva de dispersão usando o método phase-shift, baseado no proposto por Park, et al., (1998). Uma breve descrição de cada passo é mostrada em seguida:

### *Etapas da técnica Phase-shift*

#### 1. Transformação de Fourier e normalização da amplitude

- 1.1. É aplicada a transformada de Fourier FFT a cada traço dos  $n$ -canais do registro de ondas superficiais impulsivas ( $u_j(t), j = 1, 2, \dots, N$ ) para descompor os registros em componentes individuais de frequência ( $\tilde{u}_j(\omega), j = 1, 2, \dots, N$ ).

$$u_j(t) \xrightarrow{FFT} \tilde{u}_j(\omega) \quad j = 1, 2, \dots, N$$

- 1.2. A amplitude do registro da transformada de Fourier é normalizado em  $x$  e  $\omega$ . Como o espectro de fase do sinal ( $P_j(\omega)$ ) contém todas as informações sobre as suas propriedades de dispersão, nenhuma informação significativa é perdida.

$$\tilde{u}_{j,norm}(\omega) = \frac{\tilde{u}_j(\omega)}{|\tilde{u}_j(\omega)|} = P_j(\omega)$$

## 2. Imagem de dispersão

- 2.1. É estabelecido uma faixa de velocidade de fase para fazer um teste.

$c_{test}$  = Teste velocidade de fase da onda Rayleigh

$$c_{test,min} \leq c_{test} \leq c_{test,max}$$

- 2.2. Para uma velocidade de fase de teste dada ( $c_{test}$ ) e uma frequência dada ( $\omega$ ), a quantidade de deslocamento de fase necessária para compensar o atraso de tempo correspondente a deslocamentos específicos é determinada.

$$\phi_{test} x_j = \frac{\omega x_j}{c_{test}} = \frac{\omega(x_1 + (j-1)dx)}{c_{test}}$$

- 2.3. Os desvios de fase (para uma dada velocidade de fase de teste) são aplicados aos distintos traços transformados do registro da onda de superfície que depois são adicionados para obter a amplitude empilhada-inclinada (somados) correspondente a cada conjunto de  $\omega$  e  $c_{test}$ .

$$A_s(\omega, c_{test}) = e^{-i\phi_{test}x_1} \tilde{u}_{1,norm}(\omega) + \dots + e^{-i\phi_{test}x_N} \tilde{u}_{N,norm}(\omega)$$

- 2.4. Os passos são repetidos para todos os diferentes componentes de frequência do registro transformado em forma de varrimento, mudando o  $c_{test}$  por pequenos incrementos dentro do intervalo anteriormente especificado (passo 2.1).

## 3. Extração das curvas de dispersão

3.1. O espectro de velocidade de fase (imagem de dispersão) é obtido plotando as amplitudes somadas no domínio de frequência - velocidade de fase, em dois ou três dimensões. Os valores mais altos (bandas de alta amplitude) observados representam as características de dispersão das ondas superficiais.

$$A_s(\omega, c_{test}) \xrightarrow{\text{extração de valores altos}} \text{curva de dispersão de ondas Rayleigh}$$

#### 3.1.3.4. Inversão de dados e obtenção de modelo de velocidades

A análise de inversão envolve a obtenção de um perfil de velocidade de onda cisalhante ( $V_s$ ) por inversão (retro análise) da curva de dispersão experimental. A curva de dispersão teórica é obtida assumindo um número de camadas com espessura e propriedades do material específicas para cada camada. Diferentes conjuntos de parâmetros são inseridos no modelo teórico de uma forma iterativa, em busca da curva teórica de dispersão que seja a mais consistente com a curva de dispersão observada.

A inversão pode ser realizada considerando apenas o modo fundamental de propagação de ondas de Rayleigh, ou incluindo os modos mais elevados. A inversão do modo fundamental é a mais fácil de implementar e, no geral computacionalmente mais eficiente. No entanto, a consideração dos modos mais elevados pode ser de importância, especialmente para camadas de solo onde a velocidade de onda de cisalhamento não aumenta gradualmente com a profundidade (Socco & Strobbia, 2004).

Ambas as abordagens de pesquisa locais e globais podem ser empregadas para caber observações com as previsões teóricas de modelos de solo assumidos. A estrutura das camadas e as propriedades dos materiais que resultam na curva de dispersão teórica que melhor se adapta a curva experimental são tomados como o resultado final (Ólafsdóttir, 2016).

#### 3.1.6. Métodos em furos de sondagem – Crosshole

O ensaio Crosshole é um método geofísico intrusivo que permite determinar as velocidades P e S em furos de sondagem. Pelo menos dois poços revestidos ou não são requeridos para realizar o ensaio. Uma fonte sísmica de ondas P ou S é introduzida em

um furo e os receptores (geofones ortogonais triaxiais) são introduzidos nos outros dois furos. A fonte gera as ondas P ou S e são registradas nos geofones dos furos adjacentes (Figura 3.17). A fonte e os geofones devem ser posicionados na mesma profundidade em cada aquisição. Esse ensaio permite registrar as ondas P e S sem os fenômenos de refração e reflexão, sendo estudada a trajetória das ondas direta entre os furos. Isso permite as ondas sejam identificadas de forma mais precisa.

#### 3.1.4.1. Equipamento

Os equipamentos necessários para desenvolver o teste crosshole consistem em: Fonte de energia, receptores e sismógrafo. Em seguida são descritos os equipamentos requeridos segundo a ASTM D4428 (2000).

##### *Fonte*

As fontes de energia são escolhidas de acordo com as necessidades da pesquisa, sendo a principal consideração o tipo de onda que vai ser adquirida (onda P ou da onda S). A fonte deve ser rica no tipo de energia necessária, sendo que as fontes impulsivas, como explosivos, martelos ou pistolas de ar, são todos geradores aceitáveis de onda P.

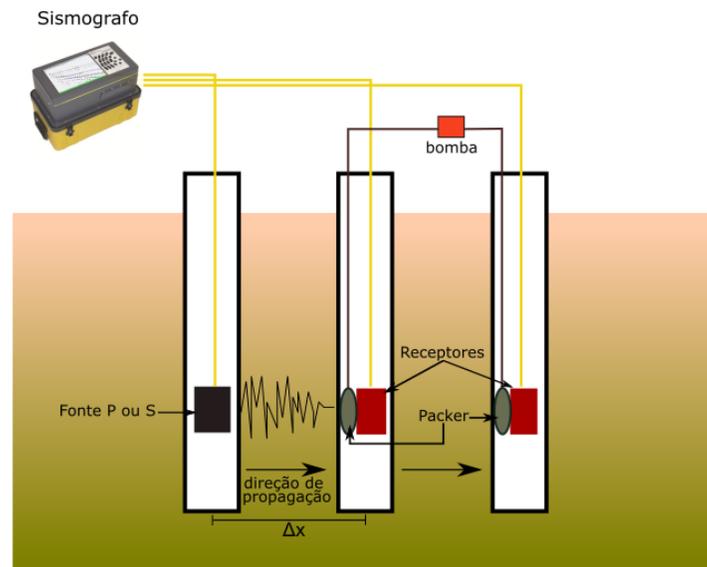


Figura 3.17: Esquema representativo do ensaio crosshole em furos de sondagem.

### *Receptores*

Os receptores destinados a serem utilizados no ensaio crosshole devem ser transdutores com frequência apropriada e características de sensibilidade para determinar a chegada do trem de ondas sísmicas. A resposta de frequência do transdutor ou geofone não deve variar mais de 5% dentro da faixa de frequências de 0.5 a 2 vezes a frequência predominante do trem de onda S específico do local. No caso de requerer registros de ondas P e S, os geofones usados devem ser de três componentes ortogonais sendo uma vertical e duas horizontais montadas em ângulos retos, um para o outro. Neste arranjo triaxial, somente a componente vertical serve para a determinações de chegada de onda S. A chegada das ondas P será determinada usando o geofone de componente horizontal que é orientado quase radialmente à fonte. Se o objetivo for somente medir ondas S, os geofones de componente verticais são suficientes ( ASTM D4428, 2000).

### *Sismógrafo*

O sistema consistirá de amplificadores separados, um para cada transdutor que esteja sendo gravado, com características de fase idênticas e controle de ganho ajustável.

#### *3.1.4.2. Furos de sondagem*

O arranjo preferido para preparar um conjunto de furos para o teste crosshole, são três furos alinhados entre si e separados a uma distância de 3 m de centro a centro de cada furo. No entanto, as velocidades da onda S excederão 450 m/s no caso de materiais aluviais, sendo assim, o espaçamento dos furos pode ser de até 4,5 m ( ASTM D4428, 2000).

Os furos deverão ser perfurados (com o mínimo de perturbação das paredes) em diâmetro não maior do que 165 mm e revestidos com tubo de PVC de parede grossa ou de alumínio. Na perfuração, o prumo deve ser cuidadosamente verificado evitando-se desvios na vertical. A extremidade inferior dos tubos de PVC deverá estar tamponada, garantindo que a calda não penetre em seu interior durante a injeção e permitindo

também a colocação de água no mesmo, sem que está se infiltre pelo solo ( ASTM D4428, 2000).

O espaço anelar entre o furo e o revestimento deverá ser perfeitamente preenchido com calda de cimento ou bentonita, observando o total preenchimento para se evitar a ocorrência de espaços vazios entre as paredes do PVC e do furo. Desta forma, garante-se um bom acoplamento mecânico. A calda deverá ser injetada cuidadosamente e com pressão apenas o suficiente para deslocar água e detritos existentes no espaço anelar. A injeção será terminada quando a calda começar a fluir na boca dos furos. O preenchimento deverá ser preferencialmente de baixo para cima. Neste caso, a mangueira de injeção deve ser introduzida junto com o tubo no momento do revestimento do furo ( ASTM D4428, 2000).

#### *3.1.4.3. Processamento de dados*

O processamento de dados sísmicos crosshole é simples, baseado no reconhecimento das ondas P nos sismogramas das componentes horizontais e as ondas S nos sismogramas da componente vertical.

Para identificar a onda P na componente horizontal, deve ser identificada a primeira chegada do trem de ondas. Para a identificação das ondas S, devem ser notados dois aspectos: i) um súbito aumento na amplitude de pelo menos duas vezes a do trem de onda P; ii) Uma mudança brusca na frequência coincidindo com a mudança de amplitude que resulta em um aumento de pelo menos duas vezes o período característico da onda P. Se a fonte de onda S usada é de polaridade reversível, outro critério adicional é quando ocorre uma mudança de polaridade de 180° nos sismogramas dos tiros reversos (para cima e para baixo).

### **3.2. MÉTODOS ELÉTRICOS**

Nessa seção serão apresentados os fundamentos teóricos dos métodos de Eletrorresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP), assim como a aplicação deles.

### 3.2.1. Condutividade Elétrica em solos ou rochas

Existem três mecanismos possíveis de condução elétrica nas rochas ou solos: Condutividade eletrônica, condutividade iônica ou eletrolítica e condutividade dielétrica (Telford, et al., 1990).

A *condutividade eletrônica* ocorre com o transporte de elétrons na matriz da rocha, sendo a sua resistividade governada pelo modo de agregação dos minérios e o grau de impurezas.

A *condutividade eletrolítica* se dá com o deslocamento dos íons existentes nos líquidos contidos nos poros do solo ou rocha, sedimentos não consolidados ou fissura das rochas. No geral as rochas não são boas condutoras, entretanto por serem porosas, a condução de corrente acontece pela condutividade iônica principalmente.

A *condutividade dielétrica* se deve ao deslocamento de elétrons atômicos em relação ao seu núcleo, este tipo de condutividade acontece em materiais isolantes ou mau condutores.

A maior parte dos minerais formadores de rochas é isolante, fazendo com que a corrente elétrica seja conduzida principalmente pelos íons nas águas armazenadas nos poros. A porosidade é então um dos principais determinantes da resistividade das rochas, fazendo com que ao diminuir a porosidade a resistividade aumente. Entretanto, rochas cristalinas com porosidade intergranular insignificante realizam a condução elétrica por meio das fraturas e fissuras. Outros fatores, não menos importantes, que determinam a resistividade da rocha são: a resistividade dos minerais formadores, a resistividade dos líquidos nos poros, umidade e porosidade da rocha, quantidade e natureza dos sais dissolvidos entre outros. Devido a esses fatores os valores de resistividades em rochas tem uma alta variação, por exemplo, os valores para argila saturada não serão os mesmos que para uma argila seca (Telford, et al., 1990).

### 3.2.2. Eletroresistividade

O método de eletroresistividade consiste em medir o potencial gerado quando é aplicada uma corrente elétrica artificial no solo. Medindo a diferença de potencial e a corrente aplicada é possível calcular a resistividade ou seu inverso, a condutividade do solo.

Para analisar como é o fluxo de corrente no solo homogêneo, vamos considerar um eletrodo de corrente na superfície de um meio com resistividade homogênea  $\rho$  onde a corrente viaja radialmente numa superfície semiesférica de área  $2\pi r^2$  (Figura 3.18).

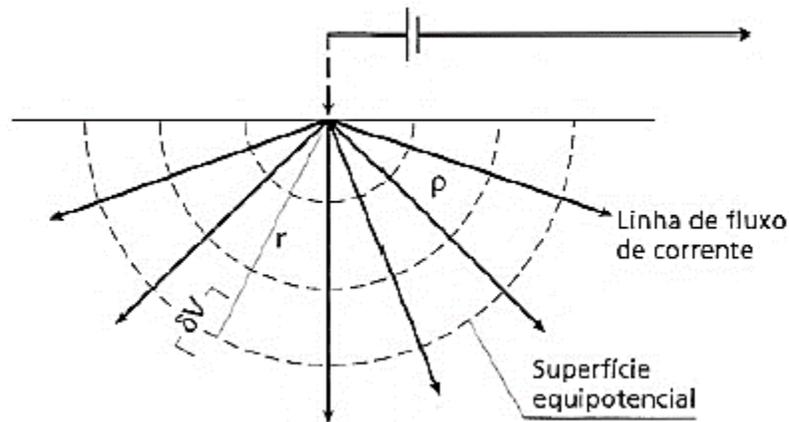


Figura 3.18: Fluxo de corrente de um único eletrodo na superfície, adaptado de Kearey , et al., (2009).

A densidade de corrente  $\mathbf{J}$  é a corrente  $I$  dividida pela área da semiesfera:  $J = I/2\pi r^2$ . A lei de Ohm pode ser escrita como:

$$\rho = E/J = -\delta V/J \quad (3.22)$$

onde  $E$  é o campo elétrico produzido pelo eletrodo de corrente. A diferença de potencial  $\delta V$  pode ser escrita como:

$$\frac{\delta V}{\delta r} = -\frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (3.23)$$

E a voltagem  $V$  sentida a uma distância  $r$  da fonte está dado pela integral da expressão (3.23) :

$$V = \int \delta V = -\int \frac{\rho I}{2\pi r^2} \delta r \quad (3.24)$$

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r}$$

No caso em que a corrente elétrica é aplicada em dois eletrodos denominados eletrodos de corrente A e B e o potencial é medido nos eletrodos de potencial M e N (Figura 3.19), com a Equação ( 3.24 ) é possível calcular a diferença de potencial entre M e N.

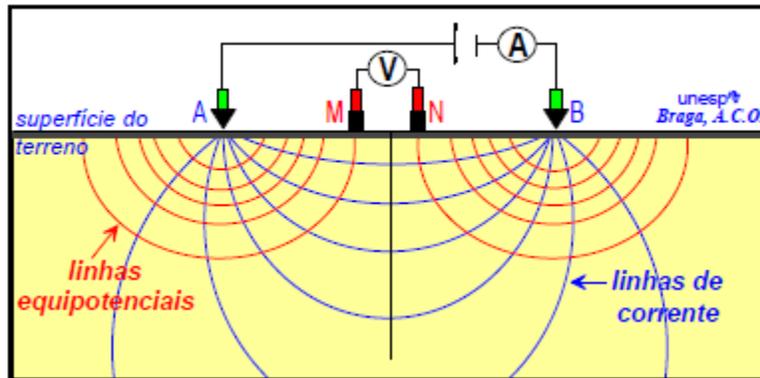


Figura 3.19: Esquema generalizado de configuração de eletrodos para levantamentos de eletrorresistividade. Adaptado Braga, (1999).

Os potenciais medidos nos eletrodos M e N devido aos eletrodos A e B são respectivamente:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) \quad (3.25)$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \quad (3.26)$$

onde AM, MB, AN e NB são as distâncias entre os respectivos eletrodos. A diferença de potencial medido entre M e N é então a diferença entre as equações ( 3.25) e ( 3.26):

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right\} \quad (3.27)$$

Com a diferença de potencial medida entre M e N, equação ( 3.27 ), é possível calcular a resistividade aparente das camadas na Terra, usando a seguinte relação:

$$\rho_a = \frac{K\Delta V}{I} = KR \quad ( 3.28 )$$

Onde  $\rho_a$  é a resistividade elétrica,  $\Delta V$  é a diferença de potencial medida entre os eletrodos de potencial M e N,  $I$  a intensidade de corrente dos eletrodos A e B e  $R$  a resistência,  $K$  é o fator geométrico que depende da disposição do arranjo é calculado usando a seguinte equação que é a mesma expressão em colchetes da equação ( 3.27 ):

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) + \left(\frac{1}{BM}\right) + \left(\frac{1}{BN}\right)} \quad ( 3.29 )$$

A resistividade aparente então é influenciada por todas as resistividades verdadeiras das camadas atravessadas pelo fluxo de corrente em subsuperfície.

### 3.2.3. Polarização Induzida

O fenômeno de polarização induzida consiste em que após a interrupção de uma corrente elétrica contínua aplicada no solo, observa-se que o potencial elétrico gerado pela corrente não decai instantaneamente para zero e sim em um tempo finito já que o solo atua como um capacitor. De igual maneira, quando a corrente é ligada, existe um tempo para chegar à máxima voltagem. Esse fenômeno foi observado por primeira vez por Conrad Schumberger em 1912, quando ao realizar trabalhos geoeletricos em áreas próximas a um jazimento de sulfetos, observou que ao desligar a corrente elétrica o campo elétrico criado no subsolo não desaparecia instantaneamente, mas sim levava um tempo para sumir.

#### *Origem do fenômeno de polarização induzida*

Vários autores coincidem em afirmar que as causas exatas de ocorrência do fenômeno IP não são muito claras (Braga,1999 e Reynolds, 2011). Entretanto existem dois mecanismos físico-químicos que são relativamente bem entendidos e que seriam a causa do fenômeno observado: i) a polarização de membrana ocorre devido a variações na mobilidade de íons nos fluidos através da estrutura da rocha e ii) a polarização de eletrodo

é devida a variações entre a condutividade iônica e eletrônica na presença de minerais metálicos (Telford, et al., 1990).

### *Polarização de eletrodo*

A polarização de eletrodo acontece quando há presença de minerais metálicos na rocha e o fluxo de corrente é eletrônico e eletrolítico ao mesmo tempo. Nas rochas a corrente é conduzida principalmente pelo movimento dos íons nas águas subterrâneas que fluem dentro dos poros e nas fraturas das rochas. Quando um grão eletricamente condutor bloqueia o fluxo de íons, as cargas se acumulam, isto faz com que se oponha o fluxo de corrente e que o grão fique eletricamente polarizado criando uma diferença de potencial através do grão (Figura 3.20 B). Quando se desligada a voltagem aplicada, os íons voltam ao meio eletrolítico e a diferença de potencial no grão se reduz a zero em um tempo finito, dando o característico decaimento de sobrevoltagem medido no domínio de tempo (Reynolds, 2011).

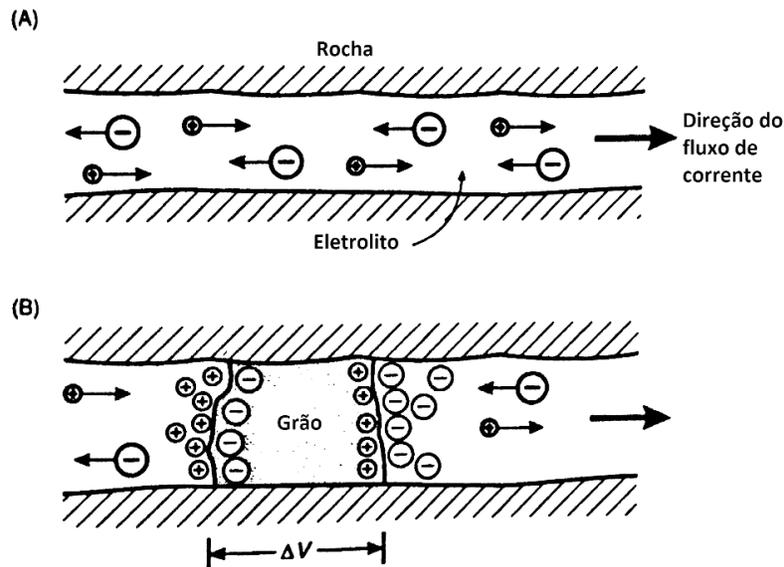


Figura 3.20: Polarização de eletrodo. (A) Fluxo eletrolítico sem restrições em um canal aberto. (B) Polarização do grão eletricamente condutor, bloqueando o canal. Modificado de Reynolds (2011).

### *Polarização de Membrana*

A condução eletrolítica é a principal forma de condução em rochas, portanto, para ter esse tipo de condução a estrutura das rochas deve ser porosa para permitir o fluxo de corrente quando minerais metálicos não estão presentes na rocha. A maioria dos minerais das rochas tem uma carga elétrica negativa na interface entre a superfície da rocha e os fluidos nos poros, causando que os íons positivos sejam atraídos pela interface e os negativos sejam repelidos. Essa concentração de íons positivos pode estar concentrada em uma camada de até 100  $\mu\text{m}$ . Se o poro for dessa magnitude, quando um potencial for ligado os íons negativos serão acumulados em uma borda do poro e os positivos em outra (Figura 3.21 A). Como resultado desta distribuição de polarização, o fluxo de corrente é impedido. Depois quando a corrente for desligada, os íons voltarão a suas posições iniciais tomando um tempo finito para realizar esse processo (Reynolds, 2011).

O efeito da polarização por efeito de membrana fica mais evidente na presença de minerais de argilas, cujos poros são particularmente pequenos e com uma carga negativa. Íons positivos são atraídos pelas partículas de argila produzindo uma nuvem de cargas positivas dentro dos poros. Quando a voltagem é aplicada, as cargas positivas conseguem se movimentar nessa nuvem de cargas, mas as cargas negativas são bloqueadas, produzindo uma diferença na concentração iônica (Figura 3.21 B). Quando desligada a voltagem, os desequilíbrios nas concentrações iônicas decaem ao nível normal por difusão, causando uma resposta IP mensurável.

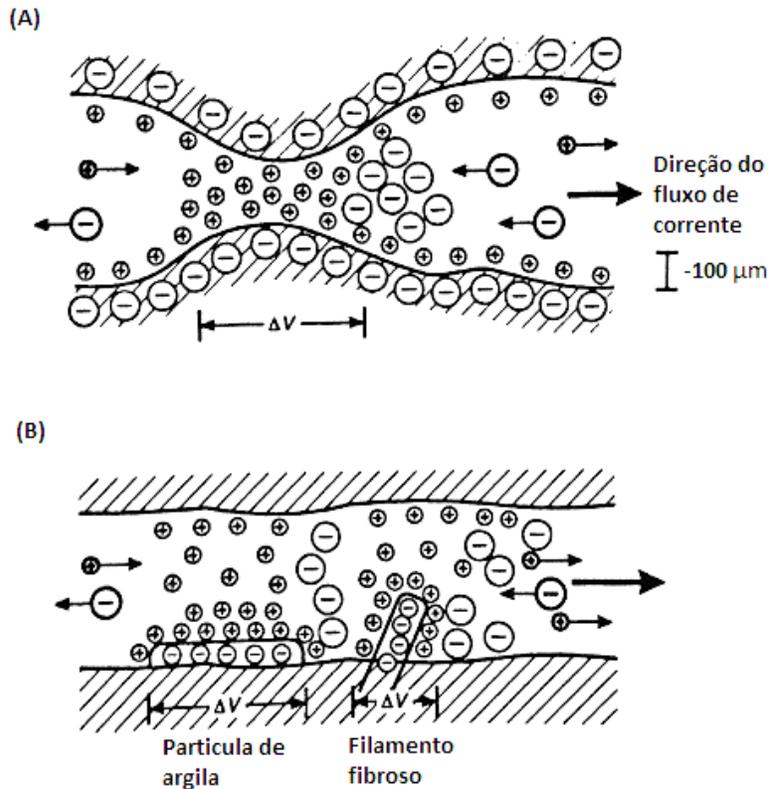


Figura 3.21: Polarização de membrana. (A) Devido a obstrução dos poros. (B) Devido às cargas negativas das partículas de argila. Modificado de Reynolds, (2011).

### Processos de medidas de IP

As medidas de IP são realizadas utilizando as configurações convencionais de resistividade elétrica, com dois eletrodos de corrente e dois eletrodos de potencial não polarizáveis. A polarização induzida pode ser medida como uma variação de voltagem em função do tempo ou da frequência. Quando medida em função do tempo é chamada de *domínio no tempo*, quando medida em função de duas frequências é chamada de *domínio da frequência*.

### Domínio do tempo

Nas medições no domínio do tempo, quando a corrente é aplicada ao solo, a magnitude total da voltagem observada ( $V_0$ ) é equivalente à voltagem ( $V$ ) devida a corrente aplicada mais a voltagem de polarização ( $V_p$ ) causada pelo processo de polarização. Quando desligada a corrente, a voltagem decai instantaneamente a quantidade  $V$  deixando a

voltagem residual  $V_p$  que decai em um tempo finito e medível. Uma medida do efeito IP é a *cargabilidade* ( $M$ ) que é a relação  $V_p/V_0$  e é medida em mV/V ou em porcentagem.

O valor  $V_p$  no geral é medido 0.5s depois de desligada a corrente e por períodos de 0.1s em intervalos de tempo discretos (~0.5s). A integral desses valores com relação ao tempo, fornece a área sob a curva ( $A$ ) que é um dos jeitos de medir a curva de decaimento (Figura 3.22). Quando a integral é dividida por  $V_0$  o resultado é chamado de *cargabilidade aparente*, e tem unidades de tempo (ms).

$$M_a = \frac{1}{V_0} \int_{t_1}^{t_2} V_p(t) dt = \frac{A}{V_0} \quad ( 3.30 )$$

### *Domínio da frequência*

As técnicas no domínio da frequência consistem em medir a resistividade aparente em duas ou mais frequências AC menores do que 10 Hz para permanecer nas regiões não indutivas (e.g. 0.1 e 5 Hz ou 0.3 e 2.5 Hz). Nessa técnica são usados os mesmos arranjos de campo que os utilizados no domínio do tempo ou eletrorresistividade.

A resistividade aparente medida a baixa frequência ( $\rho_{bc}$ ) é maior do que a medida em uma frequência maior ( $\rho_a$ ). Para tempo de cargas curtos (frequência alta) a sobrevoltagem  $V_{pa}$  medida é apreciavelmente menor do que o obtido em tempos de carga cumpridos ou frequências baixas ( $V_{pb}$  e  $V_{pc}$ ) como observado na Figura 3.23.

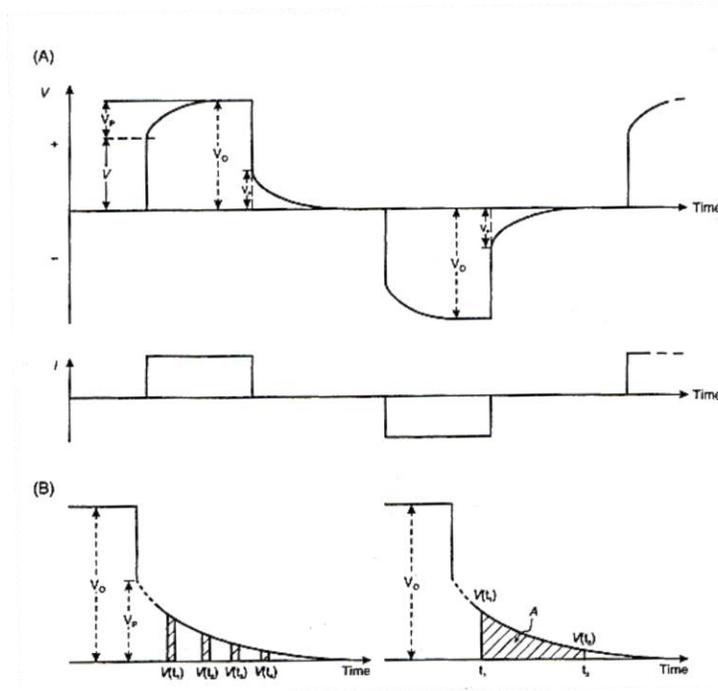


Figura 3.22: (A) Aplicação do pulso de corrente com polaridade alternada e a medição de voltagem mostrando o efeito de sobretensão ( $V_p$ ). (B) As duas formas de medir a sobretensão, por discretização do tempo  $V(t_n)$  e pela área sob a curva (A). (Reynolds, 2011).

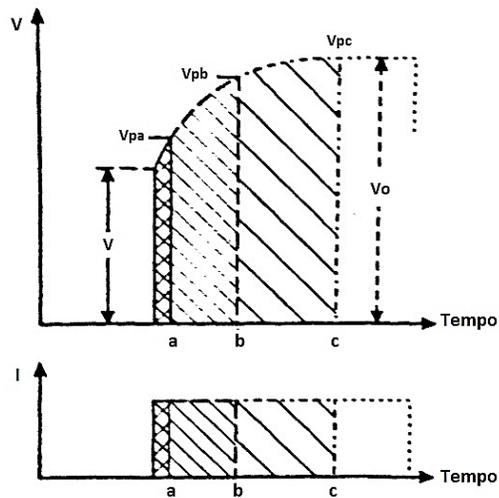


Figura 3.23: Ao incrementar o tempo de carga (a - c), decresce a frequência de medida e o efeito de sobretensão aumenta. Resultando em aumento de resistividade. Modificado de Reynolds (2011).

Sendo a longitude de decaimento muito curta para ser determinada, então a amplitude total de voltagem é medida em relação à corrente aplicada dando um valor de resistência (R) que quando multiplicado pelo fator geométrico dá a resistividade aparente. Quanto menor o tempo de carga maior é a frequência e por tanto a resistividade aparente é maior do que a observada em uma frequência alta ( $\rho_{a0} \geq \rho_{a1}$ ). As duas resistividades aparentes são usadas para determinar o efeito de frequência (FE) e o efeito percentual de frequência (PFE).

$$FE = (\rho_{a0} - \rho_{a1}) / \rho_{a1} \quad (3.31)$$

$$PFE = 100 (\rho_{a0} - \rho_{a1}) / \rho_{a1} \quad (3.32)$$

O fator metálico MF normaliza o PFE com respeito à resistividade das frequências mais baixas e, portanto, remove até certo ponto a variação do efeito IP com a resistividade efetiva da rocha hospedeira (Reynolds, 2011).

$$MF = 2\pi \times 10^5 \frac{(\rho_{a0} - \rho_{a1})}{\rho_{a0} \rho_{a1}} \quad (3.33)$$

### 3.2.4. Aplicação de eletrorresistividade e polarização induzida

Na prática a aplicação dos métodos de eletrorresistividade e polarização induzida compartilham as mesmas técnicas de aplicação, os arranjos usados e até o equipamento usado que vem com a possibilidade de fazer medições de ER e IP conjuntamente. Nessa seção são apresentadas as técnicas de aplicação, arranjos e equipamento usados para os dois métodos.

#### 3.2.4.1. Técnicas de aplicação para os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida

Os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida permitem várias técnicas para a execução dos ensaios geofísicos. São elas: as técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico (CE). Com os dados obtidos através das SEVs é possível

investigar o subsolo verticalmente. Já com os dados de um CE é possível mapear o subsolo em profundidade e lateralmente (imageamento 2D). Com uma série de seções 2D paralelas é possível realizar uma interpretação 3D.

### *Sondagem Elétrica Vertical (SEV)*

É usada principalmente no estudo de interfaces horizontais ou até 30% de inclinação das camadas. Os eletrodos de corrente e potencial são mantidos no mesmo espaçamento relativo, e o arranjo todo é progressivamente expandido ao redor de um ponto fixo central. A técnica é muito usada em levantamentos geotécnicos para determinar espessuras de sobrecarga e em hidrogeologia para definir zonas horizontais de estratos porosos. A profundidade teórica alcançada pela técnica é  $AB/4$  sendo  $AB$  a distância entre os eletrodos de corrente.

Os valores de resistividade ou cargabilidade obtidos são plotados em relação aos valores da abertura ( $AB/2$  para o caso de arranjo Schlumberger) usando escala logarítmica, fornecendo as curvas de resistividade ou cargabilidade aparente para depois ser interpretada quantitativamente.

### *Caminhamento elétrico (CE)*

É usado para determinar variações laterais de resistividade. Os eletrodos de corrente e de potencial são mantidos a uma separação fixa e progressivamente movidos ao longo do perfil. Essa técnica é usada em prospecção mineral para localizar falhas ou zonas de cisalhamento e para detectar corpos localizados de condutividade anômala. Na Figura 3.24 é apresentado um esquema de como é feito o caminhamento elétrico usando o arranjo dipolo-dipolo.

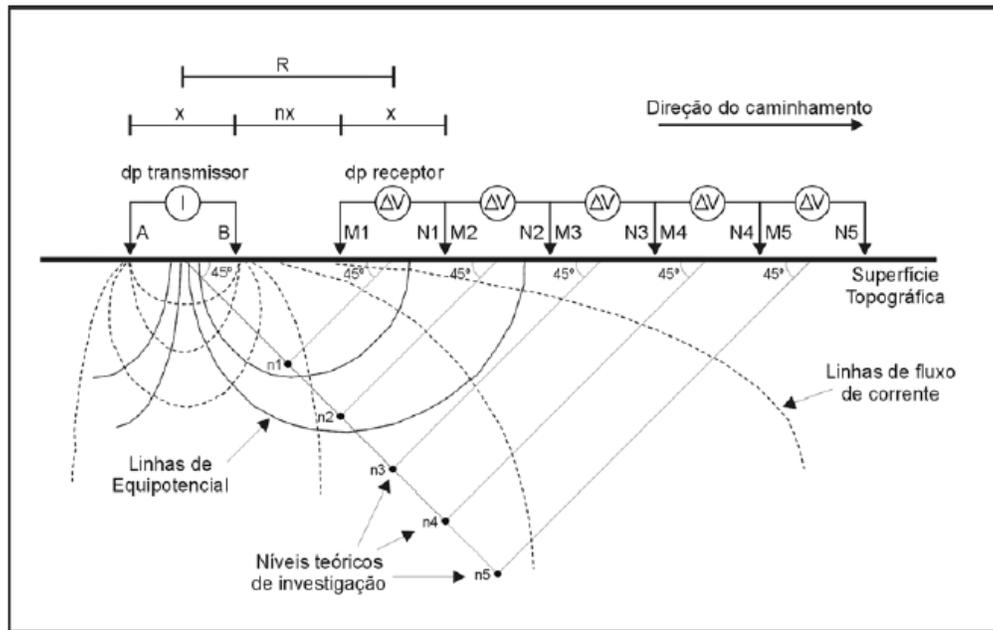


Figura 3.24: Esquema de caminhamento elétrico utilizando o arranjo dipolo-dipolo. Adaptado de Elis (1998).

### 3.2.4.2. Arranjos de eletrodos

Existe uma grande variedade de configurações possíveis de eletrodos, o que confere ao método grande versatilidade. Três dos arranjos mais utilizados atualmente são o Wenner, Schlumberger e Dipolo-dipolo (Figura 3.25). Todos eles dispõem de quatro eletrodos sendo dois para injetar a corrente (A e B) e dois para realizar a leitura do potencial (M e N). As medidas obtidas são para o centro geométrico dos arranjos.

Os arranjos mais usados na técnica de SEV são o Schlumberger e o Wenner. O arranjo Schlumberger tem a vantagem de que só necessitam ser deslocados dois eletrodos e não os 4 como no arranjo Wenner. Ademais, junto com a possibilidade de fazer embreagem, que é quando o sinal  $\Delta V$  medido é muito fraco, a distância entre M e N é aumentada deixando constante a distâncias entre A e B e mantendo a relação  $a \geq 5b$ . A embreagem permite checar a qualidade dos dados durante o ensaio de campo (Elis, 2002).

Na técnica de caminhamento elétrico, o arranjo mais usado é o dipolo-dipolo, devido a sua rapidez para ser executado no campo. Além disso, esse arranjo permite obter um varrido lateral em níveis de profundidades, permitindo caracterizar a subsuperfície tanto

horizontalmente como verticalmente (Figura 3.24). O nível teórico de investigação usando nesse arranjo é  $z = \frac{R}{2}$  sendo, R a distância entre o ponto médio dos eletrodos de corrente e o ponto médio entre os dois eletrodos de potencial. As medidas são efetuadas para vários níveis de profundidade ( $n=1,2,3, \dots$ ) atribuídas a interseção das linhas que partem do centro de AB e MN com ângulos de  $45^\circ$ . A cada ponto de medida os eletrodos são deslocados uma distância  $a$  os dados obtidos são plotados nas posições de  $n$  níveis e interpolados gerando uma seção de resistividade ou cargabilidade aparente.

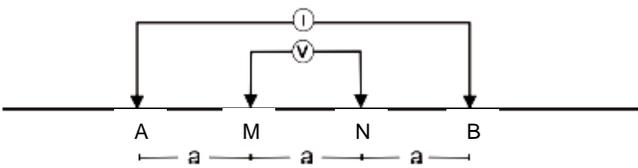
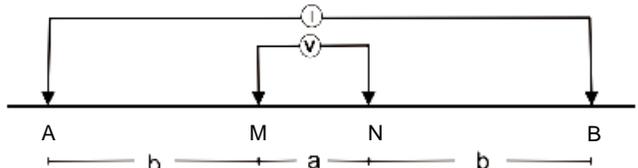
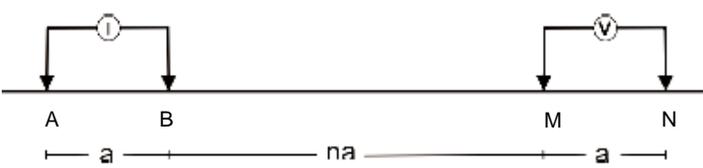
	<p><b>Wenner</b></p> $K = 2\pi a$ $\rho_a = 2\pi a R$
	<p><b>Schlumberger</b></p> $K = \pi b(b + 1)a$ $\rho_a = \frac{\pi a^2}{b} \left[ 1 - \frac{b^2}{4a^2} \right] R$ $a \geq 5b$
	<p><b>Dipolo-Dipolo</b></p> $K = \pi n(n + 1)(n + 2)a$ $\rho_a = 2\pi n(n + 1)(n + 2)aR$

Figura 3.25: Arranjos de eletrodos mais usados com a respectiva constante geométrica ( $K$ ) e resistividade aparente ( $\rho_a$ ).

### 3.2.5. Equipamento de medida

O equipamento consiste em uma fonte controlada de emissão de corrente elétrica e os medidores da diferença de potencial e corrente. Existem resistímetro, como mostrado na Figura 3.26, que já possuem na mesma unidade o sistema de emissão e recepção. A

corrente emitida pode variar entre 5 e 500 mA e pode ser continua ou alternada de baixa frequência. A voltagem registrada pode variar entre 10 mV e 20 V.



Figura 3.26: Resistivímetro marca Iris, modelo Syscal R1.

### 3.2.6. Software RES<sub>2</sub>DINV

O software usado para analisar os dados obtidos nesse projeto é o RES<sub>2</sub>DINV. Esse software automaticamente determina modelos 2-D de resistividade e cargabilidade de dados obtidos de caminhamentos elétricos.

O programa de inversão usa um modelo de blocos retangulares de tamanho igual à metade da separação mínima de eletrodos, e com profundidade determinada pela profundidade máxima de investigação do arranjo usado (Figura 3.27). O modelo inicial é modificado iterativamente bloco por bloco até que a diferença entre a resposta do modelo e os dados observados seja mínima. O método de inversão usado é baseado no método de mínimos quadrados com suavidade restrita e método de elementos finitos. Uma medida da diferença entre o modelo e os dados observados é o erro RMS (*root mean square*). Isso não significa que quanto menor o erro melhor será o modelo já que esse modelo é um modelo geológico confiável ou real. O erro RMS depende do número de iterações, sendo o prudente escolher o número de interações entre 3 e 5 para obter modelos confiáveis (Loke, 2003).

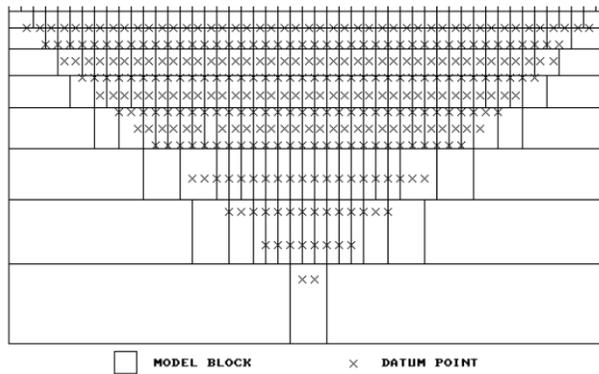


Figura 3.27: Disposição dos blocos utilizados no modelo em conjunto com os dados obtidos na pseudoseção usado no programa RES2DINV adaptado de (Loke, 2004).

### Método de suavização por mínimos quadrados

A seguinte explicação dos métodos de inversão usados pelo programa RES2DINV é baseada no tutorial do programa (Loke, 2004).

Em todos os métodos de otimização, um modelo inicial é modificado de maneira iterativa com o objetivo de achar um modelo em que a diferença entre ele e os dados observados seja mínima. Na inversão de resistividade, a área estudada é parametrizada dividindo o modelo em um número de blocos com resistividade constante. O conjunto de dados observados pode ser escrito como um vetor coluna  $y$  de  $m$  elementos que são o número de medidas. O modelo de resposta pode ser escrito em um vetor  $f$  e o modelo de parâmetros pode ser escrito em um vetor  $q$  de  $n$  elementos, sendo  $n$  o número de parâmetros do modelo. As diferenças entre o modelo de resposta e os dados observados é:

$$g = y - f \quad (3.34)$$

No método de otimização de mínimos quadrados, o modelo inicial é modificado de tal forma que a soma do erro quadrático  $E$  da diferença entre a resposta do modelo e os valores dos dados observados é minimizada:

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (3.35)$$

Para reduzir o valor do erro, é usada a equação de Gauss-Newton par determinar a mudança no modelo de parâmetros que reduz a soma do quadrado do erro:

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} \Delta \mathbf{q}_i = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (3.36)$$

onde  $\Delta \mathbf{q}$  é vetor de mudança dos parâmetros,  $\mathbf{J}$  é a matriz Jacobiana (m×n) de derivadas parciais, os elementos da matriz jacobiana estão dados por  $J_{ij} = \partial f_i / \partial q_j$ , que é a mudança na i-ésima resposta devido à mudança no j-ésimo parâmetro do modelo. Após calcular o vetor de mudança dos parâmetros é obtido um novo modelo:

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (3.37)$$

Na prática, a equação (3.36) é raramente usada em inversão geofísica porque em algumas ocasiões apresenta um problema mal posto, não tendo assim, uma solução para  $\Delta \mathbf{q}$  ou dando uma resposta não realista. A solução é impor uma restrição a  $\Delta \mathbf{q}$  para estabilizar o processo de inversão, a saber:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}) \Delta \mathbf{q}_k = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (3.38)$$

onde  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade e  $\lambda$  é o *damping fator* que tem a função de contrair a variação do vetor de parâmetros  $\Delta \mathbf{q}$ .

Quando o número de parâmetros é grande, como no caso de inversão de resistividades 2D e 3D, o modelo produzido pela eq. (3.37) pode dar uma distribuição de resistividade irregular com zonas falsas de alta ou baixa resistividade. Para melhorar esse problema a equação de Gauss-Newton de mínimos quadrados é modificada para minimizar as variações espaciais no modelo de parâmetros. Esse é o chamado método de suavização por mínimos quadrados e tem a forma:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{F}) \Delta \mathbf{q}_k = \mathbf{J}^T \mathbf{g} - \lambda \mathbf{F} \mathbf{q}_k \quad (3.39)$$

onde  $\mathbf{F} = \alpha_x \mathbf{C}_x^T \mathbf{C}_x + \alpha_y \mathbf{C}_y^T \mathbf{C}_y + \alpha_z \mathbf{C}_z^T \mathbf{C}_z$  e  $\mathbf{C}_x \mathbf{C}_y \mathbf{C}_z$ , são as matrizes de suavização nas direções x, y e z respectivamente. A abordagem utilizada no software RES2dinv com inversão suave é a dada na equação (3.39) (Loke, 2004).

### *Método de inversão Robusto*

A equação (3.39) tenta minimizar o quadrado das mudanças espaciais do modelo de valores de resistividade, tentando produzir um modelo com variação suave de valores de resistividade. Essa abordagem é aceitável quando a subsuperfície estudada tem valores de resistividade que variam gradativa e suavemente. Na realidade geológica existem regiões que possuem limites abruptos entre as fronteiras, para esses casos o método de inversão robusta tem resultados melhores.

O modelo de inversão robusto realiza uma modificação na equação (3.39) de tal jeito que minimize a diferença absoluta entre os dados medidos e os calculados ao invés do quadrado da diferença como feito na eq. (3.39). A equação modificada fica:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{F}_R) \Delta \mathbf{q}_k = \mathbf{J}^T \mathbf{R}_d \mathbf{g} - \lambda \mathbf{F}_R \mathbf{q}_k \quad (3.40)$$

onde  $\mathbf{F}_R = \alpha_x \mathbf{C}_x^T \mathbf{R}_m \mathbf{C}_x + \alpha_y \mathbf{C}_y^T \mathbf{R}_m \mathbf{C}_y + \alpha_z \mathbf{C}_z^T \mathbf{R}_m \mathbf{C}_z$  ;  $\mathbf{R}_m$  e  $\mathbf{R}_d$  são matrizes de peso introduzidas de modo que os diferentes elementos dos vetores de desajuste de dados e modelo de rugosidade são dados em pesos iguais do processo de inversão.

## Capítulo 4 - Material e métodos

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

Para realizar o estudo das propriedades geomecânicas dos RSU, foram estudadas duas áreas. A primeira área é uma célula experimental de grandes dimensões construída no Aterro Sanitário Delta A na cidade de Campinas no estado de São Paulo e a segunda área é o Lisímetro L1 construído na Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. As duas áreas estudadas armazenam o mesmo tipo de resíduos, RSU gerados da cidade de Campinas e classificados como Classe II-A e II-B, de acordo com a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), que inclui resíduos não perigosos inertes e não inertes.

A cidade de Campinas situa-se em uma região de transição entre os climas tropicais ao norte e subtropicais ao sul, com muitas fontes classificando-a como tendo um clima subtropical úmido ou classificado como tropical de altitude (Cwa), com precipitação média anual de 1350 mm e uma temperatura média de 20,7 °C. Na Figura 4.1 é apresentado o comportamento anual da chuva e da temperatura em Campinas, com valores calculados a partir de uma série de dados de 20 anos observados.

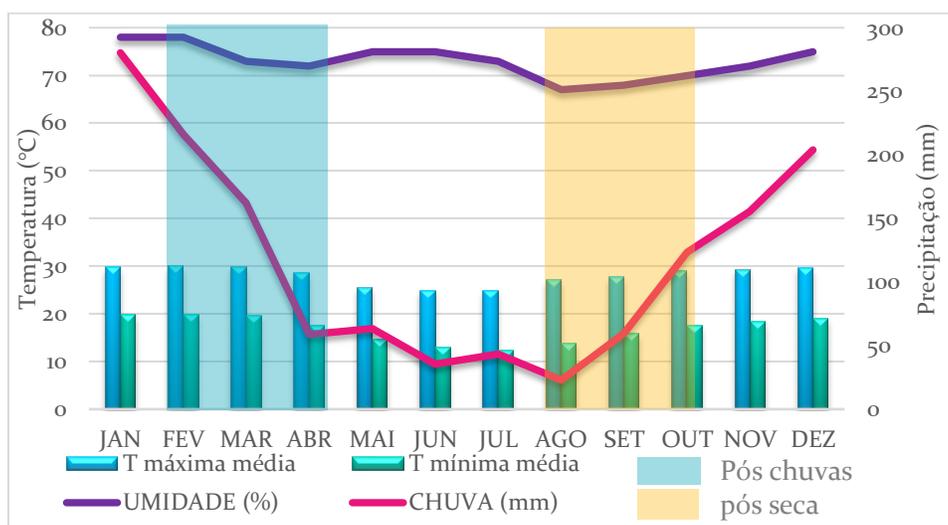


Figura 4.1: Comportamento da chuva e da temperatura ao longo de um ano na região de Campinas-SP. Os valores foram calculados a partir de uma série de dados de 20 anos no período de junho/1988 a outubro/2008. Obtido do CEPAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura.

Em seguida são apresentadas as características e os aspectos técnicos da construção da célula experimental no Aterro Delta A e do lisímetro L1.

#### 4.1.1. Célula experimental- aterro sanitário Delta A

Para estudar as propriedades geomecânicas dos RSU, no município de Campinas, SP foi construída uma célula experimental de grandes dimensões dentro do Aterro Sanitário Delta A (Figura 4.2). A célula experimental construída em 2012 tem dimensões de 60x80x5 m e ocupa uma área de 5.080 m<sup>2</sup>, com uma capacidade volumétrica total para disposição de resíduos de aproximadamente 15.000 m<sup>3</sup> (Benatti, et al., 2013) e foi construída acima do antigo aterro sanitário Delta A.

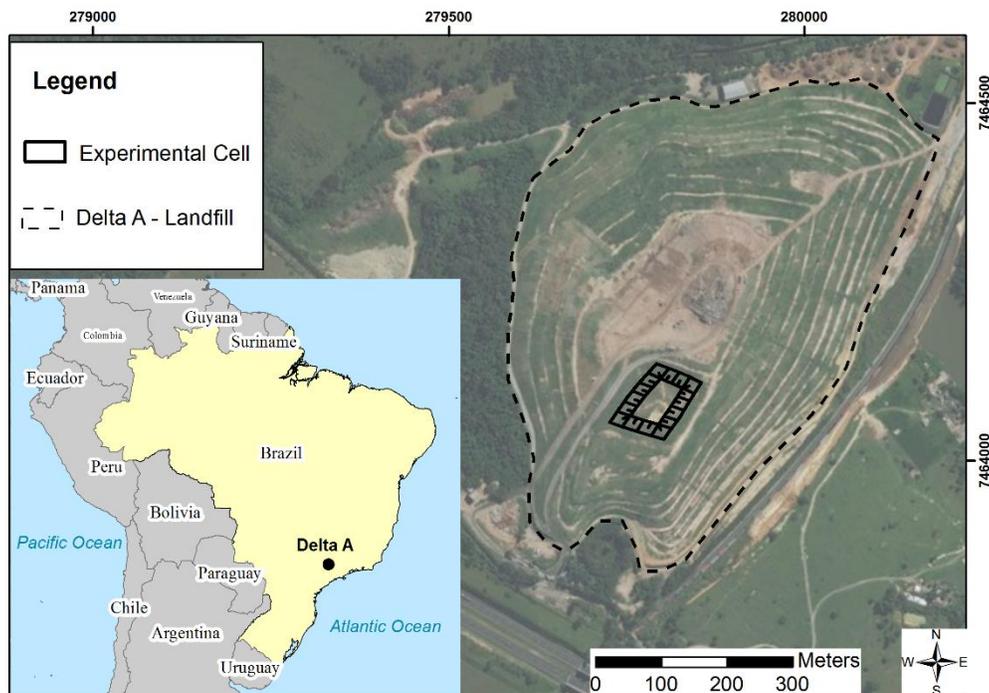


Figura 4.2: Localização da célula experimental no aterro sanitário Delta A.

A célula experimental foi construída segundo os preceitos vigentes de engenharia de aterros e as características técnicas de construção da célula segundo Manzatto, (2016) (pg. 39-40) que são:

*Sistema de impermeabilização de base composto por camada de argila compactada com 60 cm de espessura, seguida de uma geomembrana de PEAD de 1,5 mm e um geotêxtil não tecido; sistema de drenagem de*

*lixiviado formado por uma camada de 30 cm de espessura de “rachão” e por uma canaleta de drenagem de 1,0 m de largura e 30 cm de profundidade, localizada na base da célula, em sentido diagonal, com inclinação de 1,5%, conduzindo o lixiviado até uma caixa externa, onde são realizadas as amostragens para caracterização do mesmo; sistema de drenagem de gases construído com cinco tubos de drenagem vertical de seção circular de 1,5 m de diâmetro, telas com malha de 10 cm x 10 cm soldadas em aço de 4,2 mm de diâmetro. Este cilindro de tela foi preenchido com brita n° 4 e tem em seu centro um tubo de concreto de 30 cm de diâmetro. Além disso, a célula conta com placas de recalque apoiadas na camada de rachão, marcos superficiais e sistema coletor de gases para análise quali-quantitativa do biogás gerado. A camada de cobertura foi executada com solo proveniente de uma jazida localizada no próprio aterro, e o solo classificado como silte areno-argiloso sem microagregações.*

A célula experimental foi projetada para receber resíduos sólidos domiciliares, enquadrados nas categorias de resíduos Classe II-A e II-B. O seu preenchimento total durou 20 dias, recebendo os resíduos domésticos da cidade de Campinas sendo que apenas os RSU de coleta diurna da cidade de Campinas foram utilizados.

Vinte e dois testes de caracterização foram realizados no RSU de Campinas durante o tempo de preenchimento da célula (Miguel et al., 2016) e a caracterização foi realizada de acordo com a renda per capita da área da cidade. A composição de resíduos da célula é a seguinte: aproximadamente 47,3% de materiais orgânicos (matéria orgânica e poda), 12,9% de papel (papel e cartão limpos), 13% de plásticos (plásticos duros e moles), 1,2% de metais, 1,9% de vidro, 1,9% de detritos, 0,9% de madeira, 5,3% de fraldas e absorventes higiênicos e 15,6% de outros materiais (diversos, tecidos, Tetra Pak® e papel higiênico). As categorias apresentadas também podem ser agrupadas de acordo com a Tabela 4-1.

Segundo Miguel, et al. (2016), a quantidade de orgânicos encontrados na caracterização dos resíduos dispostos na célula experimental concorda com a observada em outras cidades brasileiras e apresentou uma queda de 11% nos últimos 8 anos. Já a

porcentagem de plástico encontrada, cerca de 13,0%, está próxima de outros valores encontrados na literatura para o lixo das cidades brasileiras, mas na cidade de Campinas isso representou um aumento de aproximadamente 115% nos últimos 8 anos.

Paixao Filho et al. (2017) analisaram as variáveis físico-químicas do lixiviado gerado pelo RSU confinados na célula experimental e concluíram que o RSU se encontra na fase de biodegradação anaeróbia metanogênica. Também encontraram que a transição inicial da fase anaeróbica ácida à fase metanogênica da biodegradação do RSU aconteceu em aproximadamente 100 dias, período muito curto em comparação com o mencionado pela literatura técnico-científica clássica, que é de 2 a 5 anos; no entanto, está próximo do encontrado em pesquisas em regiões tropicais, portanto se conclui que o processo de biodegradação dos RSU em regiões tropicais é um processo acelerado.

*Tabela 4-1: Composição gravimétrica da célula experimental reagrupadas por categorias para análise comparativa Miguel et al. (2016).*

<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>	<b>Composição (%)</b>
<b>Orgânicos</b>	Matéria orgânica, fraldas e absorventes higiênicos, e poda.	52,7
<b>Papel</b>	Papel, papelão limpo e sujo (com contaminante material, como fezes e sangue).	17,5
<b>Plástico</b>	Hard plastic and soft plastic.	13
<b>Metal</b>	Metal.	1,2
<b>Vidro</b>	Vidro.	2,0
<b>Resíduos de construção</b>	Resíduos de Construção.	1,9
<b>outros</b>	Diversos, tecido, Tetra Pak® e madeira.	11,7

Considerando os aspectos geológicos, a base do aterro sanitário Delta A é constituída por rochas do subgrupo Itararé. Estratos litológicos característicos são argilitos com intercalações rítmicas de arenitos na porção inferior e siltitos na porção superior.

#### 4.1.2. Lisímetro

Além da célula experimental foram também construídos lisímetros para simular reações biológicas e geomecânicas encontradas em aterros. Os lisímetros são modelos físicos

experimentais de áreas de disposição de resíduos, que simulam as transformações biológicas e geomecânicas que atuam nos resíduos sólidos urbanos.

Na Universidade Estadual de Campinas foram construídos seis lisímetros preenchidos com o mesmo tipo de resíduos sólidos da célula experimental, onde também foram utilizados os mesmos passos e recursos empregados no preenchimento de aterros sanitários. Segundo Favery et al. (2016), os seis lisímetros foram construídos com um sistema de base por laje de concreto armado, um sistema de drenagem de chorume, um sistema de drenagem de gás, uma camada de RSU compactada e um sistema de cobertura, além disso, placas de recalque, e aberturas para coletar amostras de RSU.

A caracterização dos RSU que preencheram o lisímetro foi a seguinte: 53% orgânico, 14,6% papel, 12,5% plástico, 1,9% metal, 1,8% vidro, 1,1% inerte e 14,6% outros (Favery et al., 2016). A camada de cobertura é composta de solo compactado e brita (cascalho). A Figura 4.3 mostra as dimensões do lisímetro com vista superior e as características do lisímetro são apresentadas na Tabela 4-2. Na data desta pesquisa, o RSU confinado no lisímetro tinha 3 anos.

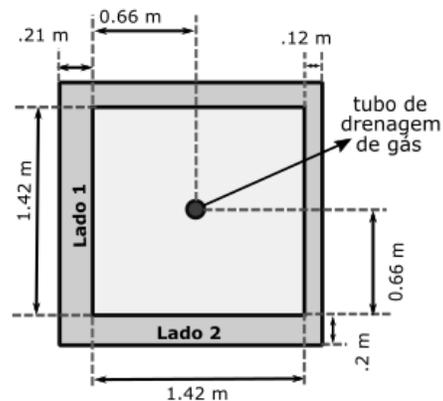


Figura 4.3: Vista superior do lisímetro L1 e dimensões do lisímetro L1 (Favery et al., 2016).

Tabela 4-2: Características do lisímetro depois de preenchido, adaptado de Favery et al, (2016).  
 \* Altura inicial (191,8cm) descontando o assentamento entre 2016 e 2018 (35cm).

	Camada de RSU	Camada de cobertura	
		Solo	Cascalho
<b>Peso (kg)</b>	2247,4	532,9	1714,0
<b>Peso específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>	5,93	17,91 kN/m <sup>3</sup>	18,25 kN/m <sup>3</sup>
<b>Espessura final (cm)</b>	156,8*	53,2	

## 4.2. ENSAIOS REALIZADOS

Foram realizadas aquisições geofísicas na célula experimental e no lisímetro, com a finalidade de obter valores de velocidades das ondas P e S nas duas áreas de estudo, além dos dados de resistividade e polarização induzida na célula experimental. Além disso, também foram perfurados seis poços na célula experimental e foram realizadas as aquisições sísmicas crosshole. Amostras de três dos furos foram coletadas para realizar as análises em laboratório de umidade. A seguir é apresentada a descrição das metodologias utilizadas para cada uma das aquisições geofísicas, começando pelos métodos sísmicos, seguido dos métodos geoeletricos e finalizando com as análises de laboratório para o teor de umidade das amostras.

### 4.2.1. Aquisições sísmicas

Na célula experimental foram aplicados métodos sísmicos como tomografia sísmica de refração, análise multicanal de ondas superficiais (MASW) usando fonte passiva e ativa e crosshole sísmico. Na Figura 4.4 é mostrada a localização das diferentes linhas de aquisições sísmicas realizadas na célula experimental e na Tabela 4-3 são apresentadas as datas e informações sobre cada aquisição.

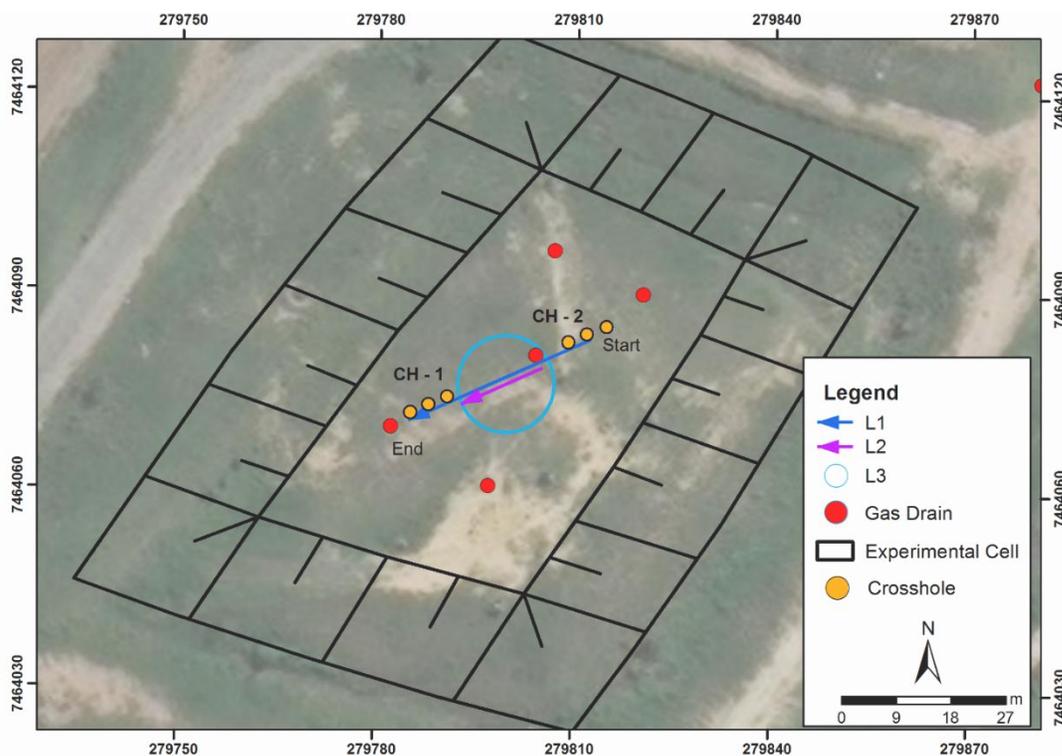


Figura 4.4: Localização dos ensaios sísmicos realizados na célula experimental. L1 para a tomografia sísmica de refração, L2 para o MASW com fonte ativa, L3 para o MASW com fonte passiva e CH1 e CH2 os dois conjuntos de furos onde foi realizado o crosshole.

Tabela 4-3: Informações das aquisições sísmicas realizadas.

Método Sísmico	Data da aquisição	Resultado Obtido	Linha de aquisição
Tomografia sísmica de refração	Novembro 2015	Velocidade onda compressiva $V_p - 2D$	L1
MASW-Ativa	Novembro 2015	Velocidade onda cisalhante $V_s - 1D$	L2
MASW-Passiva	Dezembro 2016	Velocidade onda cisalhante $V_s - 1D$	L3
Propagação onda direta - Lisímetro	Março 2017	Velocidade onda compressiva - 1D	Lisímetro
Crosshole	Junho 2018	Velocidades $V_p$ e $V_s$ 1D	CH-1 e CH-2

#### *4.2.1.1. Tomografia Sísmica de Refração (TSR)*

A tomografia sísmica de refração (TSR) foi aplicada na célula experimental para mapear a velocidade de onda P na superfície, usando a inversão das primeiras chegadas.

A aquisição foi realizada no dia 27 de novembro de 2015 na parte mais plana da diagonal superior da célula experimental ao longo da linha L1 (Figura 4.4 e Figura 4.5) com um comprimento de linha de aquisição total de 28,8 m.

O arranjo utilizado na pesquisa de refração foi constituído de 72 geofones verticais de 14 Hz separados uma distância de 30 cm entre eles ao longo de L1. A fonte usada foi uma marreta de 8 kg, atingindo verticalmente uma placa metálica. Foram gerados no total 11 tiros, começando no primeiro geofone e a cada 6 geofones (1.8 m), mais dois tiros adicionais a offsets mínimos de -30 e +30 cm do arranjo. Para cada posição de tiro foram somadas no mínimo 7 pancadas para melhorar o sinal e reduzir o ruído. Os parâmetros de aquisição usados incluíam intervalo de amostra (sample interval) de 0,5 ms e comprimento de registro (record length) de 1 s.

Os dados foram processados e analisados usando o software Rayfract®. Este software estima o modelo de velocidade, determinando os tempos de percurso das ondas sísmicas, resolvendo a equação eikonal (Schuster, et al., 1993) por diferenças finitas em um processo chamado Inversão de Tempo de Viagem Wavepath Eikonal (WET). Um modelo inicial de velocidade suave é obtido primeiramente a partir dos dados de tempo de percurso e o software resolve iterativamente a equação de onda para determinar os tempos teóricos, finalmente inverte os dados usando a fórmula de retroprojeção (Schuster, et al., 1993). Em seguida são mostrados os passos principais que foram utilizados no processamento de TSR usando o Rayfract®:

1. Escolher as primeiras chegadas nos sismogramas.
2. Definir a geometria do arranjo (posição dos disparos e receptores).
3. Executar a inversão suave WET com modelo inicial de gradiente unidimensional (1D).
4. Editar os parâmetros e ajustes do WET e gradiente 1D para melhorar o modelo de velocidade obtido.



*Figura 4.5: Aquisição de TSR na célula experimental.*

#### *4.2.1.2. Análises multicanal de ondas superficiais (MASW)*

A aquisição de MASW com fonte ativa foi realizada no dia 27 de novembro de 2015 junto com a aquisição de sísmica de refração. O arranjo utilizado consistiu de 48 geofones verticais de 4,5 Hz posicionados ao longo da linha L2 de 14,4 m de comprimento (Figura 4.4) e com espaçamento de 30 cm entre eles. A fonte foi uma marreta de 8 kg batendo verticalmente uma placa metálica. Os tiros foram dados a vários “offsets” mínimos com deslocamentos de 2 m, 4 m, 6 m e 8 m. Para cada deslocamento, foi obtido o registro produto do empilhamento de dois tiros.

A aquisição de MASW com fonte passiva foi desenvolvida no dia 16 de dezembro de 2016. Foi usado um arranjo circular de diâmetro 16 m (L3 na Figura 4.4) localizado na parte mais plana da célula experimental. O arranjo consistiu de 48 geofones verticais de

4.5 Hz e localizados no perímetro do círculo L3 a cada 1,05 m. A fonte passiva inclui o ruído ambiental produzido pela estrada dos Bandeirantes próxima ao aterro e pelos caminhões de lixo que entram e saem do aterro sanitário Delta A. A distribuição dos geofones ao longo do círculo na célula experimental é mostrada na Figura 4.6.

Na aquisição de MASW com fonte passiva, foram realizadas várias coletas de dados mudando os parâmetros de aquisição tais como intervalo de amostra (SI: sample interval) e comprimento de registro (RL: record length), com a finalidade de escolher aqueles dados que mostrassem melhores resultados para os RSU. Os conjuntos de parâmetros usados nas aquisições foram os seguintes:

- Intervalo de amostra= 2 ms, comprimento de registro=15 s
- Intervalo de amostra= 2 ms, comprimento de registro=20 s
- Intervalo de amostra= 2 ms, comprimento de registro=30 s
- Intervalo de amostra= 4 ms, comprimento de registro=30 s
- Intervalo de amostra= 4 ms, comprimento de registro=40 s
- Intervalo de amostra= 4 ms, comprimento de registro=50 s
- Intervalo de amostra= 4 ms, comprimento de registro=60 s



*Figura 4.6: Localização dos geofones em linha de aquisição circular para MASW com fonte passiva.*

Para cada um desses conjuntos de parâmetros, foram adquiridos entre 5 e 12 registros, sendo um total de 73 registros os quais foram processados para obter a imagem de dispersão de cada um.

O processamento básico dos dados usando o programa SurfSeis5, começa por importar os registros, colocar a geometria do arranjo e aplicar os filtros necessários, nesse caso, foi usado o filtro “mute” que serve para eliminar ou diminuir o efeito das ondas de corpo

e deixar unicamente as ondas superficiais. Posteriormente são obtidas as imagens de dispersão fase-velocidade para cada registro. É nesse estágio onde é possível realizar a somatória de várias imagens de dispersão de outros registros quando desejado. Finalmente, a curva de dispersão é selecionada da imagem de dispersão obtida seguido do processo de inversão no qual a curva de dispersão é convertida no perfil de velocidades da onda cisalhante  $V_s$ . O resumo das etapas utilizadas no processamento de dados de MASW, são mostradas na Figura 4.7.

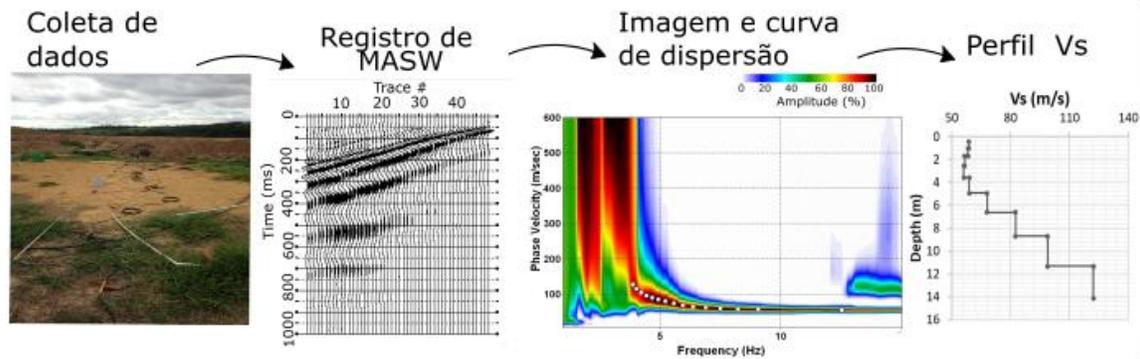


Figura 4.7: Passos para o processamento de dados de MASW usando o programa SurfSeis5.

#### 4.2.1.3. Ensaio crosshole

Nos dias 5 e 6 de junho de 2018 foram realizados os ensaios crosshole na célula experimental no conjunto de furos CH1 e CH2 da Figura 4.4.

Os ensaios foram realizados com o equipamento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT e com a ajuda dos técnicos do mesmo instituto. Cada conjunto de furo CH1 e CH2 (Figura 4.4), foi constituído por três furos separados a cada 3 metros entre si. As fontes de energia P e S foram colocadas no furo do meio e as ondas foram registradas por geofones-3C (de três componentes, uma vertical e dois horizontais) colocados nos furos dos extremos do conjunto. Uma foto do ensaio crosshole sendo executado no CH-2 é mostrada na Figura 4.8.

Os dados foram adquiridos a cada 0,25 m de profundidade começando em 0,75 m até 1,75 m de profundidade. Para cada conjunto de furos, foram realizados dois testes separados para registro de onda P e S respectivamente. Como fonte geradora de onda P empregamos uma câmara cilíndrica que rebentava uma membrana de PVC através da

injeção de CO<sub>2</sub>. Como fonte de onda S foi utilizado um pistão deslizante que golpeava (para baixo e para cima) um cilindro metálico preso na parede do furo. Essa fonte sísmica de polaridade reversa ajuda a identificar a chegada da onda S.

Os dados foram analisados usando o software Seismic Unix (Cohen, et al., 1996) para selecionar os tempos de chegada das ondas P e S. Para a onda P foi usado o critério de primeiras chegadas nos sinais registrados pelos dois receptores de componentes horizontais. Para a onda S, foi usado o critério de inversão de polaridade entre o golpe ascendente e descendente no sinal registrado pelo receptor de componente vertical. Os tempos de chegada selecionados foram convertidos em velocidade usando a distância de 3 m entre a fonte e os receptores localizados nos furos.



*Figura 4.8: Aquisição de teste crosshole realizado na célula experimental no CH-2.*

#### **4.2.1.4. Propagação de onda direta - Lisímetro**

Foi realizada a aquisição de propagação de onda diretamente transmitida no lisímetro L1 no dia 20 de março de 2017, com o equipamento e os técnicos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT.

A onda foi gerada nas paredes externas do lisímetro, batendo a parede com o martelo a várias profundidades, e a onda foi registrada no geofone-3C localizado no tubo de drenagem de gás como mostrado na Figura 4.9 (B). A onda foi gerada nas paredes dos lados 1 e 2 do lisímetro e as aquisições foram feitas a cada 20 cm começando na superfície da camada de cobertura. Depois de fazer a primeira aquisição gerando a onda no Lado 1, foi drenado o chorume do lisímetro, e foi realizada mais uma aquisição gerando a onda no lado 2. A aquisição sísmica no lisímetro e a drenagem do mesmo é mostrado na Figura 4.10.

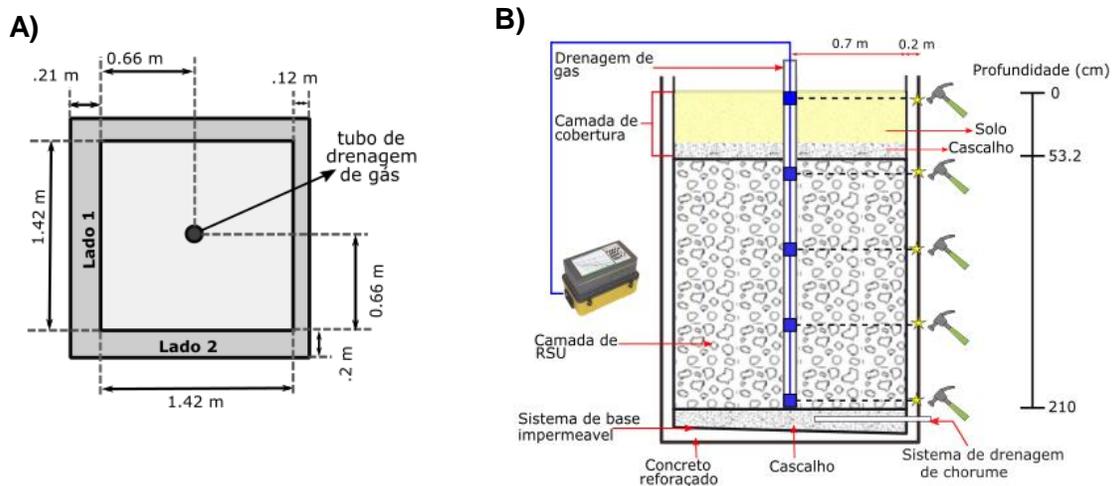


Figura 4.9: A) Dimensões e esquematização do lisímetro adaptado de Favery et al. (2016). B) Esboço da aquisição de onda direta usado no lisímetro.

s dados foram analisados usando o software Seismic Unix para selecionar os tempos de chegada das ondas P e S usando o critério de primeiras chegadas nos sinais registrados pelos dois receptores de componentes horizontais.

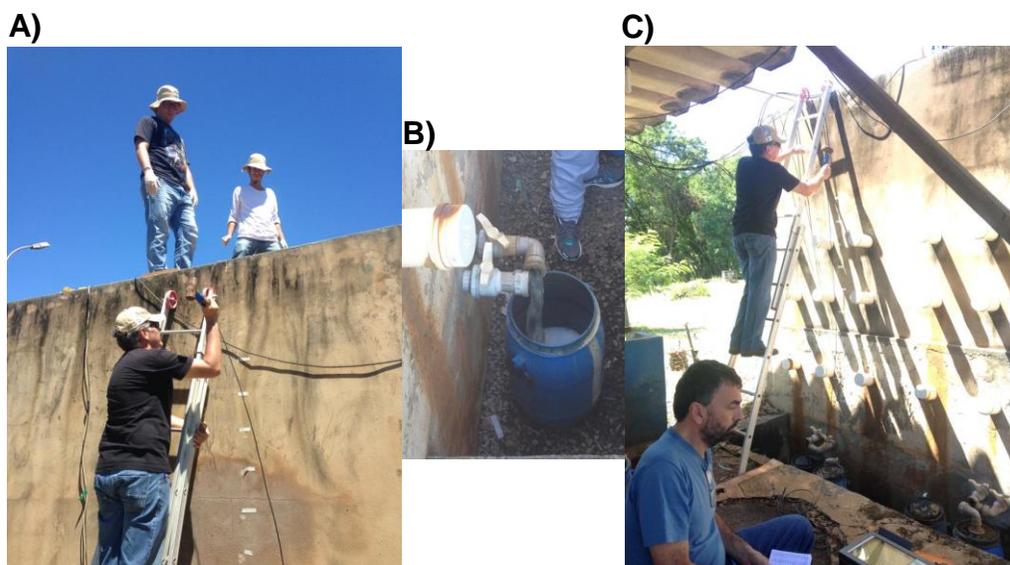


Figura 4.10: Aquisição de propagação de onda direta no lisímetro L1. A) Onda sendo gerada na parede do lado 1 do lisímetro. B) Drenagem do lisímetro. C) Onda sendo gerada na parede do lado 2 do lisímetro.

#### 4.2.2. Aquisições geoeletricas

Foram realizadas várias aquisições de Eletrorresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP) na célula experimental usando a técnica de caminhamento elétrico (CE) e Sondagem Elétrica Vertical (SEV). Na Tabela 4-4 são apresentadas informações das aquisições, e em seguida são descritos os parâmetros de aquisição usados para cada técnica.

Tabela 4-4: Informações das aquisições geoeletricas realizadas.

Método Geoeletrico	Data da aquisição	Técnica de aquisição	Linha de aquisição
Eletrorresistividade e Polarização induzida	Agosto 2015	Caminhamento elétrico	C1
Eletrorresistividade e Polarização induzida	Mai 2016	Caminhamento elétrico	C2
Eletrorresistividade e Polarização induzida	Abril 2017	Caminhamento elétrico	C3
Eletrorresistividade e Polarização induzida	Setembro 2017	Caminhamento elétrico	C4
Eletrorresistividade	Mai 2018	Sondagem elétrica vertical	CH-1 e CH-2

#### *4.2.2.1. Caminhamento elétrico*

Quatro aquisições geoeletricas de Eletrorresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP) usando a técnica de caminhamento elétrico foram realizadas na célula desde agosto de 2015 até setembro de 2017, após períodos de chuvas e de seca na região de Campinas-SP. Essas aquisições foram realizadas com vários escopos, sendo que o primeiro era identificar a presença de bolsões de choro na linha estudada o segundo, monitorar a umidade dentro da célula usando a relação entre a resistividade e a umidade volumétrica dada pela lei de Archie e o terceiro, avaliar a influência do clima tropical no teor de umidade dos resíduos da célula experimental.

Nos dias 21 de agosto de 2015 no período de pós-seca, 24 de maio de 2016 no período pós-chuvas, 19 de abril de 2017 no período pós-chuvas e 28 de setembro de 2017 no período de pós-seca foram desenvolvidas as aquisições de dados de ER e IP na célula experimental. Usando a técnica de caminhamento elétrico com o arranjo dipolo-dipolo e com os equipamentos Syscal-Pro (C1 e C2) e Syscal R1 (C3 e C4), os eletrodos usados foram os não polarizáveis para permitir realizar a aquisição de IP. Na Figura 4.11 é mostrada uma das aquisições de caminhamento elétrico realizada na célula experimental.

Os parâmetros de aquisição utilizados na aquisição de dados foram os seguintes: 11 eletrodos, sendo 9 eletrodos de potencial (MN) e dois eletrodos de corrente (AB); o espaçamento dos dipolos foi de 2,5 m. As linhas de aquisição variaram entre 100 e 115 m de comprimento. Na Figura 4.12, está a localização das quatro linhas de aquisição na célula experimental e a Tabela 4-5, demonstra as datas e o comprimento de cada linha. Por problemas no equipamento, as linhas C2 e C3 não chegaram a ter 115 m de comprimento.



Figura 4.11: Aquisição de caminhada elétrica na célula experimental.

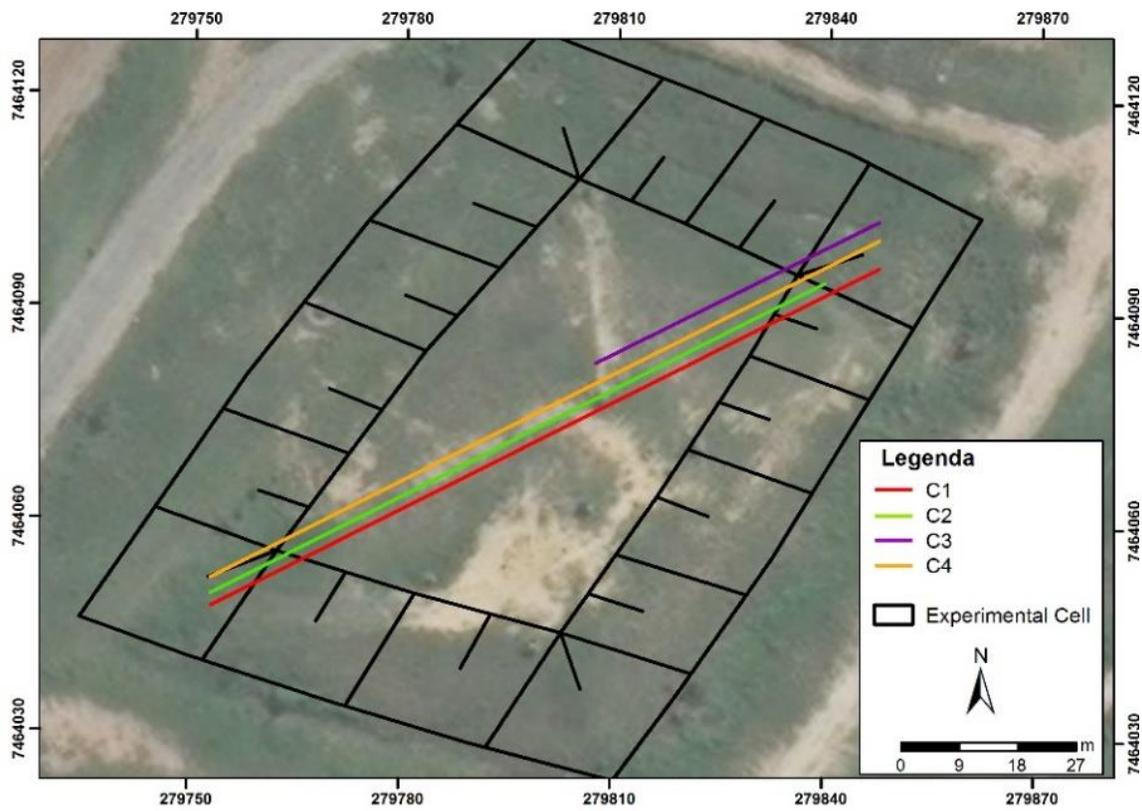


Figura 4.12: Localização das linhas de aquisição do caminhada elétrica.

Tabela 4-5: Datas das linhas de aquisição de eletroresistividade e polarização induzida.

Linha de aquisição	Data	Comprimento (m)
C1	21 de agosto de 2015	115
C2	24 de maio de 2016	105
C3	19 de abril de 2017	60
C4	28 de setembro de 2017	115

#### 4.2.2.2. Sondagem elétrica vertical (SEV)

Três Sondagens Elétricas Verticais (SEV) foram realizadas no dia 21 de maio de 2018, antes de começar as perfurações dos furos. As SEVs foram realizadas com o centro nas posições que seriam perfurados os furos 2 e 5 dentro da célula experimental e no furo 7 no antigo aterro sanitário Delta A, sendo chamadas respectivamente SEV1, SEV 2 e SEV 3. Na Figura 4.13 é mostrada a aquisição SEV1 realizada na célula experimental.



Figura 4.13: SEV realizada na célula experimental na posição do furo 2.

Na aquisição foi usado o arranjo Schlumberger, sendo que para os furos 2 e 5 a abertura AB mínima foi de 1 m e a máxima de 60 m e para o furo 7 a abertura mínima AB foi de 3 m e a máxima foi de 100 m. O equipamento usado foi o Syscal R1 com eletrodos de potencial não polarizáveis. Os dados obtidos foram analisados com o programa livre IPI2win da Universidade Estatal de Moscou, utilizado para interpretação 1D manual e automática de SEV.

#### 4.2.3. Perfurações e coleta de amostras

Na semana de 21 a 25 de maio de 2018, foram executadas no aterro sanitário Delta A as perfurações de nove furos, com a finalidade de realizar o ensaio crosshole sísmico e analisar teor de umidade das amostras em três desses furos. As perfurações foram realizadas pela empresa *Engessolos Engenharia de Solos e Fundações Ltda* e financiado pelo projeto CNPq número 425971/2016-3.

A localização dos furos dentro da célula experimental foi escolhida para que permanecesse na linha de aquisição, onde foram obtidos todos os caminhamentos elétricos, para assim, obter amostras do mesmo lugar onde foram obtidos os dados de resistividade que foram convertidos em dados de umidade usando a Lei de Archie.

Os nove furos foram agrupados em três conjuntos de três furos cada um. Dois dos conjuntos CH1 (Furo 1-3) e CH2 (Furos 4-6) foram perfurados dentro da célula experimental (Figura 4.4), com uma profundidade de 3 metros cada e uma distância de 3 metros entre eles. O conjunto CH3 (Furos 7-9) foram perfurados fora da célula experimental no antigo aterro sanitário, com uma profundidade máxima de perfuração de 8 m e com uma distância de 3 metros entre eles. A profundidade máxima de 3 metros nos conjuntos CH1 e CH2 dentro da célula experimental foi definida para assegurar que as perfurações não atingissem a base da célula que está localizada a 5 m de profundidade ou menos (esse valor pode variar devido ao recalque da célula) e assim evitar uma possível perfuração da geomembrana impermeável da base.

Os nove furos foram perfurados empregando uma perfuratriz do tipo trado helicoidal oco (hollow steam auger) de diâmetro externo 10" (interno 6"). A medida em que se faz a perfuração, a parte oca do trado fica vazia para a introdução do tubo e o revestimento. Quando a profundidade desejada é alcançada, a coluna de PVC geomecânico com

diâmetro nominal  $\varnothing 4"$  é instalada e posteriormente é realizado o selamento do espaço anular com "grout" (composto por cimento e bentonita) que é injetado do fundo para a superfície da perfuração. Na Figura 4.14 pode ser observado como foi o passo a passo para a instalação dos furos.



Figura 4.14: Passos para a instalação dos furos usando a perfuratriz oca "Hollow steam auger".

De cada conjunto de furos, os furos centrais (furo 2 e furo 5) foram selecionados para realizar a amostragem. Para obter as amostras nos três furos escolhidos, foi usada a penetração de um amostrador bipartido padrão de 50,2 mm de diâmetro externo sob a ação de um martelo padronizado de 65 kg em queda livre de uma altura padronizada de 75 cm (Tipo SPT, ver Figura 4.15). Para os conjuntos CH1 e CH2 dentro da célula experimental, as amostras foram recolhidas em intervalos de 0,5 metros de profundidade até chegar a profundidade máxima de 3 metros. Já para o conjunto de furos fora da célula (no aterro mais antigo) CH3, as amostras foram recolhidas a cada metro com profundidade máxima de 8 m. Imediatamente após as amostras serem retiradas do amostrador, elas foram pesadas e armazenadas em sacolas plásticas devidamente lacradas para posterior determinação do teor de umidade *in situ*. A temperatura das amostras também foi medida na hora da coleta para fazer a correção de temperatura nos resultados de resistividade.



Figura 4.15: Fotografia da amostragem do furo 2 na célula experimental no Aterro Delta A. Na esquerda penetração.

Não foi possível realizar a determinação do peso específico in situ das amostras coletadas, já que na maioria das amostras a ponta do amostrador ficava entupida pelos resíduos mais duros e não permitia que o amostrador enchesse totalmente ou parcialmente, em alguns casos só enchia a ponta do apontador. Além disso, quando os resíduos ficavam presos dentro do amostrador, sem ser na ponta, ao bater e pegar mais amostras o volume dos resíduos que ficavam depois de onde ficavam presos mudava pela compactação das múltiplas batidas, dessa forma as amostras obtidas não saíam com o volume real dos resíduos in situ.

#### 4.2.4. Teor de umidade

As análises de teor de umidade das amostras foram realizadas no LABPRO - Laboratório de Protótipos - Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP. Cada amostra foi colocada num saco de papel e pesada na balança de precisão (Figura 4.16) antes de ser introduzida no forno a 60 °C durante 15 dias. Posteriormente cada amostra foi retirada do forno e foi pesada a massa seca. O teor de umidade gravimétrico  $W_w$  foi calculado com a relação entre a massa úmida e a massa seca.



Figura 4.16: Pesagem das amostras e separação para secagem no forno.

#### 4.2.5. Balanço hídrico

A recarga hidráulica de uma área está associada principalmente à infiltração natural de parte das águas do excedente hídrico (precipitação menos a evapotranspiração, o escoamento superficial e a interceptação). Para o cálculo da recarga nesse projeto, foi usada a metodologia proposta por Conicelli (2014), que está baseada no método do balanço hídrico de Thornthwaite & Mather (1948), adicionando-se o componente de escoamento superficial e calculando o excedente hídrico como a precipitação menos a evapotranspiração e o escoamento superficial.

A metodologia proposta por Thornthwaite, et al., (1948, 1955) é definida segundo a equação  $P = ESC + \Delta S + ETR + R$ , onde  $P$  é a precipitação (mm);  $ESC$  é o escoamento superficial (mm), incluindo a interceptação,  $\Delta S$  é a variação no armazenamento de água na zona não-saturada (mm),  $ETR$  é a evapotranspiração real (mm), e  $R$  é a recarga (mm).

Com os dados de precipitação e temperatura da área estudada, é possível calcular a evapotranspiração potencial e com ela, a evapotranspiração real. Para o cálculo da

evapotranspiração potencial (ETP) é usado o método proposto por Thornthwaite & Mather (1948), cuja aplicação é adequada em projetos de pesquisa. A equação empírica para calcular a ETP é dada por:

$$ETP = 16b(10 \frac{T}{I})^a, \quad 0^\circ\text{C} \leq T \leq 26^\circ\text{C} \quad (4.1)$$

onde T é a temperatura média mensal (°C), I é o índice de calor disponível para a região, o expoente *a* é a função cúbica de I calculado a partir da soma dos índices de calor dos 12 meses e *b* é um fator de correção referente ao período de insolação durante o dia que varia em função da latitude do local de estudo.

O cálculo de I, *a* e *b* é realizado a partir das seguintes equações:

$$I = \sum_{\eta=1}^{12} (0,2T_{\eta})^{1,514}, T_x > 0^\circ\text{C} \quad (4.2)$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,7912 \times 10^{-2} I + 0,49239 \quad (4.3)$$

$$b = \left(\frac{ND}{30}\right) \times \left(\frac{N}{12}\right) \quad (4.4)$$

onde ND é o número de dias no mês e N o fotoperíodo em horas.

Caso a temperatura média mensal seja acima de 26°C, a ETP deve ser calculada pela equação apresentada por Willmott et al. (1985), baseada nas tabelas de Thornthwaite & Mather (1948):

$$ETP = -415,85 + 32,24 - 0,43T^2, T > 26^\circ\text{C} \quad (4.5)$$

A evapotranspiração real (ETR) é obtida a partir das seguintes equações:

$$ETR = ETP, (P - ESC - ETP > 0) \quad (4.6)$$

$$ETR = P - ESC - \Delta ARM, (P - ESC - ETP < 0) \quad (4.7)$$

Outra variável envolvida no cálculo da recarga é o escoamento superficial. O escoamento superficial depende de fatores como o grau de saturação da cobertura do terreno, e a sua declividade. Quanto maior o teor de argila dos estratos que compõem o terreno, bem como o grau de saturação e a declividade, maior será o escoamento superficial. Em coberturas com baixas declividades, estratos predominantemente arenosos e baixo grau de saturação favorecem uma alta infiltração e, conseqüentemente, menor escoamento superficial. A avaliação do coeficiente de escoamento superficial ( $c'$ ) é realizada por meio da adaptação do método proposto por Fenn et al. (1975) que se baseia em avaliar o tipo de cobertura do terreno (tipo de solo) e a sua declividade. O cálculo de escoamento superficial é o produto entre o coeficiente de escoamento e a precipitação:

$$Esc = Pc' \quad (4.8)$$

O armazenamento ( $\Delta S$ ) foi calculado com base nas simplificações propostas por Pereira, (2005), segundo a equação (12):

$$\Delta S_{\eta} = \Delta S_{\chi-1} \exp \left[ \frac{(P-ETP)\eta}{CAD} \right] \quad (4.9)$$

onde  $ETP$  é a evapotranspiração potencial (mm) e  $CAD$  é a capacidade de água disponível no solo (mm), adotado como 150 mm que é um valor padrão.

Para os meses onde  $P - ETP > 0$ , mas com valores insuficientes para que o  $\Delta S$  atinja o valor da  $CAD$ , aplica-se a seguinte equação:

$$\Delta S_{\eta} = \Delta S_{\chi-1} \exp(P - ETP)_{\eta} \quad (4.10)$$

Finalmente, a recarga é obtida aplicando-se as equações (14) e (15), abaixo:

$$R = P - ESC - \Delta S, \Delta S \geq 0 \quad (4.11)$$

$$R = 0, \Delta S < 0 \quad (4.12)$$

## Capítulo 5 – Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da aplicação dos métodos sísmicos e geoeletricos, assim com as análises dos dados e a discussão. Primeiro são apresentados os resultados dos métodos sísmicos aplicados e as análises dos parâmetros elásticos obtidos das velocidades das ondas P e S. Em seguida são apresentados os resultados dos métodos de eletrorresistividade e polarização induzida e as análises do teor de umidade na célula experimental.

### 5.1. Tomografia sísmica de refração

Os dados de refração sísmica obtidos na célula experimental na linha L1 foram analisados usando o programa Rayfract 32. Para cada sismograma adquirido (um para cada posição de tiro), foram escolhidas as primeiras chegadas e assim as curvas de percurso foram obtidas. Depois, no processo de inversão de dados WET (Wavepath Eikonal Traveltime Tomography) foi obtido o modelo de velocidades  $V_p$  para a célula experimental.

Um exemplo dos sismogramas é mostrado na Figura 5.1, obtido para o tiro dado no geofone 48 e onde se pode observar claramente a marcação das primeiras chegadas depois da onda aérea (340 m/s).

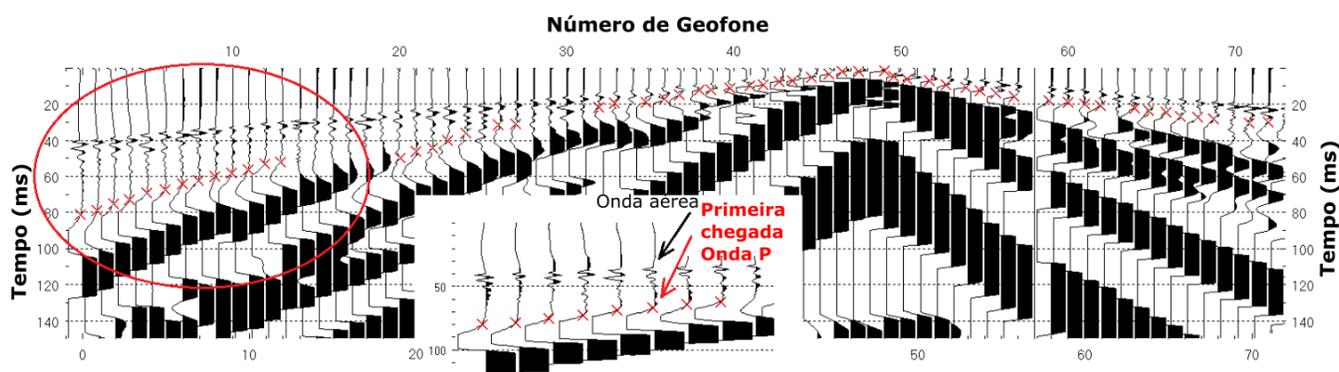


Figura 5.1: Exemplo de sismograma obtido da aquisição de sísmica de refração. As cruces vermelhas são as primeiras chegadas escolhidas no software Rayfract®. Os tempos de chegada da onda P são maiores do que os tempos de chegada das ondas aéreas (reconhecido pela sua maior frequência e menor amplitude), como pode ser notado pelos traços ampliados (identificados pela elipse).

O modelo de velocidades obtido é apresentado na Figura 5.2 e o diagrama de densidade de raios do modelo é demonstrado na Figura 5.3. O modelo de velocidade exibe um gradiente de velocidade lateral grande, passando de velocidades muito baixas a altas velocidades; no entanto, as suposições de gradiente de velocidade dos métodos de tomografia exigem que os valores obtidos de  $V_p$  sejam considerados com cautela se o gradiente não for uniforme ao longo do perfil (Sheehan et al., 2005).

O modelo de cobertura de raios (Figura 5.3) mostra que a densidade de raios nas extremidades é baixa, por isso, a imagem tomográfica da Figura 5.2, que mostra crescente  $V_p$  na direção ENE - WSW, deve ser interpretada com prudência nas extremidades do perfil. Na região de alta densidade de raios no gráfico de cobertura, aproximadamente entre 5 m e 17 m (Figura 5.3), as velocidades da onda P variaram entre 160 e 220 m/s a qual é uma variação lateral menor que se analisada toda a tomografia.

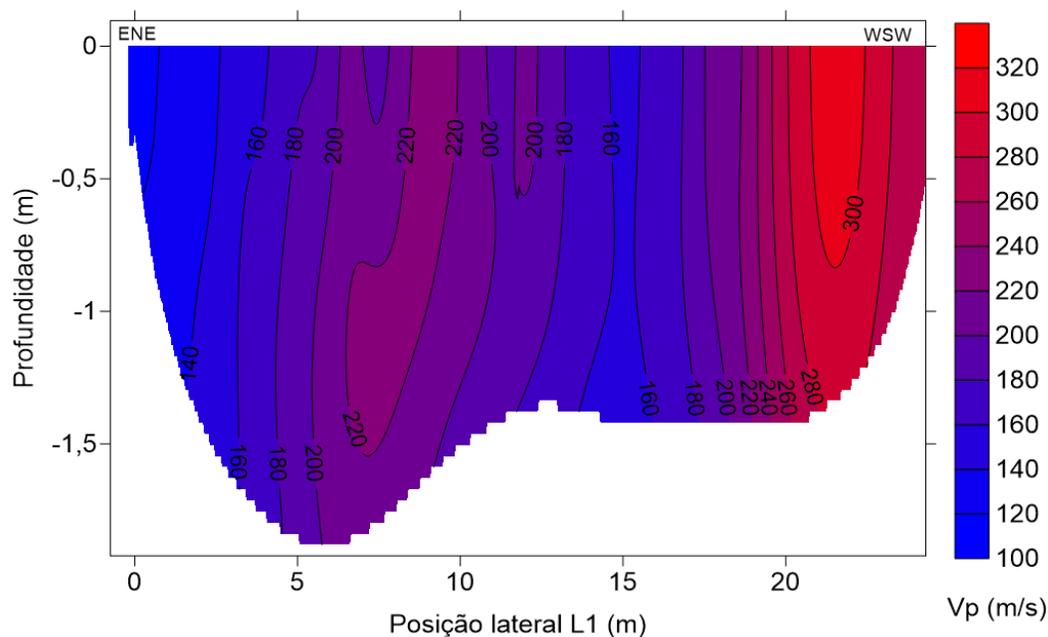


Figura 5.2: Modelo de  $V_p$  obtido com tomografia de refração na célula experimental (linha de aquisição L1).

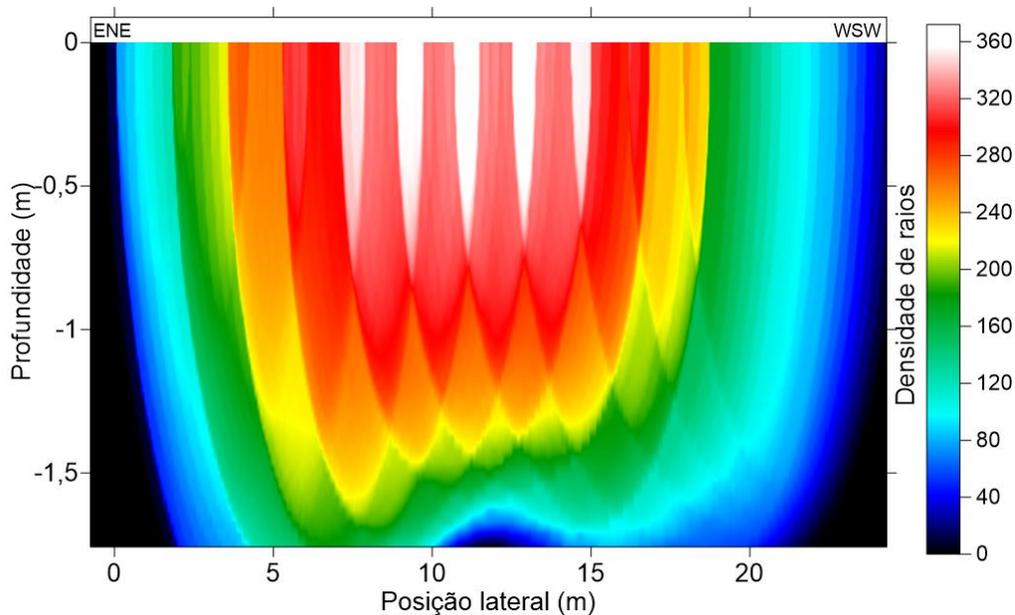


Figura 5.3: Densidade de raios do modelo tomográfico.

As baixas velocidades da onda P obtidas com a refração sísmica (160-220 m/s) estão de acordo com os resultados obtidos para o estrato superior, como observado por Carvalho (1999), Zalachoris (2010) e Abreu et al. (2016), embora as velocidades obtidas no presente estudo sejam ainda menores. Carvalho (1999) obteve a  $V_p$  de 195 a 400 m/s para o aterro Bandeirantes, em São Paulo, Brasil, utilizando ensaios crosshole e downhole, e Abreu et al. (2016) obteve o VP de 197-316 m/s usando ensaio crosshole.

Dentre as limitações que foram encontradas no método, conseguir identificar as primeiras chegadas era a mais desafiadora, devido à altíssima presença de ruído e a atenuação que apresenta por natureza os RSU.

## 5.2. MASW – MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES

Os dados de MASW foram analisados usando o software SurfSeis5, que transforma os registros de ondas superficiais multicanal em uma imagem de dispersão fase-velocidade, para depois extrair a curva de dispersão dessa imagem e finalmente, no processo de inversão, converter a curva de dispersão no perfil de velocidades de onda cisalhante.

Foram feitas duas aquisições de MASW, sendo uma usando fonte ativa e a outra usando fonte passiva para combinar os resultados das fontes passiva e ativa. Segundo Park et al. (2007) existem duas razões para combinar as imagens de dispersão processadas

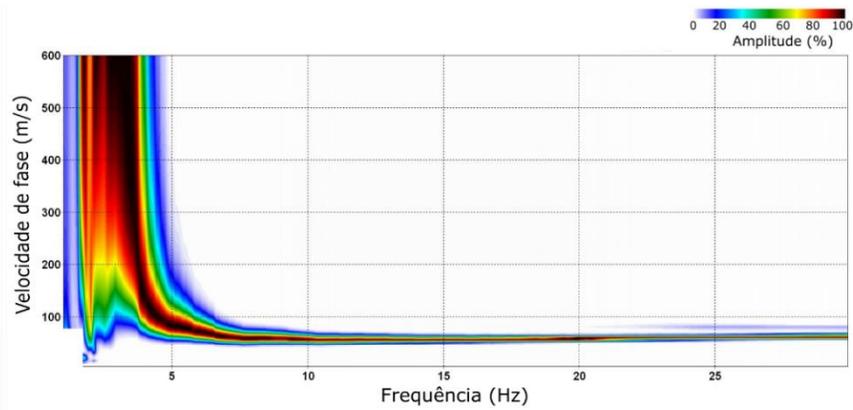
provenientes de dados ativos e passivos: 1) para aumentar as frequências analisadas e por conseguinte as profundidades estudadas, lembrando que a menor frequência da onda maior é a penetração no solo, e 2) para identificar melhor a natureza modal das tendências de dispersão. Neste caso, foram combinados os resultados de fonte ativa e passiva para aumentar as frequências e melhorar a profundidade de pesquisa. Em seguida serão apresentados os resultados obtidos com fonte ativa, fonte passiva e por fim a combinação das duas fontes.

#### 5.2.1. MASW ativa

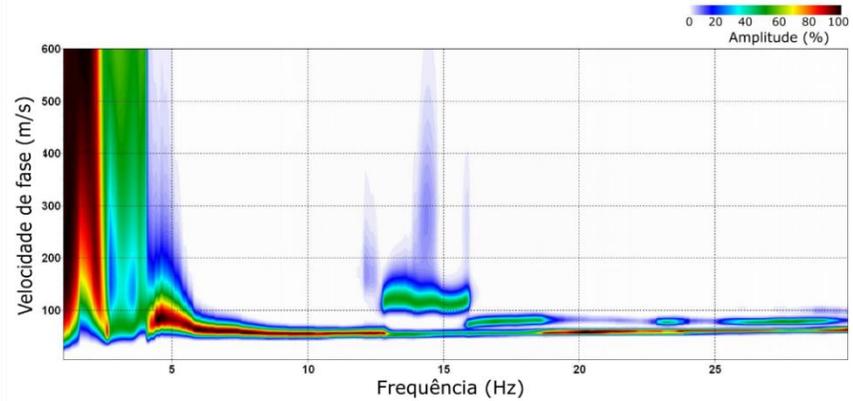
No total foram obtidos 8 registros de MASW usando fonte ativa, sendo cada um deles o resultado do empilhamento de dois tiros. Os tiros foram dados a “offsets” mínimos de 2, 4, 6 e 8 m do início e do fim da linha de aquisição. Para identificar os tiros dados antes da linha de aquisição é usado o sinal “-” e para os tiros dados depois da linha de aquisição é usado o sinal “+”.

O primeiro passo foi analisar para qual deslocamento mínimo se tinham as melhores imagens de dispersão, e se encontrou que para os tiros dados a maiores “offsets” mínimos ( $\pm 6$  m e  $\pm 8$  m) as imagens de dispersão foram de melhor qualidade nas altas velocidades de fase, do que aquelas obtidas para menores “offsets” mínimos ( $\pm 2$  m e  $\pm 4$  m). Por esse motivo, o processamento de dados prosseguiu para as imagens de dispersão dos tiros dados a  $\pm 6$  m e  $\pm 8$  m dos extremos da linha de aquisição.

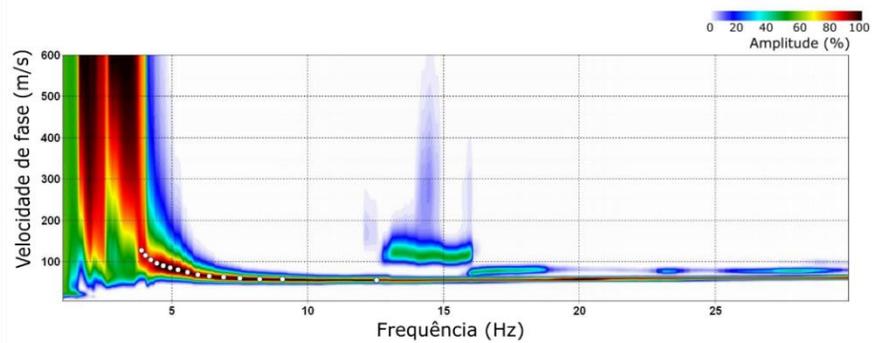
Posteriormente, foram empilhadas por separado as imagens de dispersão dos tiros dados depois da linha de aquisição a +6m e +8m, e antes da linha de aquisição a -6m e -8m do arranjo. Para cada imagem de dispersão obtida da combinação de dados, foi extraída a curva de dispersão e foi invertida para obter os perfis de velocidades Vs. As imagens de dispersão e os perfis de velocidades são apresentados na Figura 5.4 e Figura 5.5 respectivamente.



A) Imagem de dispersão dos tiros dados a 6 e 8 m do fim da linha L2



B) Imagem de dispersão obtida dos tiros dados a 6 e 8 m antes da linha L2



C) Empilhamento das imagens A e B.

Figura 5.4: (A) Imagem de dispersão combinadas para os tiros dados depois do arranjo, (B) para os tiros dados antes do arranjo, e (C) a combinação das imagens dos tiros dados antes e depois do arranjo.

Para ambientes com velocidade lateral homogênea, se esperaria que as velocidades obtidas para os tiros dados antes e depois do arranjo, fossem iguais. Porém no caso dos RSU não se espera esse comportamento, já que está caracterizado por ter composição heterogênea e pode apresentar variações laterais de velocidade. Os perfis de velocidades

obtidos para os tiros dados antes e depois do arranjo apresentam um comportamento similar, mostrando uma inversão de velocidades na baixa profundidade e um aumento de velocidade por volta de 5m que coincide com a profundidade da base da célula experimental. Apesar de que o comportamento das velocidades é similar para cada perfil, as velocidades na célula experimental (até 5m) variaram segundo as posições dos tiros, verificando a existência da variação lateral de velocidades. Para tiros dados antes do arranjo, ao nordeste da célula, as velocidades são menores do que para os tiros dados ao sudoeste da célula ou depois do arranjo. A velocidade média da célula experimental (até 5m de profundidade) obtida dos tiros dados ao sudoeste é de 62,7 m/s e de 57,5 m/s obtida dos tiros dados ao nordeste da célula.

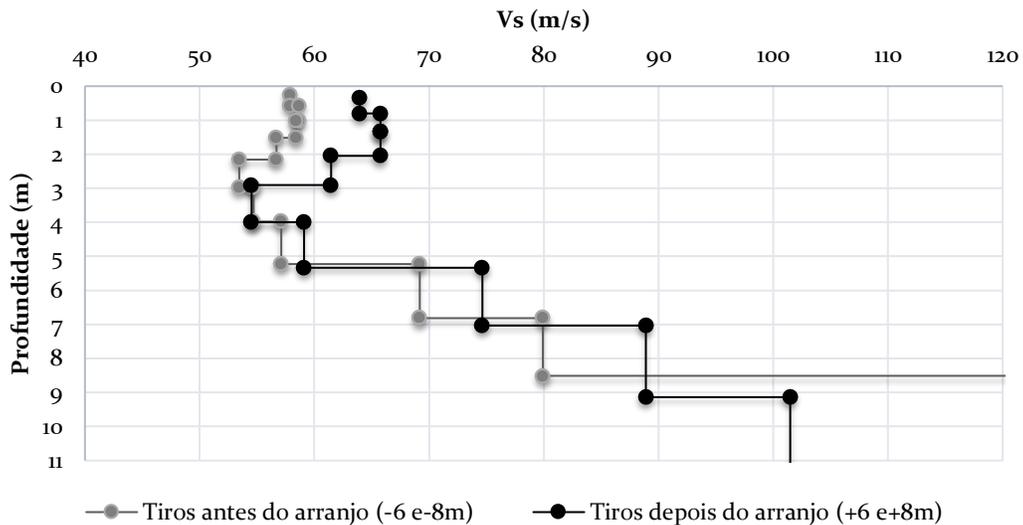


Figura 5.5: Perfil de velocidades obtido da inversão das curvas de dispersão para tiros antes e depois do arranjo.

Finalmente para obter um único perfil de velocidades usado fonte ativa, foi realizado a combinação das duas imagens de dispersão dos tiros dados a “offsets” mínimos a 6 e 8 m antes da linha de aquisição e depois da linha de aquisição, essa imagem de dispersão é mostrada na Figura 5.4 (C). Dessa imagem de dispersão foi extraída a curva de dispersão para ser invertida e assim obter o perfil de velocidades médio da célula

experimental usando fonte ativa. O resultado do perfil de velocidade adquirido é mostrado na Figura 5.6.

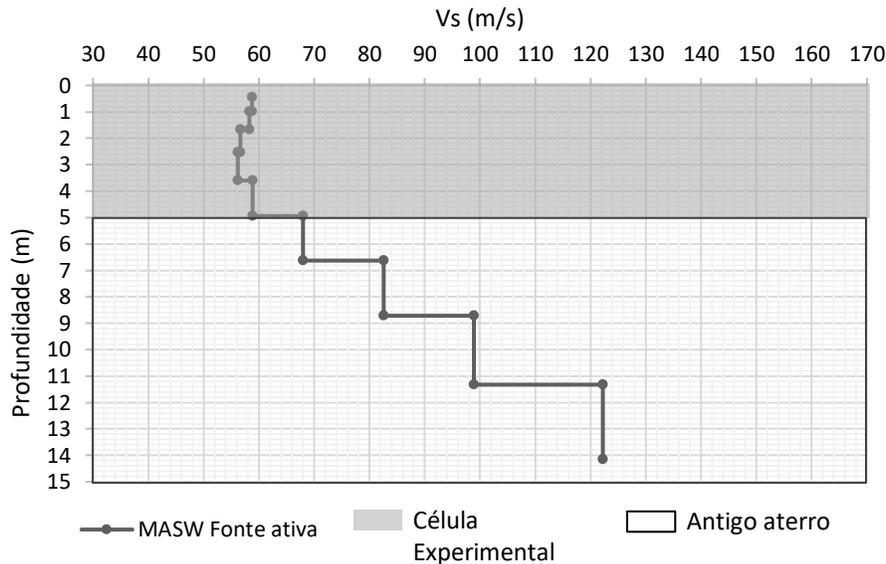


Figura 5.6: Resultados da inversão da curva de dispersão obtida do empilhamento das imagens de dispersão dos tiros dados a  $\pm 6$  m e  $\pm 8$  m com fonte ativa.

### 5.2.2. MASW passiva

Das 73 imagens de dispersão obtidas da aquisição MASW com fonte passiva, foi possível observar que as melhores curvas de dispersão foram aquelas dos registros adquiridos usando os parâmetros de intervalo de amostra de 4 ms e comprimento de registro de 60 s e foram então escolhidas essas imagens de dispersão para serem analisadas.

Prosseguindo com a análise, foram combinadas as imagens de dispersão obtidas com os parâmetros escolhidos (ver Figura 5.7), e da imagem resultante foi extraída a curva de dispersão, a qual foi invertida para obter o perfil de velocidade  $V_s$  da fonte passiva apresentado na Figura 5.8.

O perfil de velocidades (Figura 5.8) apresenta uma inversão de velocidade em 2 m de profundidade e até os 5 m de profundidade uma velocidade quase constante. A partir dos 5 m de profundidade (RSU antigo aterro sanitário) começa o aumento gradativo de velocidade com a profundidade. A velocidade média da célula experimental (até 5 m de

profundidade) é de 59.7 m/s, valor que coincide com a faixa de velocidades obtidas nas análises de dados de MASW ativa.

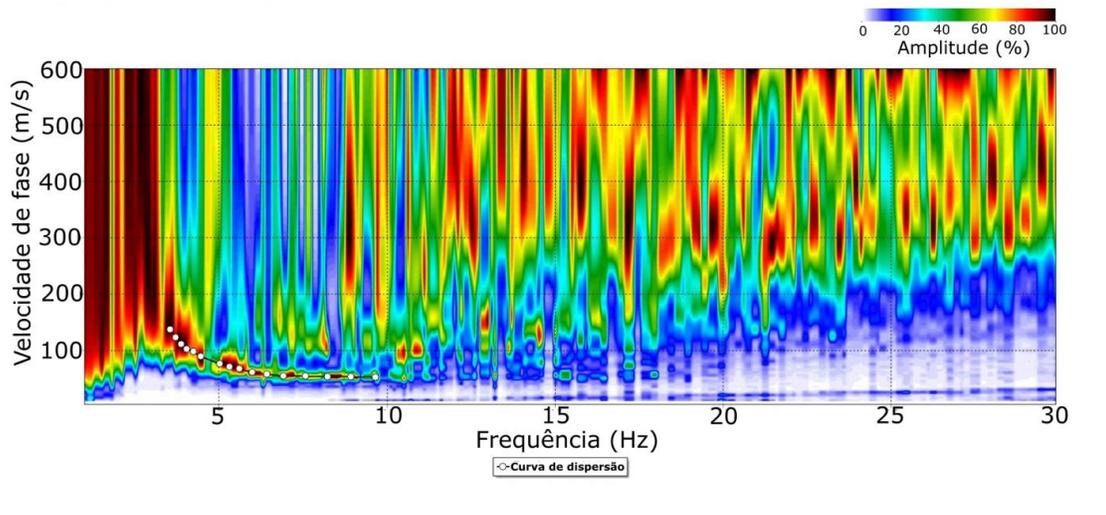


Figura 5.7: Imagem e curva de dispersão obtidas da soma das melhores imagens de dispersão adquiridas usando fonte passiva.

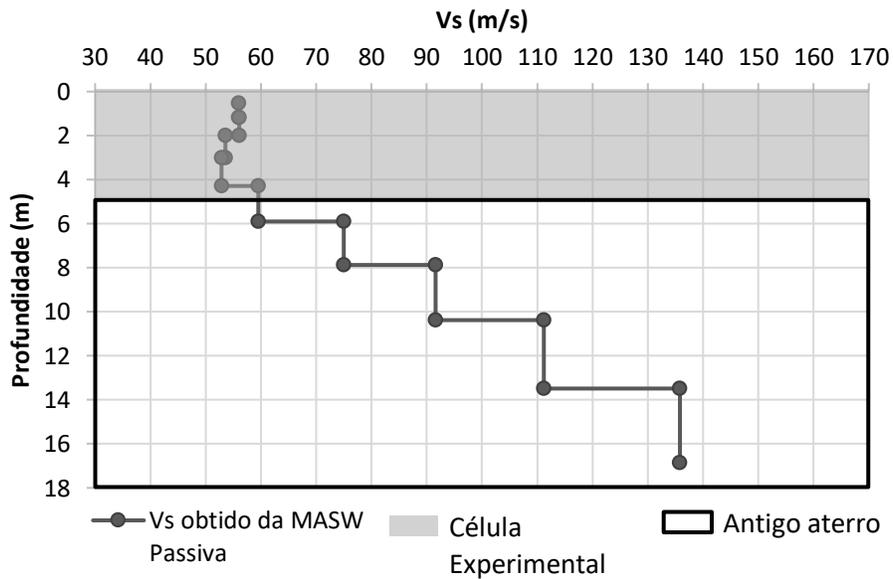


Figura 5.8: Perfil de Velocidade Vs obtido usando MASW passiva com arranjo circular.

### 5.2.3. Combinando MASW passiva e ativa

O software SurfSeis permite combinar imagens de dispersão sempre que cada uma for gerada com os mesmos critérios, ou seja, com as mesmas faixas de frequência e velocidade de fase. Portanto, todas as imagens de dispersão da fonte ativa e a fonte passiva analisadas nos itens anteriores foram geradas usando frequência máxima de 50 Hz e velocidade de fase máxima de 500 m/s, para conseguir combiná-las.

A Figura 5.9 apresenta as imagens de dispersão das aquisições MASW passiva, ativa e a combinação das duas. A imagem de dispersão adquirida da fonte passiva da Figura 5.9 é a que foi obtida da aquisição MASW ativa da linha L2 na Figura 4.4, e anteriormente apresentada na Figura 5.7. A imagem de dispersão adquirida da fonte ativa é a soma das duas imagens da Figura 5.4 que foram as melhores imagens obtidas na aquisição MASW ativa, e obtida na linha de aquisição L3 da Figura 4.4.

Na Figura 5.9 é possível ver que na imagem de dispersão da fonte passiva a curva de dispersão está melhor definida para baixas frequências, ou seja, para altas profundidades como era de esperar, isso devido a que entre menor a frequência de onda maior é a penetração e maior a profundidade alcançada. Por outro lado, a imagem de dispersão da fonte ativa mostra a curva de dispersão melhor definida para altas frequências, portanto é melhor definida para baixas profundidades. A combinação das imagens de dispersão das duas fontes apresenta curvas de dispersão bem definidas para baixas e altas frequências; fornecendo assim um perfil de velocidades mais completo do que a análise individual de cada imagem.

O perfil de velocidades obtido da inversão da curva de dispersão da combinação de imagens passiva e ativa está apresentada na Figura 5.10, junto com os perfis obtidos das análises separadas. Os resultados mostram que até uma profundidade de 4,3 m, a velocidade pode ser considerada constante, com uma média de 58 m/s, o que é representativo da velocidade dos resíduos sólidos da célula experimental. De 4,3 m até 6 m, a velocidade aumenta para 75 m/s. Esse aumento na velocidade indica que está associado à camada compactada do solo localizada na base da célula experimental. As velocidades obtidas em maiores profundidades (superiores a 5,8 m) estão relacionadas ao antigo aterro sanitário, sobre o qual a célula experimental foi construída. A média da

velocidade dos primeiros 5 m do aterro antigo (de 5 a 10 m) foi de 84 m/s, e aumentou para 135 m/s na profundidade de 16 m.

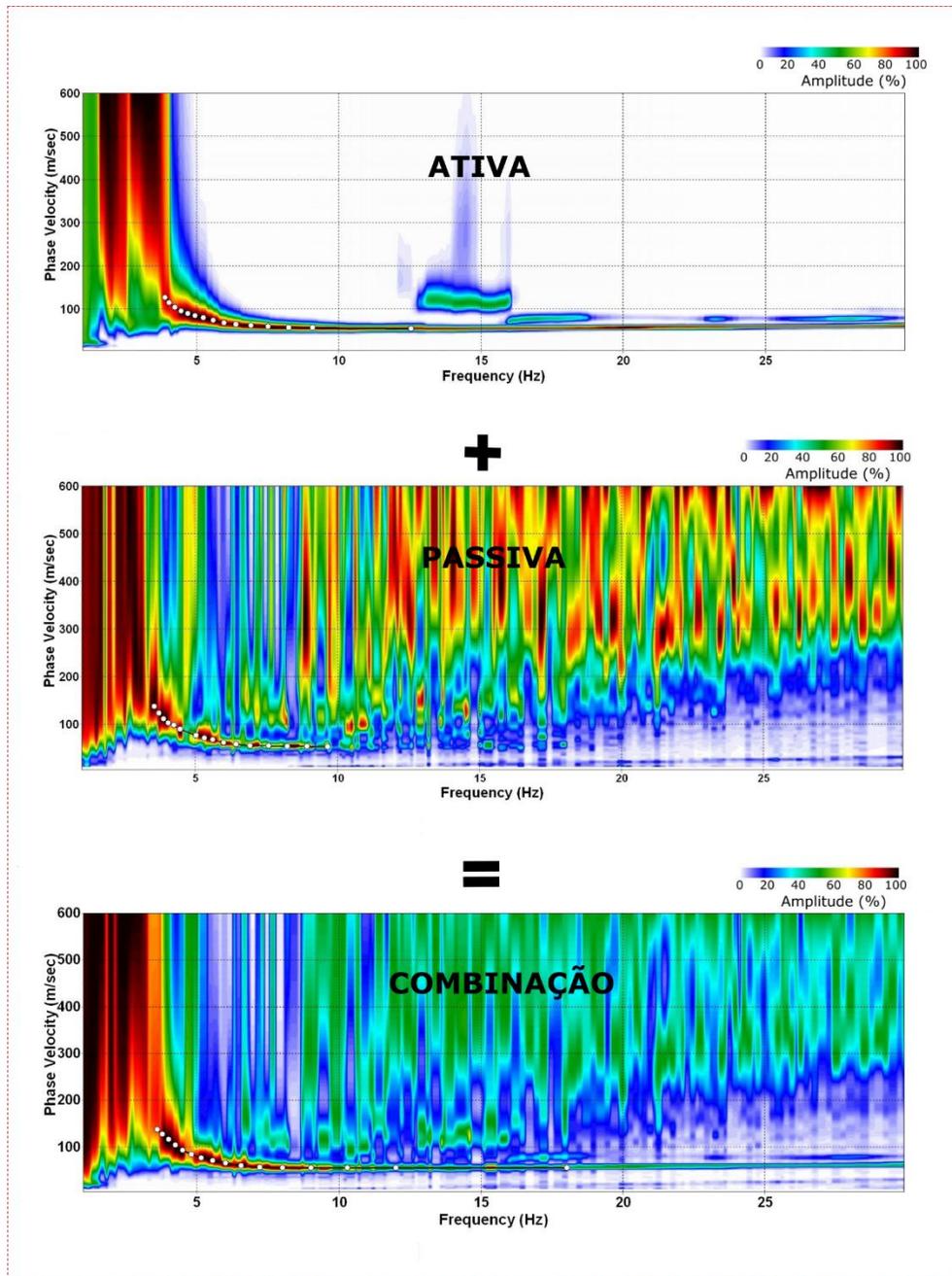


Figura 5.9: Imagens de dispersão obtidas de aquisições MASW passiva (topo), ativa (médio) e a combinação das duas imagens (embaixo).

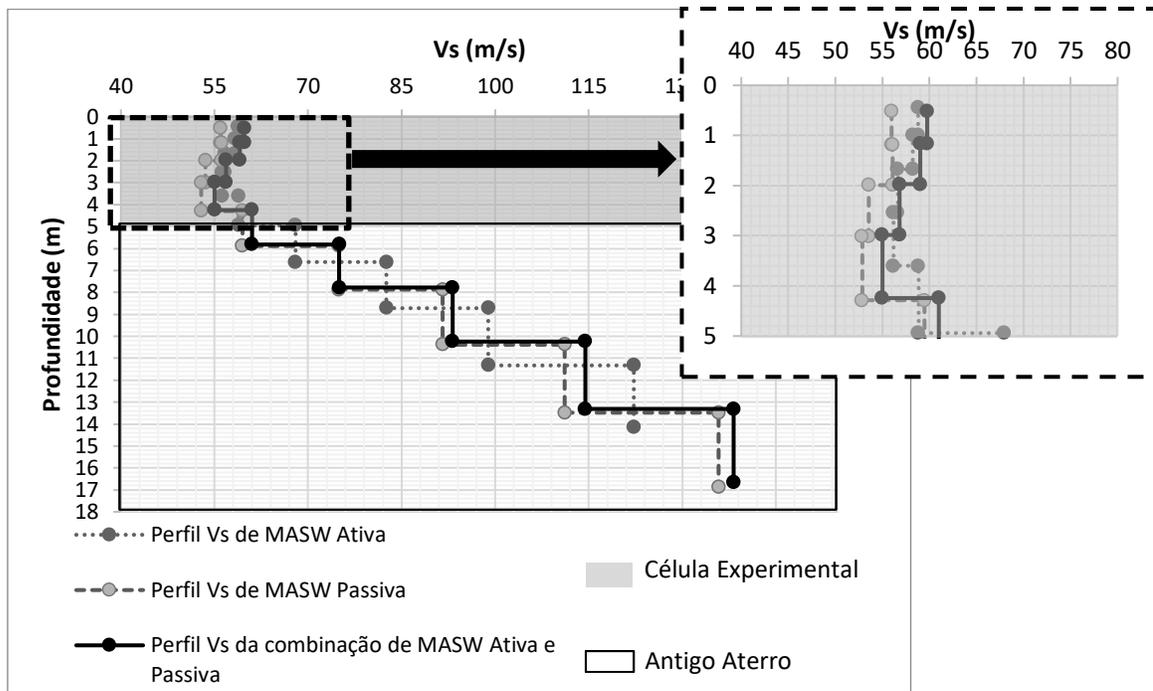


Figura 5.10: Perfil de velocidade  $V_s$  obtido da combinação de MASW passiva e ativa na célula experimental junto com o perfil obtido das análises por separado.

### 5.3. Crosshole

Os dados de crosshole foram analisados utilizando o software livre Seismic Unix (Cohen, 1996), que foi usado para selecionar as primeiras chegadas de ondas P e as chegadas das ondas S. Posteriormente, esses tempos de chegada selecionados foram convertidos em velocidade usando a distância de 3 m que havia entre a fonte e os receptores.

Para selecionar os tempos das chegadas das ondas P, foi usado o critério da primeira chegada. E para a chegada da onda S, foi usado o critério de inversão de polaridade entre os tiros para cima e para baixo. Na Figura 5.11, é mostrado um exemplo de sismograma obtido e a picagem das ondas P e S para o conjunto CH2 na posição de 2 m de profundidade.

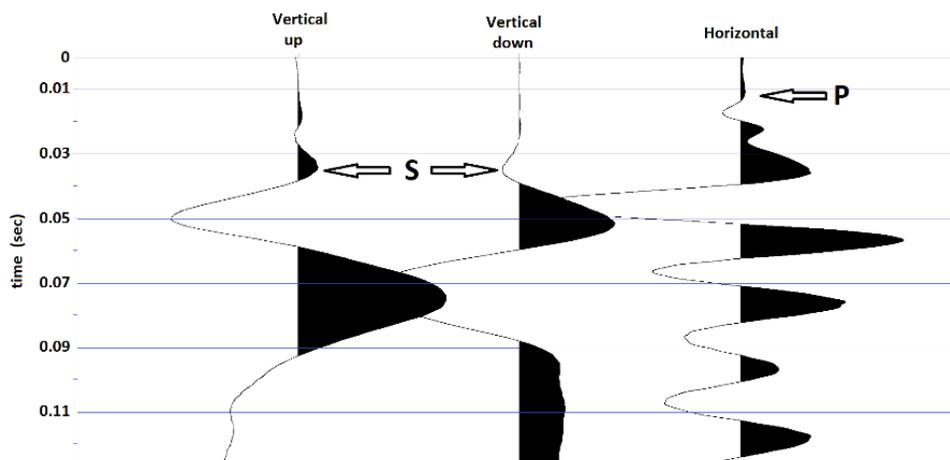


Figura 5.11: Exemplo de sismograma obtido do ensaio crosshole.

Os tempos das ondas P e S foram convertidos em velocidades usando a distância de separação entre os furos de 3 metros. Os resultados das velocidades obtidas são apresentados na Figura 5.12 para a onda P e S nos dois conjuntos de furos. Para o conjunto CH1 o perfil  $V_p$  começou só a partir de 1 m de profundidade, pois não foi possível realizar a medida a 0,5 m já que o furo ficou sem água nessa profundidade.

Para a onda P, a velocidade média entre os dois conjuntos de furos varia de 217 até 250 m/s. Para a onda S a velocidade média varia de 85 até 89 m/s. A máxima diferença de velocidade  $V_p$  e  $V_s$  entre CH1 e CH2 acontece na profundidade de 1-1,25 m, sendo que é de 24 m/s para a P e de 5 m/s para a onda S. A onda P apresenta maior variação de velocidade com a profundidade do que a onda S.

Se comparados os valores de  $V_p$  e  $V_s$  obtidos usando o método crosshole, com as velocidades obtidas usando a sísmica de refração e MASW, observa-se que os valores de velocidades do crosshole tendem a ser maiores do que as obtidas com os outros métodos sísmicos. Isso acontece pelas diferentes frequências que são analisadas com os distintos métodos sísmicos. O método crosshole analisa maiores frequências do que o método MASW, afetando as velocidades obtidas.

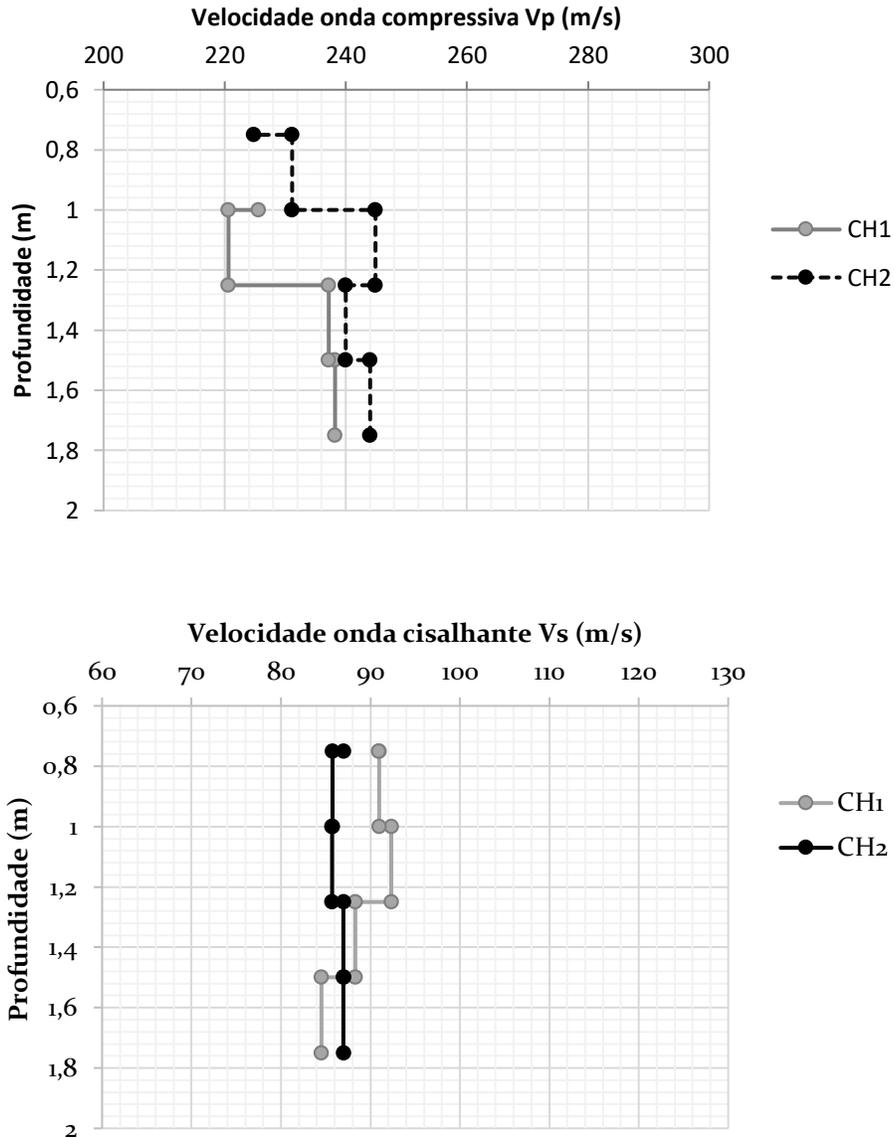


Figura 5.12: Perfis de velocidades de onda compressiva  $V_p$  (acima) e cisalhante  $V_s$  (embaixo), obtidas do crosshole nos dois conjuntos de furos CH1 e CH2 da célula experimental Delta A.

#### 5.4. Propagação de onda diretamente transmitida - Lisímetro

Além de estudar as velocidades na célula experimental do Aterro Delta A, também foi realizada a medição de velocidade de onda compressiva  $V_p$  nos RSU dispostos no lisímetro L1 da UNICAMP.

Os dados foram adquiridos disparando nos dois lados do lisímetro: lado 1 e lado 2 (Figura 4.9). Primeiro, foram obtidos os dados dando o tiro no lado 1, depois foram drenados 9

litros de chorume do lisímetro, e a aquisição prosseguiu com o tiro no lado 2. Os sismogramas obtidos foram analisados utilizando o programa Seismic Unix, onde foi realizada a seleção das primeiras chegadas de onda em todos os sinais registrados pelos dois receptores de componentes horizontais.

A Figura 5.13 mostra a imagem ampliada de um dos sismogramas obtidos e as primeiras chegadas que foram escolhidas para a camada de RSU (na profundidade de 1 a 2 m). Os sismogramas indicados em preto foram os tiros dado no lado 1, enquanto os azuis mostram os tiros dados no lado 2 drenado. Pode-se observar que há coerência nos dados das ondas obtidas para os dois lados do lisímetro na mesma profundidade.

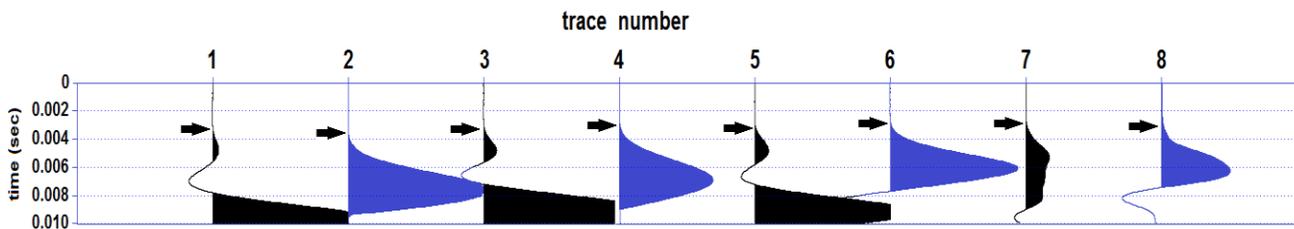


Figura 5.13: Sismograma obtido na camada de resíduos para tiros dados no lado 1 sem drenagem de chorume (ondas pretas) e para tiros dados no lado 2 drenados (ondas azuis). Registrados os traços 1 e 2 a uma profundidade de 1,08 m; traços 3 e 4, a uma profundidade de 1,28 m; vestígios 5 e 6, a uma profundidade de 1,48 m; e os traços 7 e 8, a uma profundidade de 1,68 m.

Os perfis de  $V_p$  obtidos das ondas diretas no lisímetro são mostrados na Figura 5.14. Os valores de velocidade da onda P indicam a média das duas componentes horizontais, e as barras de erro denotam o erro padrão. Na Figura 5.14 é observado que as velocidades obtidas para a camada de solo são inferiores às velocidades obtidas para a camada superior de cascalho (250 m/s a uma profundidade de 0,68 m).

As altas velocidades nos RSU vistas nas profundidades superiores a 2 m são atribuídas à influência da base de concreto reforçado do lisímetro e do cascalho da base de drenagem de lixiviados, para os quais as primeiras chegadas que são colhidas estão relacionadas ao caminho através da parede e base (caminho de menos tempo) e não aquele através da camada de resíduos sólidos, que vai diretamente do ponto de origem para os geofones. Portanto, a análise do perfil de velocidade da onda P é restrita a profundidades de 1-1,8 m, ou seja, apenas para o primeiro metro da camada de resíduos sólidos (velocidades obtidas sem a influência do concreto ou cascalho).

A Figura 5.14 mostra uma imagem ampliada do perfil de velocidade da onda P para a camada que será analisada (de 1-1,8 m de profundidade). As velocidades da onda P para a camada de resíduos sólidos obtida dos registros para disparo no lado 1 (não drenado) e no lado 2 (drenado) não variam significativamente. O que indica que os nove litros de chorume drenado se encontravam na base do lisímetro e não na camada de resíduos; portanto, não houve diferença significativa nas velocidades da camada de resíduos antes e depois da drenagem. A velocidade média de P para a camada de resíduos sólidos variou entre 185 e 244 m/s, esses valores adquiridos concordam com os obtidos nas anteriores análises sísmicas.

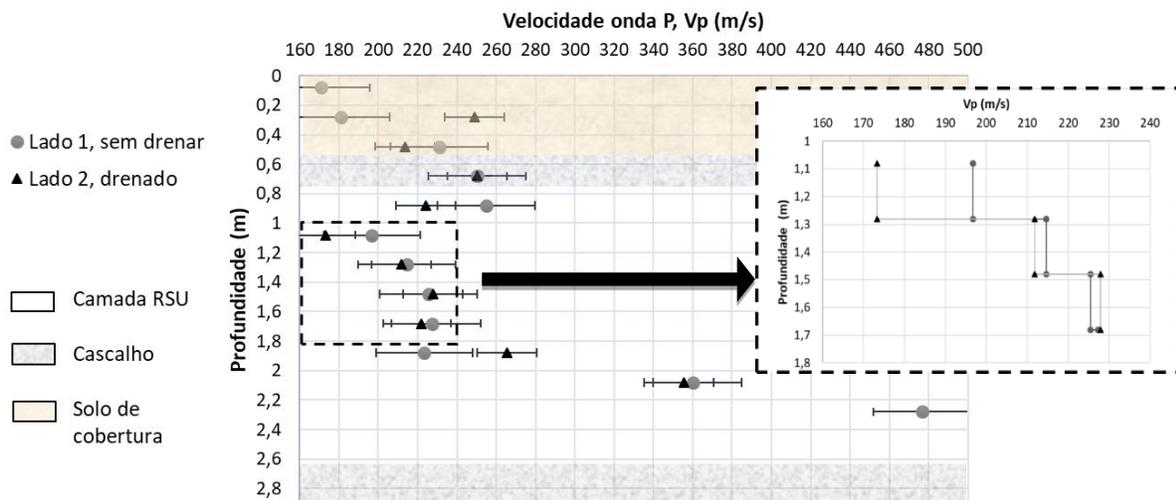


Figura 5.14: Perfil de velocidade para o lisímetro obtido dos tiros no lado 1 sem drenar (triângulo) e no lado 2 após drenar o chorume (ponto). A área sem cor representa a camada de resíduos sólidos, a área em rosa representa a camada de solo e a área em cinza representa a camada de cascalho. O campo ampliado mostra o perfil de velocidade da onda P para a camada de resíduos sólidos, com base nos dados obtidos disparando nos dois lados do lisímetro.

## 5.5. Velocidades de ondas P e S

Os perfis de velocidades de onda P e S calculados com os métodos sísmicos são mostrados na Figura 5.15. A faixa de velocidade  $V_p$  obtida da tomografia sísmica de refração é grande, e contém as velocidades do ensaio crosshole e de propagação de ondas diretas no lisímetro mostrando concordância nos resultados obtidos com os diferentes métodos sísmicos.

Para comparar os valores de velocidade  $V_p$  obtidos com o método crosshole com os obtidos com a tomografia sísmica de refração, foi extraído um perfil de velocidades na posição lateral de 3 m na tomografia sísmica, na mesma posição onde foi realizado o teste crosshole CH1 (Figura 4.4), esse perfil é apresentado na Figura 5.15. Se observa que em média a velocidade adquirida com a refração sísmica é 75 m/s menor do que o obtido com o método crosshole. Essa diferença pode ser explicada devido a:

- i. *As datas das aquisições dos métodos geofísicos.* Os resíduos na época da aquisição do teste crosshole eram dois anos e meio mais antigos do que os resíduos estudados com a tomografia sísmica (Tabela 5-1), devido ao recalque que acontece nos RSU com o tempo, a massa de RSU estudada com crosshole, pode estar mais compactada do que a massa estudada com a tomografia sísmica, fazendo com que as velocidades sejam um pouco maiores para o teste crosshole.
- ii. *A tomografia sísmica inclui a inversão de tempos de chegada* usando o método WET. A natureza da inversão leva a que o modelo de velocidades seja não mais do que uma aproximação aos dados reais, enquanto o método crosshole faz a medição do tempo de chegada da onda diretamente da fonte até o receptor, fazendo que este método seja mais realístico do que a tomografia sísmica.

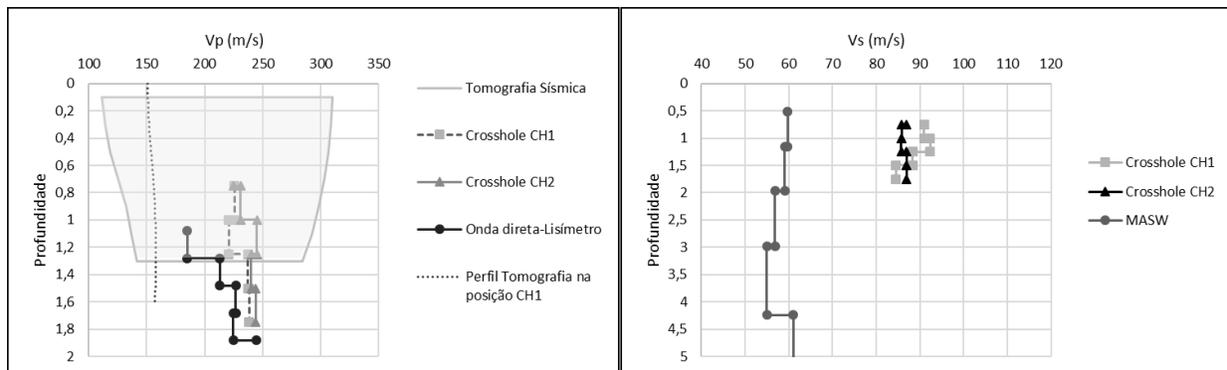


Figura 5.15: Perfis e rango de velocidades  $V_p$  e  $V_s$  dos RSU estudados, obtidos com os diferentes métodos sísmicos.

*Tabela 5-1: Idades dos resíduos nas datas em que foram realizadas as aquisições sísmicas na célula experimental e no lisímetro.*

<b>Local</b>	<b>Método Sísmico</b>	<b>Idade dos resíduos</b>
<b>Célula experimental</b>	Sísmica de refração	3 anos 5 meses
	MASW ativa	3 anos 5 meses
	MASW passiva	4 anos 6 meses
	Crosshole	6 anos
<b>Lisímetro</b>	Propagação onda direta	1 ano 10 meses

Analisando as velocidades de onda S adquiridas dos métodos crosshole e MASW, ve-se que as Vs obtidas do método MASW são menores do que as calculadas com o teste crosshole, com uma diferença de aproximadamente 30 m/s entre elas. Isso já era esperado, pois a energia de frequência analisada com os dois métodos é diferente. Para o método crosshole a frequência utilizada está entre 30 e 94 Hz, enquanto para o MASW a frequência analisada está entre 5-18 Hz. Fazendo com que as velocidades obtidas com o método crosshole sejam maiores do que as obtidas com a refração sísmica como descrito por Zekkos et al. (2013) e confirmado por autores como Abreu et al. (2016). Por outro lado, a aquisição de MASW ativa foi realizada um ano e meio antes do que a aquisição de crosshole e levando em conta que o peso específico pode aumentar com o tempo, devido ao assentamento dos RSU, a velocidade de onda do teste crosshole é maior. Zekkos, (2008) encontrou que a velocidade Vs pode aumentar entre 3 e 7% ao aumentar o peso específico.

Com os resultados de velocidades Vp e Vs para a célula experimental e para o lisímetro, foi realizada uma comparação de dados com resultados de pesquisas desenvolvidos em regiões úmidas e com economias emergentes, onde a composição dos resíduos e o grau de compactação devem ser semelhantes aos encontrados em Campinas. Todos os estudos comparados obtiveram velocidades relativamente baixas se comparadas com as encontradas na maioria de estudos realizados em RSU mundialmente. Na Figura 5.16 é apresentada a comparação entre os valores de velocidades de onda P para a célula experimental, o lisímetro e outros estudos, e na Figura 5.17 é apresentada a comparação de velocidades de onda S para a célula experimental, os resíduos mais antigos sobre os quais foi construída a célula experimental e outros estudos.

### *Velocidades de onda compressiva $V_p$*

Os valores de velocidade de onda P encontrados com tomografia sísmica de refração, mostram uma grande faixa de velocidades se comparada com as obtidas com outros métodos (Figura 5.16), como por exemplo o caso do estudo de Wongpornchai et al. (2009) no aterro abandonado no distrito Mae-Hia na Thailandia e a célula experimental (usando o método de tomografia sísmica de refração). Entretanto, podemos ver que a faixa de velocidades obtida com crosshole por Abreu et al. (2016) no aterro sanitário de São Carlos é menor do que a obtida com sísmica de refração mas se encontra dentro das faixas de velocidades obtidas por Wongpornchai et al. (2009) e na célula experimental (usando o método de tomografia sísmica de refração) concordando com esses estudos.

O perfil de velocidades da célula experimental calculado com o método crosshole, está dentro das faixas de velocidades obtidas por Abreu et al. (2016) e com tomografia sísmica na célula experimental. Os valores obtidos na camada de resíduos no lisímetro, também concordam com os valores reportados por Abreu et al. (2016) e dentro da faixa de velocidades obtida com tomografia sísmica na célula experimental.

Porém, os valores obtidos com crosshole nesse estudo distam dos valores obtidos por Carvalho (1999) usando crosshole no Aterro Sanitário Bandeiranes. Isso pode ser explicado pela idade de aterramento dos RSU na época das aquisições, para a célula experimental a idade de aterramento dos resíduos foi de 6 anos quando usado o teste crosshole, enquanto no estudos de Carvalho (1999) a idade de aterramento dos resíduos foi de 15 anos.

Em resumo, os valores de velocidades da onda P obtidos nesse estudo estão em concordância com os valores obtidos por outros estudos realizado em regiões com condições similares.

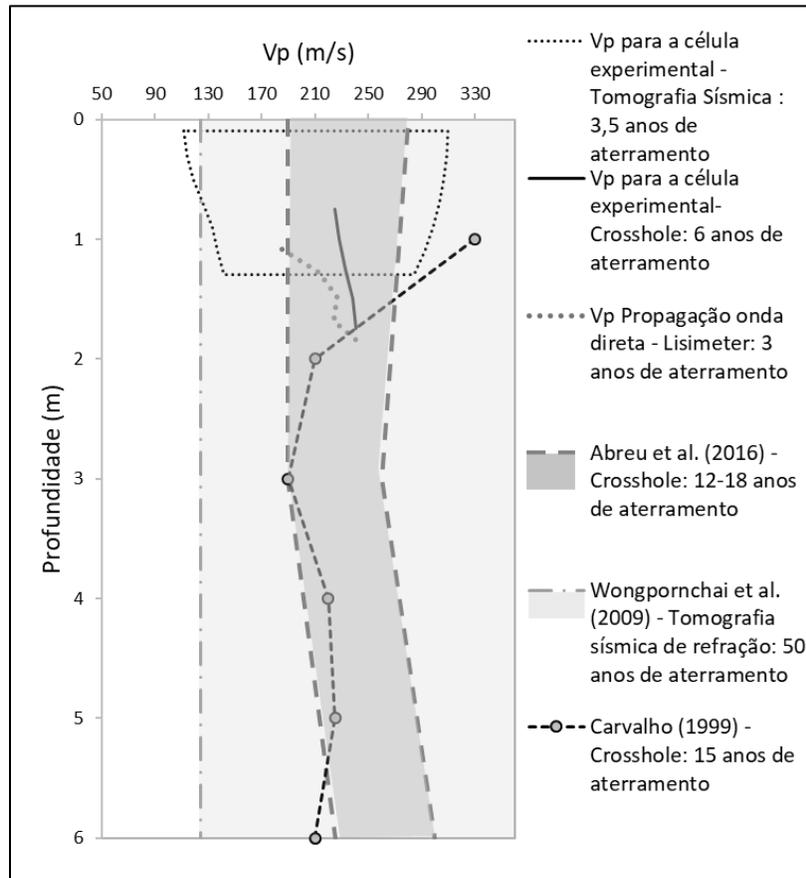


Figura 5.16: Comparação de velocidades onda P desse estudo com estudos desenvolvidos em áreas com condições climáticas e socioeconômicas similares.

#### Velocidades de onda cisalhante $V_s$

Os valores de  $V_s$  obtidos na célula experimental por crosshole e MASW mostram que  $V_s$  está no limite inferior do intervalo de velocidades reportada por Anbazhagan et al. (2016), que utilizou MASW no aterro sanitário Mavallipura localizado na Índia, reportando velocidades mínimas de 53 m/s. Porém, as velocidades  $V_s$  para a célula experimental obtidas com crosshole estão no limite superior da faixa de velocidades reportadas por Anbazhagan et al. (2016).

O estudo de Carvalho (1999), que usou o método crosshole, apresenta velocidades maiores do que as obtidas para a célula experimental. Porém, os resultados de velocidades  $V_s$  para a célula experimental com o método crosshole concordam com Abreu et al. (2016) e Abreu (2015), os quais usaram os métodos crosshole e MASW

respectivamente no aterro sanitario de São Carlos. Se observa também que de forma similar ao obtido nesse estudo, as velocidades reportadas usando o método crosshole, são maiores do que as adquiridas usando o método MASW no estudo do aterro sanitario de São Carlos desenvolvido por Abreu et al. (2016) e (Abreu, 2015).

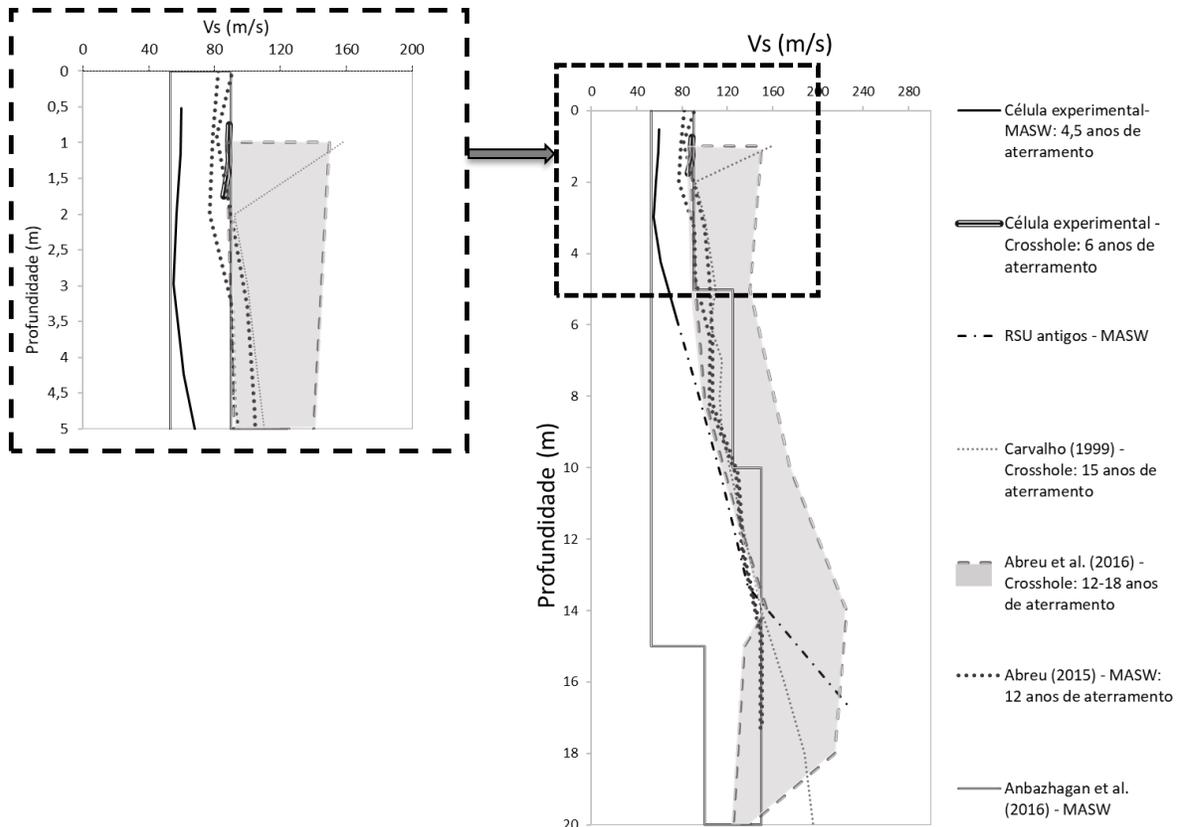


Figura 5.17: Comparação de velocidades de onda S desse estudo com estudos desenvolvidos em áreas com condições climáticas e socioeconômicas similares.

## 5.6. Modelo empírico de velocidade de onda cisalhante

Um modelo empírico de velocidade de onda cisalhante foi usado para descrever a tendência  $V_s$  com a profundidade, usando os valores de  $V_s$  obtidos com o método MASW na célula experimental.

O modelo hiperbólico usado é o proposto e calibrado por Zekkos et al. (2013) utilizando dados de 49 perfis de velocidade de onda de cisalhamento in situ em 19 aterros de RSU localizados em USA e na Espanha.

A equação do modelo é dada por:

$$V_s = V_{si} + \frac{z}{\alpha_{Vs} + z \beta_{Vs}} \quad (5.1)$$

Onde  $V_{si}$  é a velocidade estimada da superfície dos RSU (sem considerar a cobertura),  $\alpha_{Vs}$  e  $\beta_{Vs}$  são os parâmetros de ajuste da equação e  $z$  a profundidade. Os parâmetros do modelo são constantes derivadas do ajuste da curva aos dados e descrevem a forma da curva. Greenwood et al., (2015) apresentaram a importância de cada parâmetro do modelo indicando que um  $V_{si}$  maior é indicativo de um material mais rígido na superfície; o parâmetro  $\alpha_{Vs}$  controla a inclinação inicial da curva e valores maiores de  $\alpha_{Vs}$  indicam aumentos mais lentos em  $V_s$  com a profundidade perto da superfície e o parâmetro  $\beta_{Vs}$  controla o valor máximo de  $V_s$  que o modelo abordará assintoticamente sendo que a diferença entre o  $V_{si}$  (na superfície) e a máxima  $V_s$  (em grandes profundidades) é dado por  $1/\beta_{Vs}$ . A vantagem do uso da função hiperbólica, é que se ajusta em perfis com diferentes formas e comportamentos.

Foram usados os dados de  $V_s$  obtidos com o método MASW na célula experimental para calibrar o modelo de velocidades para a célula experimental e o antigo aterro sanitário Delta A e os resultados de  $V_s$  obtidos pelo método MASW para o aterro sanitário de São Carlos por Abreu (2015). Os resultados dos parâmetros obtidos do ajuste de dados  $V_s$  para a célula experimental são apresentados na Tabela 5-2, junto os parâmetros de ajuste obtidos para os dados de velocidade  $V_s$  do aterro sanitário de São Carlos, obtidos em 3 perfis (L1, L2 e L3) com o método MASW por Abreu (2015) e os parâmetros propostos por Zekkos et al. (2013).

Tabela 5-2: Parâmetros de ajuste médios obtidos para dados de campo *in situ*. As velocidades  $V_s$  para a célula experimental foram obtidos usando MASW. O estudo de Abreu (2015) é para o aterro sanitário São Carlos -SP.

Estudo	$V_{si}$ (m/s)	$\alpha_{Vs}$ (s)	$\beta_{Vs}$ (s/m)	Profundidade máxima (m)
<b>Célula experimental – MASW</b>	58	0,40±0.04	<b>-0,0182±0.0027</b>	16
<b>Abreu (2015) – L1 MASW</b>	80	0,26±0.05	<b>-0,0022±0.0036</b>	17
<b>Abreu (2015) – L2 MASW</b>	80	0,22±0.04	0,0001±0.0026	17
<b>Abreu (2015) – L3 MASW</b>	80	0,27±0.05	<b>-0,0026±.0035</b>	17
<b>Zekkos et al. (2013)</b>	89	0,08	0,0062	30

Os modelos de  $V_s(z)$  obtidos para a célula experimental no aterro sanitário Delta A e para os Perfis MASW L1-L3 do aterro sanitário de São Carlos, assim como o proposto por Zekkos et al. (2013), são plotados na Figura 5.18. Para a célula experimental (e RSU antigos do Aterros Sanitário Delta A), o valor alto de  $\alpha_{Vs}$  indica aumentos mais lentos de velocidade com a profundidade na parte mais superficial; o valor alto de  $|\beta_{Vs}|$ , indica que a velocidade nas maiores profundidades é muito maior em relação a velocidade da superfície  $V_{si}$ .

Ve-se que o modelo proposto por Zekkos et al. (2013) não se ajusta ao modelo obtido para o aterro Delta A nem aos modelos obtidos para o aterro sanitário de São Carlos, mudando não só os valores dos parâmetros, mas também o comportamento do ajuste.

No modelo proposto por Zekkos et al. (2013), o parâmetro  $\beta_{Vs}$  é positivo, enquanto os modelos obtidos para a célula experimental e o aterro sanitário de São Carlos (Perfis L1 e L3) o parâmetro  $\beta_{Vs}$  é negativo. Os modelos obtidos do ajuste aos dados de MASW no aterro de São Carlos apresentam um comportamento similar entre eles, ajustando-se melhor aos dados da célula experimental do que o modelo de Zekkos et al. (2013).

Os resultados dos modelos de  $V_s$  com a profundidade confirmam que os modelos propostos na literatura para as diferentes propriedades dos aterros sanitários devem ser usados com precaução. Isso porque em sua maioria são feitos para aterros sanitários com diferentes características às encontradas no Brasil, como por exemplo, diferentes graus de compactação, teor de umidade e composições, sendo que não são ajustáveis aos aterros sanitários do Brasil.

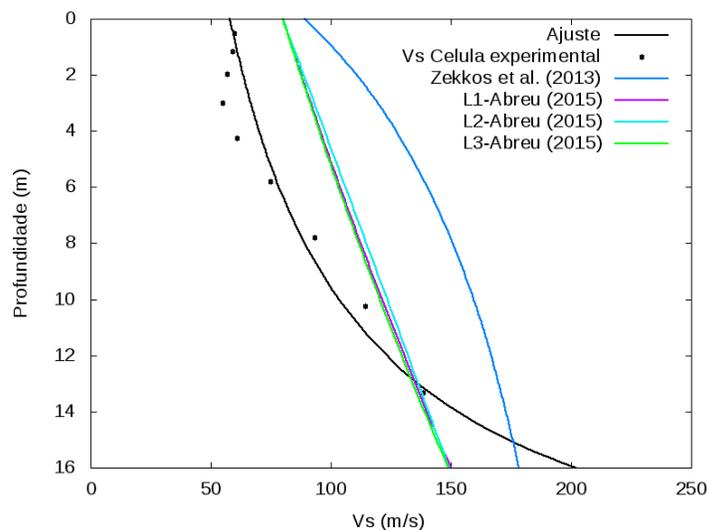


Figura 5.18: Modelo empírico de  $V_s$  versus profundidade usando parâmetros obtidos para ajuste de dados da célula experimental, do aterro sanitário São Carlos - Abreu (2015) e o proposto por Zekkos et al. (2013).

Portanto, o modelo desenvolvido no aterro sanitário Delta A deve ser usado somente em aterros com as mesmas características, sendo um avanço para a ampliação do banco de dados de velocidades em aterros sanitários caracterizados com baixa compactação, alta composição de matéria orgânica e localizado em áreas tropicais, que serviram na construção de um modelo robusto que se ajuste a aterros com características similares.

## 5.7. Propriedades elásticas da célula experimental

Com as velocidades obtidas dos vários métodos sísmicos utilizados, foram calculadas as propriedades elásticas nos RSU da célula experimental, do antigo aterro sanitário onde foi construída a célula e do lisímetro. Em seguida serão apresentados os resultados obtidos junto com a comparação dos valores com outros estudos, começando pelo peso específico já que dele dependem as demais propriedades elásticas.

### 5.7.1. Peso específico

Empregando a relação empírica entre a velocidade da onda S ( $V_s$ ) e o peso específico ( $\gamma_{waste}$ ) proposto por Choudhury e Savoikar (2009) para materiais de aterro sanitário, equação ( 5.2 ), foi obtido um peso específico médio de  $6,1 \text{ kN/m}^3$  dos valores de  $V_s$  obtidos nos testes crosshole. Este valor concorda bem com o valor projetado para o

lisímetro (5,93 kN/m<sup>3</sup>) e é menor que o valor projetado para a célula experimental (8 kN/m<sup>3</sup>). Segundo Zekkos (2006), valores entre 5 e 10 kN/m<sup>3</sup> são típicos de aterros com baixo esforço de compactação e quantidade de solo.

$$V_s = \frac{1}{0.0174 - 0.000978 \gamma_{waste}} \quad (5.2)$$

Considerando que a idade da célula experimental é de 6 anos, e que seu RSU já está em fase de biodegradação anaeróbica metanogênica (Paixão Filho, et al., 2017), esperava-se que o peso específico aumentasse, já que os resíduos facilmente degradáveis já foram transformados em lixiviados e biogás, que foram drenados da célula. No entanto, como a célula experimental não foi construída com camadas diárias de solo compactado e ainda não está confinada lateralmente ou verticalmente e, portanto, não está sujeita a um aumento na tensão vertical ou impedância dos deslocamentos horizontais, o valor do peso específico foi baixo. Contudo, este fato deve ser confirmado através de uma medição do peso específico na célula experimental. No entanto, pode-se ver na Figura 5.19, que está de acordo com os valores derivados por Konstantaki et al. (2016) da MASW (ondas de Rayleigh e Love) e dados de reflexão sísmica da onda S usando a mesma relação.

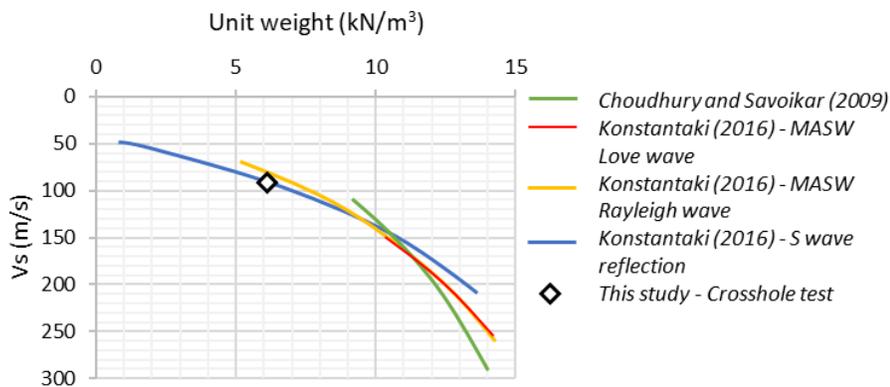


Figura 5.19: Relação entre o peso específico e a velocidade da onda S dos estudos de Choudhury e Savoikar (2009) e Konstantaki (2016), obtidos com os métodos MASW- onda Love, MASW- onda Rayleigh, e reflexão de onda S. A marca de diamante indica o valor proveniente dos dados de crosshole obtidos para a célula experimental neste estudo.

Do peso específico é calculada a massa específica dos RSU mediante a relação  $\rho = \frac{\gamma_{waste}}{g}$ , sendo  $g$  a aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ) e dando como resultado  $627 \text{ Kg/m}^3$  para a célula experimental.

Para os RSU antigos localizados embaixo da célula experimental, foi calculado o peso específico usando a relação empírica de Choudhury e Savoikar (2009) e as velocidades  $V_s$  obtidas com o MASW. Os resultados são apresentados na Tabela 5-3.

*Tabela 5-3: Peso específico e massa específica obtidas usando a relação empírica de Choudhury e Savoikar (2009) para os RSU do antigo aterro sanitário Delta A (resíduos embaixo da célula experimental) usando as velocidades  $V_s$  obtidas do MASW.*

<b>Profundidade</b>	<b><math>V_s</math></b>	<b><math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>5,8</b>	75,0	4,2	423,9
<b>7,8</b>	93,2	6,8	695,6
<b>10,2</b>	114,4	8,9	903,6
<b>13,3</b>	138,2	10,4	1060,6
<b>16,7</b>	226,5	13,3	1354,7

Zekkos et al. (2006) sugeriram um modelo empírico de peso específico de MSW baseado em dados de campo e de laboratório para aterros sanitários municipais. Os perfis de peso unitário para aterros sanitários com esforços de compactação e solo de cobertura baixos e altos obtidos por Zekkos et al. (2006) são mostrados na Figura 5.20, junto com os dados de peso unitário obtidos para o aterro sanitário antigo sob o qual foi construída a célula experimental.

Na Figura 5.20 vemos que os dados obtidos para o antigo aterro sanitário, localizado embaixo da célula experimental, e que foi construído com baixo esforço de compactação e solo de cobertura, não exibem o mesmo comportamento que o perfil indicado por Zekkos et al. (2006) para baixa compactação. Os dados mostram que até uma profundidade de 9 m o comportamento do peso unitário no aterro Delta A é menor que o proposto por Zekkos et al. (2006) e a partir de 9 m os valores são maiores. Isso indica que é importante levar em conta outros aspectos tais como a composição do lixo, incluindo o teor de umidade além do esforço de compactação e da quantidade de cobertura do solo, não sendo sempre adequado o uso dos perfis propostos para uso em aterros sanitários no geral.

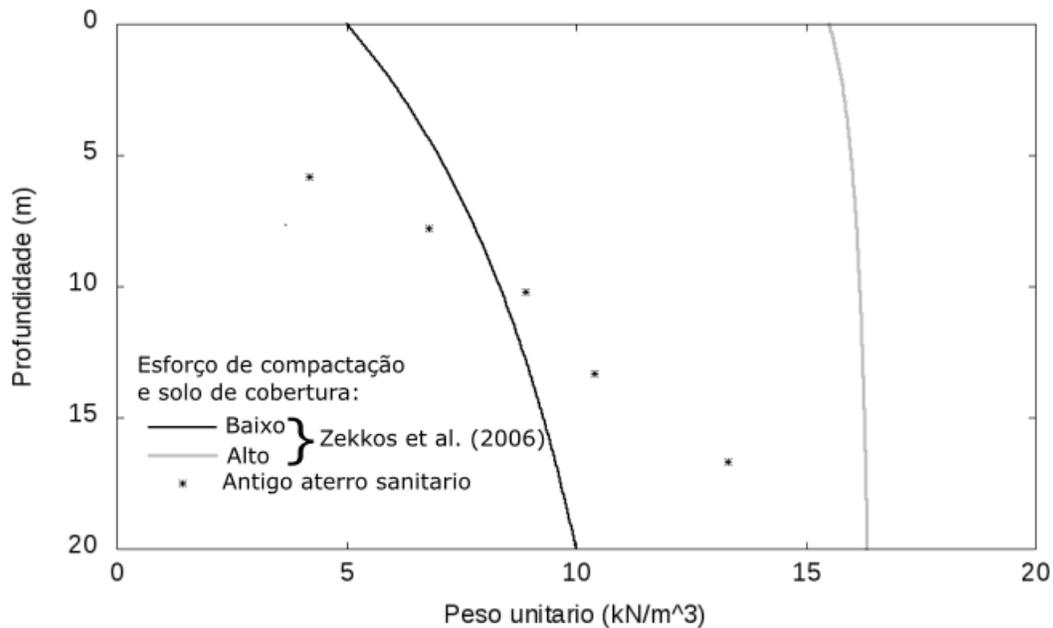


Figura 5.20: Perfis de peso específico recomendados para aterros sanitários municipais por (Zekkos, et al., 2006) para diferentes esforço de compactação e quantidade de cobertura do solo. Comparação com os dados de peso específico obtidos para os RSU dispostos no antigo aterro Delta embaixo da célula experimental, usando a relação empírica de Choudhury e Savoikar (2009) e as velocidades  $V_s$  obtidas com MASW.

### 5.7.2. Parâmetros elásticos dinâmicos

A avaliação dos parâmetros elásticos nos resíduos sólidos urbanos ganhou importância, pois é um passo básico na análise de resposta sísmica, avaliação da estabilidade de taludes e na projeção de aterros sanitários. Com informações prévias sobre a massa específica ( $\rho$ ) do meio e as medidas da velocidade de onda compressiva ( $V_p$ ) e da velocidade de onda de cisalhamento ( $V_s$ ), é possível calcular os parâmetros elásticos como o módulo de Young ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e módulo de cisalhamento ( $G$ ). Nessa seção, são apresentados os resultados dos módulos elásticos dinâmicos obtidos para a célula experimental e para o lisímetro, e será realizada a comparação desses valores com os reportados na literatura.

Primeiro foram calculados os parâmetros elásticos dinâmicos com as velocidades medidas com o método crosshole. Já que com esse método as velocidades  $V_s$  e  $V_p$  foram adquiridas nas mesmas profundidades é possível realizar uma análise da variação dos parâmetros com a profundidade. Os parâmetros dependem da densidade e foram calculados com o valor da massa específica ( $627 \text{ Kg/m}^3$ ) obtido do peso específico na

seção anterior. Na Figura 5.21 é mostrada a variação dos parâmetros com a profundidade para a célula experimental (de 0 até 1.75 m onde foram adquiridas as velocidades  $V_p$  e  $V_s$ ).

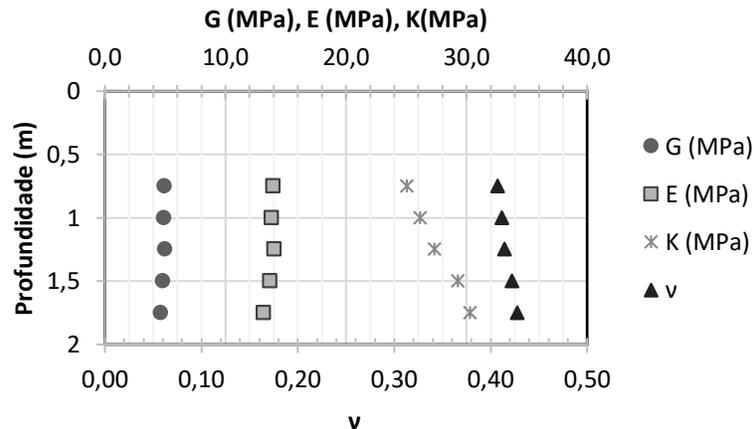


Figura 5.21: Variação dos parâmetros elásticos dinâmicos com a profundidade, na célula experimental. Os parâmetros foram calculados com os dados de  $V_p$  e  $V_s$  obtidos do crosshole e densidade de  $627 \text{ Kg/m}^3$ .

Vemos que o Módulo de cisalhamento ( $G$ ), o Módulo de Young ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) não variam muito com a profundidade. O módulo de cisalhamento médio foi de  $4,9 \text{ MPa}$  e o módulo de Young médio foi de  $13,7 \text{ MPa}$ . Por outro lado, o módulo de compressibilidade ( $K$ ) mostrou um comportamento diferente aos outros parâmetros, aumentando de valor com a profundidade. O coeficiente de Poisson variou entre  $0,40$  e  $0,43$  e o módulo de compressibilidade variou entre  $25$  e  $30,3 \text{ MPa}$ .

Na Tabela 5-4 são apresentados os valores dos parâmetros elásticos para a célula experimental, o antigo aterro sanitário e o lisímetro, calculados utilizando as velocidades adquiridas com os diferentes métodos sísmicos aplicados. Para o lisímetro, a velocidade  $V_p$  é a obtida usando o método de onda direta, e a velocidade  $V_s$  é obtida usando o valor médio do coeficiente de Poisson de  $0,42$  calculado para a célula experimental. Também são apresentados os valores adquiridos com as velocidades do ensaio crosshole na célula experimental dos dados obtidos com crosshole.

Tabela 5-4: Valores das propriedades elásticas obtidas para a célula experimental (até 5 m de profundidade), para o antigo aterro sanitário (de 5 a 16 m de profundidade).

	Prof. (m)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\nu$	G (MPa)	E (MPa)	K (MPa)
<b>Célula Experimental</b> Crosshole	0-1,75	627	224,8-241	85,7-89	0,40-0,42	4,6-4,9	13,1-14	25-30,3
<b>Célula Experimental</b> (SRT e MASW)	0-1,3	627	111-310	59,7	0,29-0,48	2,2	6,45 -10,9	4,8-57,2
<b>RSU antigo</b> (embaixo da célula ex., MASW)	5 - 16	424-1355*	---	61-226	---	2,4-69,5	---	---
<b>Lisímetro</b>	1-2	627	185-244	64,7-90,6 *	0,42**	3,0-5,1	8,4-14,6	17,5-30,5

\* Calculado usando o coeficiente de Poisson.

\*\* Valor tomado como a média do valor obtido da célula experimental.

O valor de densidade é o calculado com a relação entre a velocidade da onda S e o peso específico proposta por Choudhury & Savoikar, (2009) com os dados de Vs do crosshole para a célula experimental e com dados de Vs do MASW para o RSU antigos (embaixo da célula).

### **Módulo de Cisalhamento Máximo**

A comparação entre os valores de G ou  $G_{max}$  obtidos nesse estudo com os obtidos em outros aterros sanitários é apresentados na Figura 5.22, vemos que os valores do módulo de cisalhamento G para a célula experimental (até 5 m de profundidade) são muito mais baixos do que as obtidas na literatura (mínimo de 7.2 MPa).

O módulo de cisalhamento para RSU tende a ser maior para resíduos ricos em matéria semelhante ao solo, quer dizer com fração  $\leq 20$  mm (Sahadewa et al. 2014). Por outro lado, no estudo de Zekkos et al. (2011) os autores descrevem que os valores do módulo de cisalhamento  $G_{max}$  ou  $G_0$  dependem principalmente da composição, sendo que outros fatores como tensão de confinamento, peso específico, tempo sob confinamento são fatores importantes, mais não tanto quanto a composição. Podemos concluir que os valores baixos de módulo de cisalhamento nesse estudo são devido à composição alta em material orgânico.

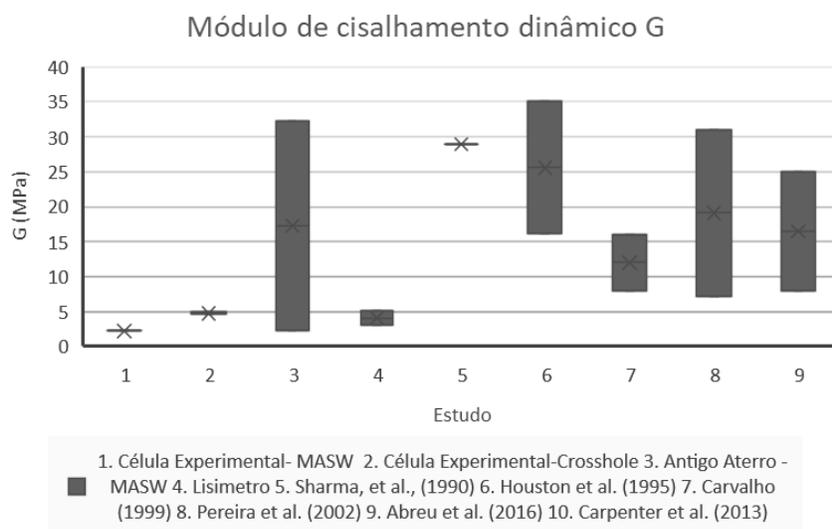


Figura 5.22: Comparação dos valores de módulo de cisalhamento dinâmico de outros aterros e esse estudo.

### **Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )**

Outro valor usado nas análises dinâmicas nos aterros sanitários é o coeficiente de Poisson, que varia entre 0,3 e 0,5 para solos drenados a não drenados respectivamente. Os valores do coeficiente de Poisson obtidos na célula experimental estão no limite superior dos valores reportados na literatura (0.29-0.49) (Carpenter, et al., 2013). Entre mais próximos a 0,5 mais úmido o resíduo, por tanto, os valores projetados para a célula experimental achados usando os dados de crosshole, sugerem resíduos com alto teor de umidade.

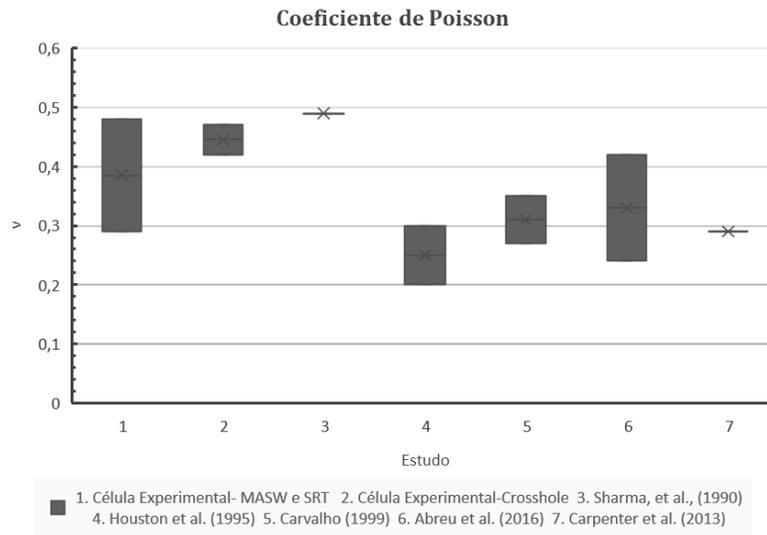


Figura 5.23: Comparação dos valores de coeficiente de Poisson de outros aterros e esse estudo.

### Módulo de Young (E)

O módulo de Young ou módulo de elasticidade está relacionado com o módulo de cisalhamento e com o coeficiente de Poisson. Os valores obtidos para o módulo de elasticidade na célula experimental e no lisímetro tem um comportamento similar ao obtido com o módulo de cisalhamento, estando no limite inferior dos valores reportados na literatura.

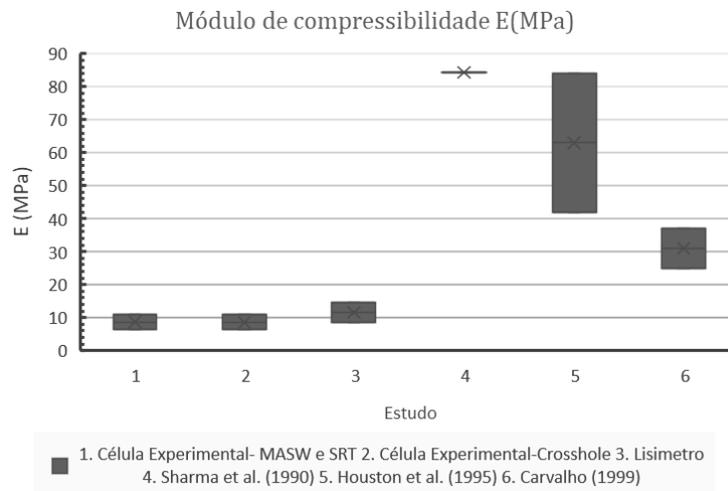


Figura 5.24: Comparação dos valores de módulo de compressibilidade de outros aterros e esse estudo.

Os valores obtidos de E nesse estudo variam entre 6 e 15 MPa aproximadamente, se analisamos esses valores com os valores da Tabela 2-8, que mostra os parâmetros elásticos E para constituintes de RSU, vemos que esses baixos valores concordam com os valores típicos para material semelhante ao solo e matéria orgânica degradável, indicando que a composição alta em material degradável leva a baixos valores de módulo de compressibilidade.

### **5.8. Balanço hídrico na célula experimental**

Com dados de temperatura e precipitação da cidade de Campinas, foi calculada a recarga hídrica para ter uma estimativa e quantificar quanta água pode infiltrar anualmente na célula experimental e em que meses e poder comparar com o conteúdo de umidade dentro da célula experimental.

Foram realizados dois balanços hídricos para a célula experimental. O primeiro foi calculado usando a série de dados de temperatura e chuvas de 20 anos de Campinas e o segundo usando dados de temperatura e chuvas no período em que foram realizadas as aquisições geofísicas, de janeiro de 2015 até dezembro de 2018.

Os dados de temperatura e precipitação utilizados nas análises de recarga hidráulica foram os obtidos pela CEPAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. Foram analisadas duas series de dados, a primeira tomando como valor a média mensal da série de tempo de 20 anos desde 1988 até 2008 (Figura 4.1), e a segunda dados mensais desde janeiro de 2015 até dezembro de 2018.

Devido ao balanço hídrico depender do escoamento superficial, que por sua vez depende da inclinação do terreno, foram considerados dois declives, um considerando a declividade dos taludes maior que 7% e um solo de cobertura argiloso e o outro considerando declividade menor que 7% (para a parte plana da célula) e solo de cobertura argiloso. Essas duas áreas podem ser observadas na Figura 5.25.

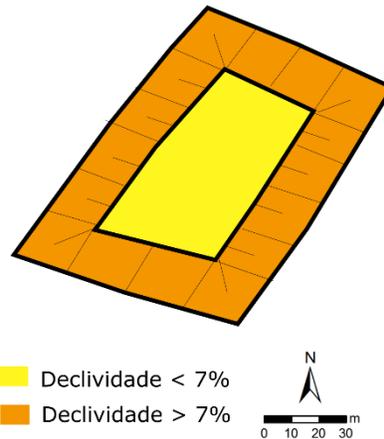


Figura 5.25: Declividades na célula experimental. Taludes com declividade maior a 7% e área plana da célula com declividade < 7%

### 5.8.1. Balanço hídrico para a série de tempo de 1988 até 2008 em Campinas.

Na Figura 5.26 é apresentado o comportamento mensal da evapotranspiração potencial, a precipitação e a temperatura, onde vemos que para os meses com mais chuvas e maiores temperaturas, a evapotranspiração é quase a metade do que a precipitação, e para os meses com mais secos e frios, a evapotranspiração é maior do que a precipitação, indicando que nesses meses de seca acontece evapotranspiração da água armazenada no solo dos meses anteriores.

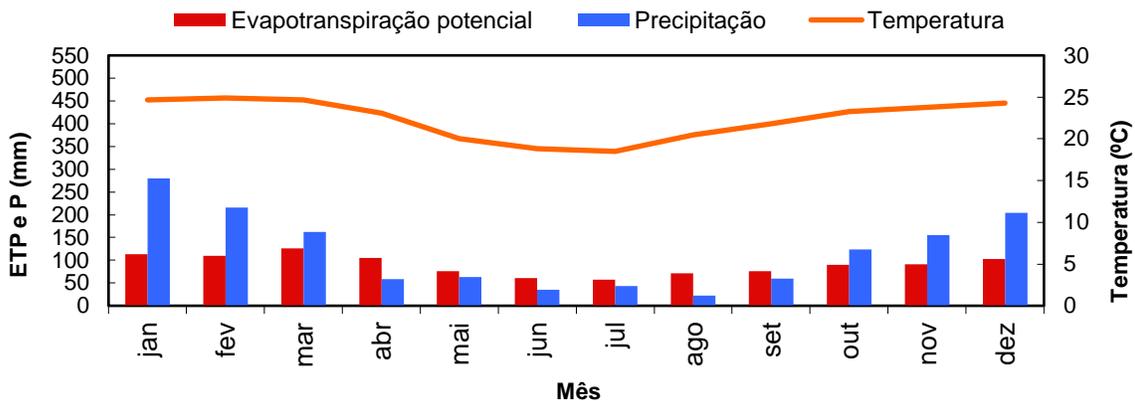


Figura 5.26: Valores anuais de evapotranspiração potencial, precipitação e temperatura para a célula experimental.

Os resultados obtidos por mês para cada uma das variáveis que influenciam no balanço hídrico, tais como, a precipitação, a evapotranspiração real, o escoamento, a recarga e a precipitação para a parte plana e para os taludes da célula são apresentadas na Figura 5.27. Nela vemos que nos meses de outubro até março, o escoamento é similar para os taludes do que para a parte plana, enquanto para os meses de abril até setembro o escoamento é maior nos taludes do que na parte plana. Analisando a recarga, vemos que tem o mesmo comportamento para as duas inclinações consideradas, e os valores de recarga mostram ser só um pouco maiores na parte plana do que nos taludes.

Na Figura 5.28 são comparadas as porcentagens dos valores do escoamento superficial, a recarga e evapotranspiração tanto para os taludes como para a parte plana. Essa figura nos indica que, nos meses de seca (abril-outubro), nas zonas dos taludes o escoamento é maior do que na parte plana, mas isso não afeta porque nesses mesmos meses, não existe recarga. Já para os meses de chuva, o escoamento a evapotranspiração e a recarga é similar para a parte plana e os taludes.

Os valores da precipitação, recarga, evapotranspiração e escoamento anuais para os taludes e a parte plana da célula são apresentados na Tabela 5-5. As porcentagens de recarga na parte plana e nos taludes anualmente são os mesmos, indicando que não tem diferença da recarga nas zonas de taludes com as zonas planas da célula experimental, embora o escoamento nos taludes seja 2,5% maior do que na parte plana do que nos taludes.

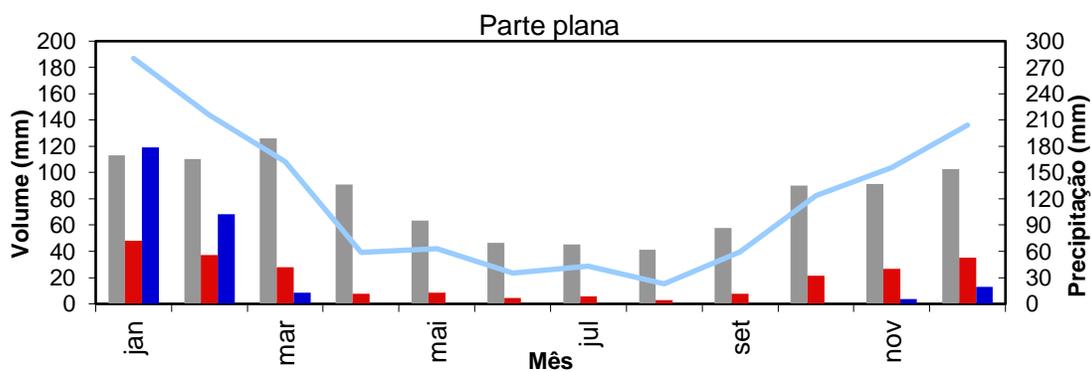
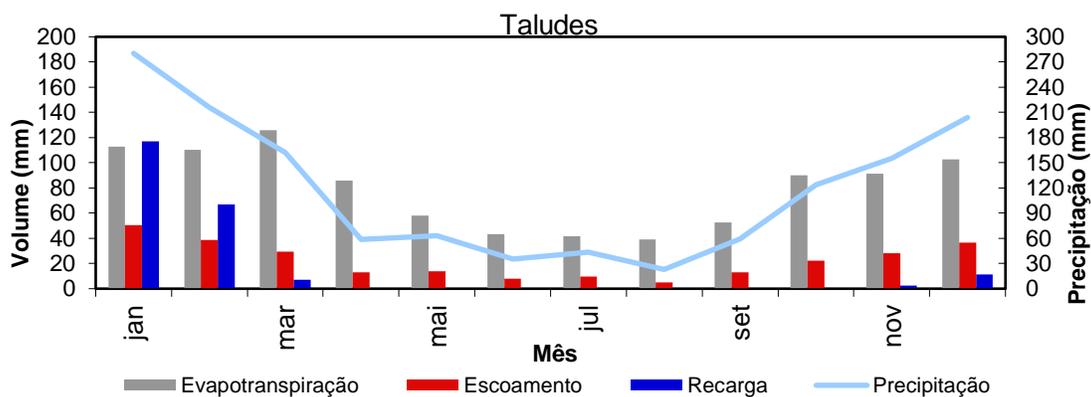


Figura 5.27: Gráfico de evapotranspiração, escoamento, recarga e precipitação dos taludes e da parte plana da célula experimental.

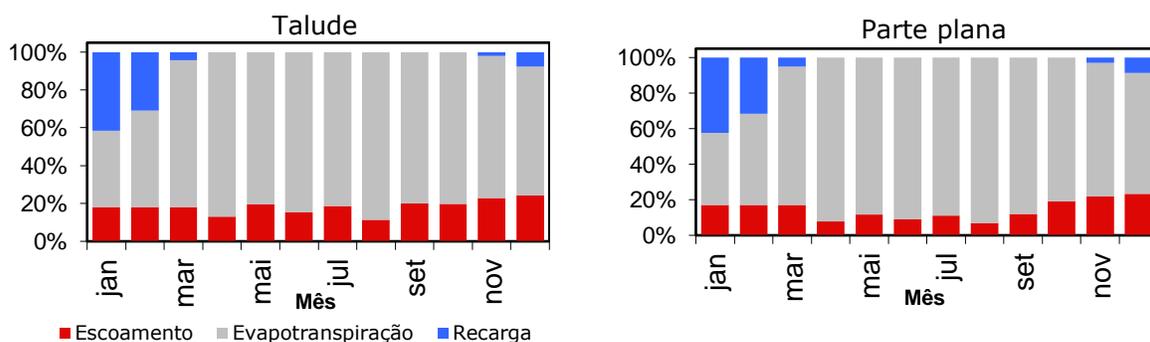


Figura 5.28: Porcentagens de escoamento, evapotranspiração e recarga para os taludes e a parte plana da célula experimental.

Tabela 5-5: Valores das variáveis do balanço hídrico obtido para os taludes e a parte plana da célula experimental.

	Taludes		Parte plana	
	mm/ano	%	mm/ano	%
<b>Precipitação</b>	1425 mm/ano	100,0%	1425 mm/ano	100,0%
<b>Recarga</b>	205 mm/ano	14,4%	213 mm/ano	14,9%
<b>Evapotranspiração</b>	954 mm/ano	66,9%	978 mm/ano	68,7%
<b>Escoamento</b>	268 mm/ano	18,8%	234 mm/ano	16,4%

Finalmente os resultados obtidos do balanço hídrico para a célula experimental são mostrados na Figura 5.29.

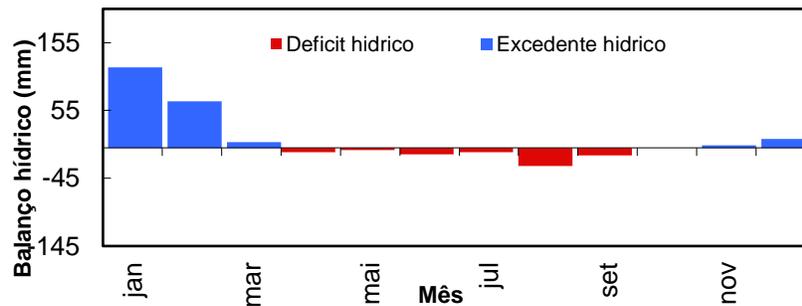


Figura 5.29: Balanço hídrico para a célula experimental.

O balanço hídrico calculado, mostra que nos meses com recarga (que existe excedente hídrico), são de novembro até março, ou seja, a água excedente infiltra no solo fazendo com que aumente a umidade dentro da célula. No restante dos meses existe déficit hídrico, ou seja, não infiltra água no solo e a recarga é zero.

### 5.8.2. Balanço hídrico para os anos de 2015-2018

Para analisar a recarga hidráulica dentro da célula experimental na época em que foram realizadas as aquisições de eletrorresistividade (que foram convertidas em umidade com a lei de Archie) e assim conseguir entender como este influencia a recarga na umidade interna da célula, foi realizada a análise de recarga hídrica com dados mensais de temperatura e precipitações de Campinas no período de janeiro de 2015 até dezembro de 2018. A análise foi desenvolvida para a parte plana da célula já que na seção anterior foi mostrado que não varia o resultado de recarga entre os taludes e a parte plana da célula.

O comportamento da evapotranspiração em relação a precipitação e a temperatura no período estudado é observado na Figura 5.30. Do mesmo modo que observado nas análises de recarga para uma serie de 20 anos já apresentada, nesse caso, a evapotranspiração potencial é menor que a precipitação para os meses de verão e inverte para os meses de inverno exceto para o inverno de 2016 que apresentou alta precipitação comparada com a média.

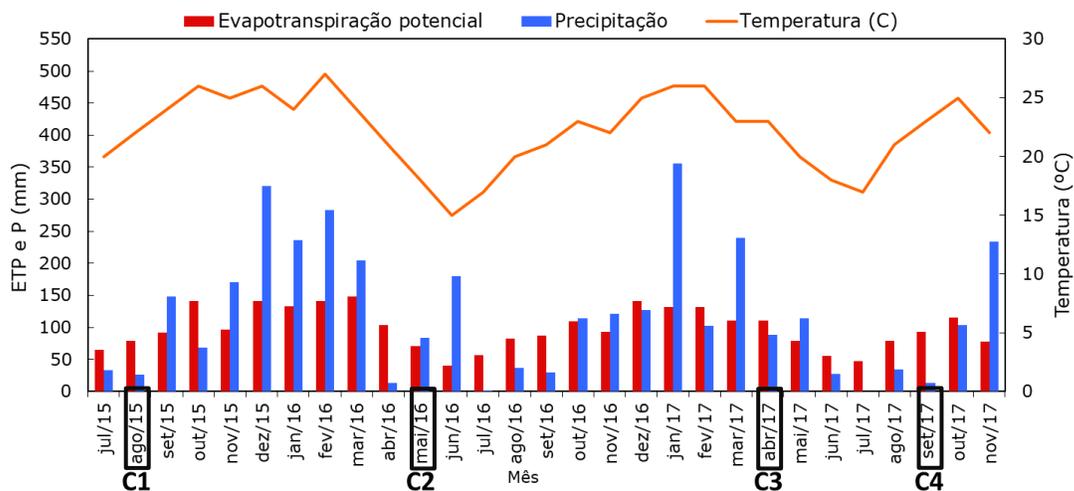


Figura 5.30: Valores de evapotranspiração potencial, precipitação e temperatura para a célula experimental no período compreendido entre 2015 e 2018. As datas selecionadas indicam os meses em que foram realizadas as aquisições de eletrorresistividade.

Na Figura 5.31 são comparadas as porcentagens do escoamento superficial, a recarga e a evapotranspiração. Na análise anterior de recarga hidráulica para a série de 20 anos, foi observado que os meses que apresentavam recarga eram de novembro até março, mas tomando os dados da época analisada é visto que não necessariamente são nesses meses que se tem recarga, assim como o escoamento é menor para os meses de inverno do que para os meses de verão. No período estudado, o mês de maior recarga foi fevereiro de 2016, que não coincide com o mês de maior chuva que foi janeiro de 2017, mas a temperatura, a evapotranspiração e o escoamento foram maiores do que a recarga. Também podemos ver que o período com maior recarga foi o compreendido entre a aquisição C1 e C2.

Finalmente os valores de excedente e déficit hídrico para o período de julho de 2015-novembro de 2018 são exibidos na Figura 5.32. Vemos que o período de maior recarga

na célula foi o compreendido entre novembro de 2015 até março de 2016, sendo cinco meses seguidos com excedente hídrico. Por outro lado, vemos que no período de fevereiro de 2018 até julho de 2018 teve um déficit hídrico, ou seja, o valor da recarga nesse período foi de zero.

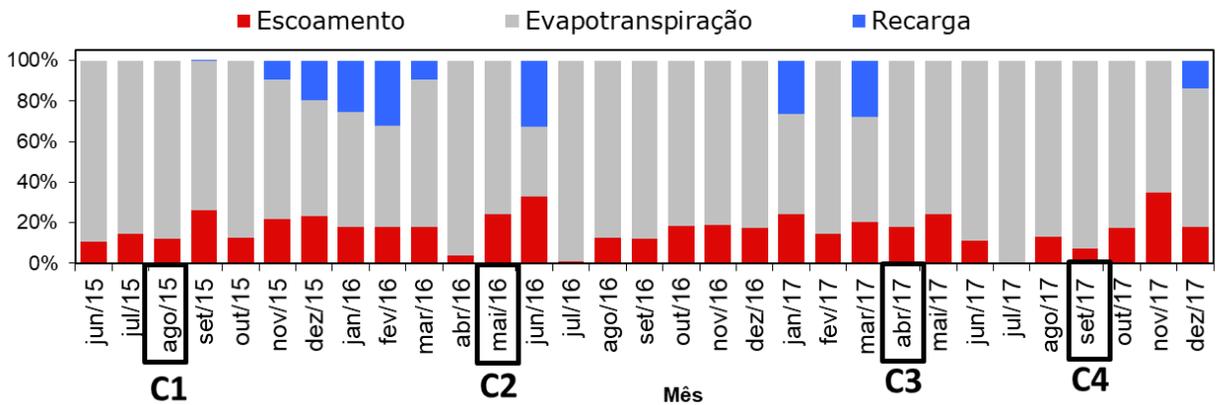


Figura 5.31: Porcentagens de escoamento, evapotranspiração e recarga para a célula experimental no período estudado compreendido entre julho de 2015 e dezembro de 2018. As datas selecionadas indicam os meses em que foram realizadas as aquisições de eletrorresistividade.

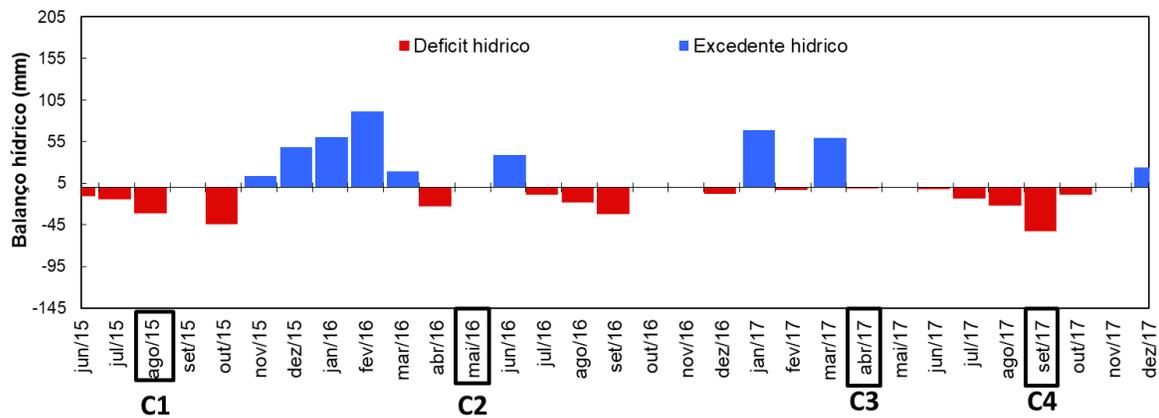


Figura 5.32: Balanço hídrico para a célula experimental no período de 2015-2018. As setas indicam os meses em que foram realizadas as aquisições de eletrorresistividade. As datas selecionadas indicam os meses em que foram realizadas as aquisições de eletrorresistividade.

## 5.9. Eletroresistividade e polarização induzida

Os dados de ER e IP adquiridos foram processados e analisados com o programa *RES2DInv*. Para as análises foram usados dois tipos de inversão: a robusta e a suave e foi adicionada a topografia nos modelos para conseguir fazer uma melhor análise dos resultados.

Nas Figura 5.33 e Figura 5.34 são apresentados os modelos para a linha de aquisição C1, feitos com inversão suave de dados e inversão robusta respectivamente incluindo a topografia. No primeiro modelo (inversão suave) não é possível ver a base da célula experimental bem definida como é visto no segundo modelo (inversão robusta) que foi marcada de cor cinza. No modelo robusto (Figura 5.34) é observada a presença de uma descontinuidade no modelo de cargabilidade na base da célula que sugere ser um bolsão de churume.

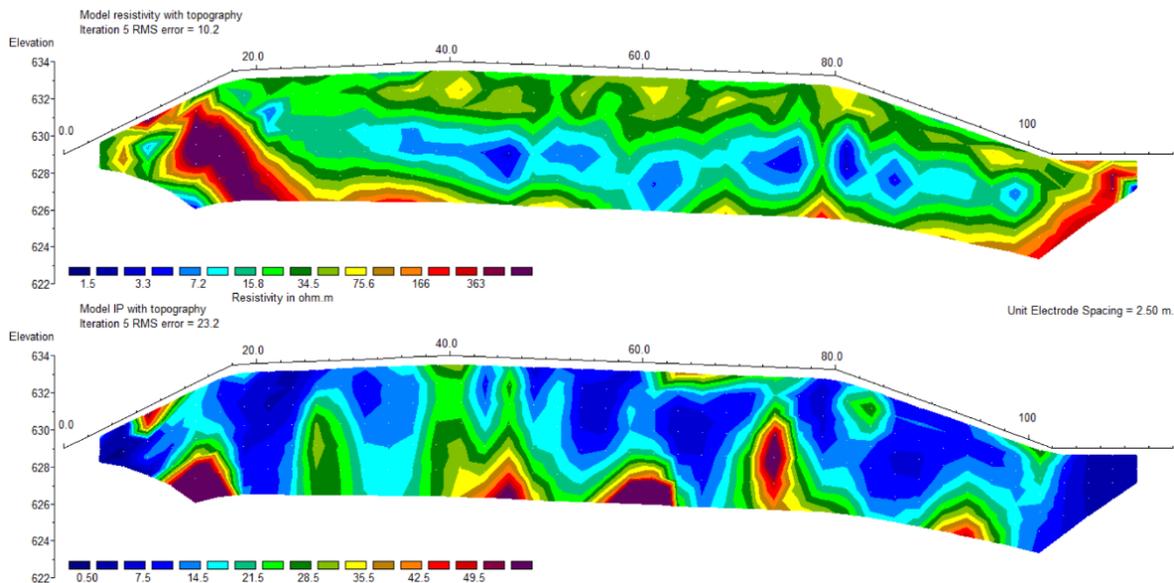


Figura 5.33: Modelos de Resistividade e cargabilidade usando inversão suave de dados para a linha de aquisição C1.

A inversão robusta tem melhor desempenho no caso de terrenos heterogêneos nos que ocorrem mudanças repentinas nos valores de resistividade (ou cargabilidade), como no caso dos RSU, por isso foi escolhido esse método de inversão.

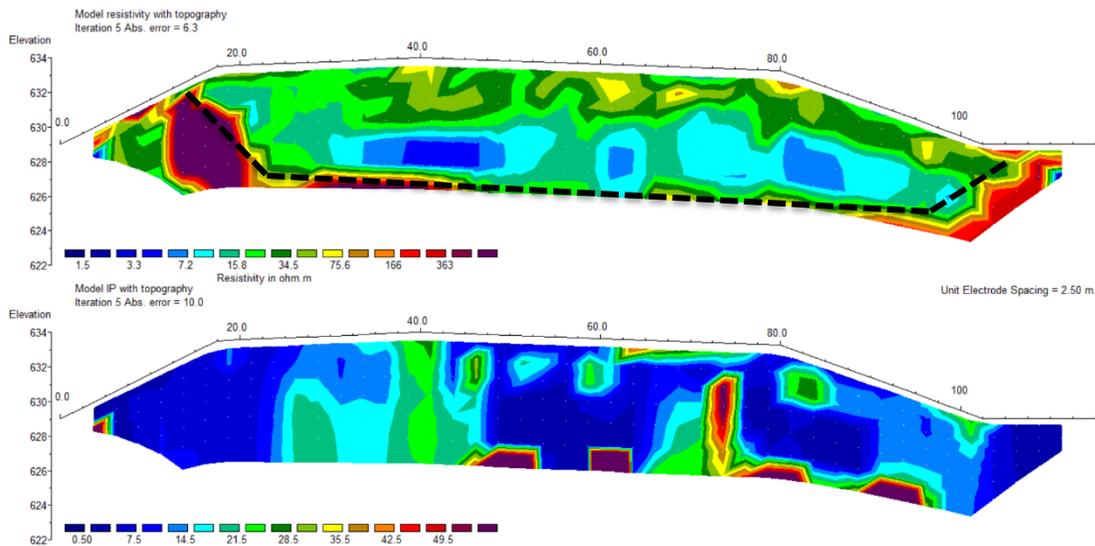


Figura 5.34: Modelo de Resistividade e Cargabilidade para a linha de aquisição C1 usando inversão robusta de dados. No modelo de resistividade está marcada com linha pontilhada preta a base da célula experimental e no modelo de cargabilidade é marcado o bolsão de churume no médio da célula com um círculo preto.

### Comparação de Caminhamentos Elétricos

Na comparação entre os perfis de resistividade para ao longo do tempo são mostradas na Figura 5.35. Para a linha de aquisição C3 a primeira parte do perfil de resistividade não foi armazenada por problemas no equipamento, por isso a linha inicia a partir dos 50 m de posição lateral.

Os quatro perfis mostram que a base da célula experimental pode ser demarcada facilmente pois apresentam resistividades altas com valores superiores aos 40  $\Omega$ m, também no topo dos perfis aparecem valores altos de resistividade associados a camada de cobertura da célula. Já, no centro dos perfis, os valores de resistividade decrescem, indicando a presença da camada de RSU, os valores baixos de resistividade são devido à elevada carga de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) característica do chorume.

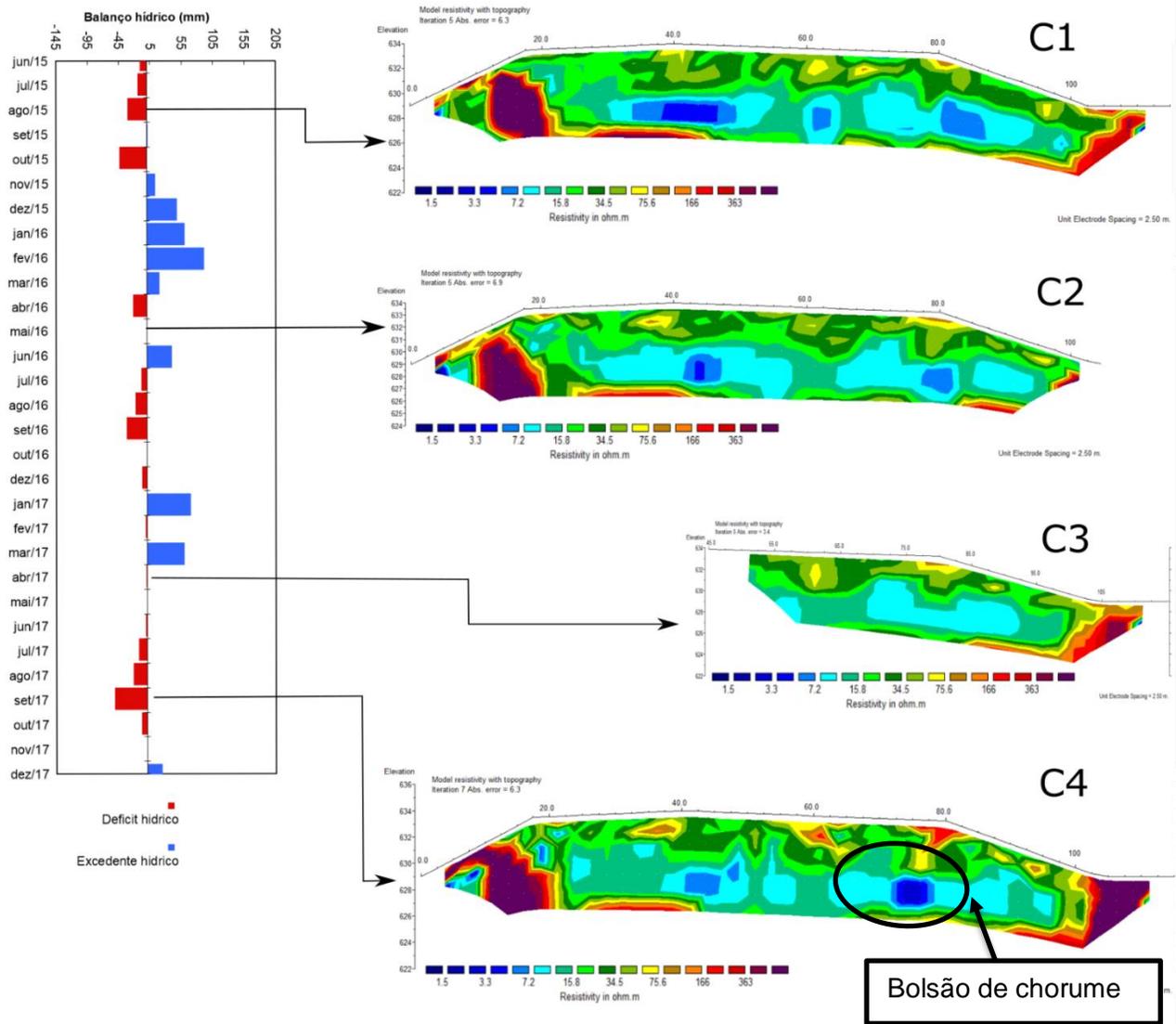


Figura 5.35: Comparação perfis de resistividade Linhas C1-C4.

O perfil C2 é o que apresenta uma maior área com baixas resistividades devido ao RSU. Esse resultado concorda com os valores de recarga nos meses compreendidos entre a aquisição C1 e C2, fazendo com que a umidade dos RSU aumentem e portanto a área com baixas resistividades é maior.

No perfil C4 as áreas com baixa resistividade têm valores maiores do que  $7.2 \Omega\text{m}$ , que são em média maiores do que os observados nos outros perfis. Esse resultado pode ser atribuído à fase de decomposição avançada na que se encontra o aterro, assim como a baixa recarga de água com valores nulos de recarga nos meses anteriores à aquisição.

### **Comparação de Polarização induzida**

Na Figura 5.36, são apresentados os perfis de cargabilidade ao longo do tempo e os valores de recarga para cada mês. Analisando o efeito de polarização induzida de acordo com o valor de cargabilidade em período de maior recarga ou menor recarga, encontramos que para o perfil C2 e o C3 obtidos depois de um período de valores altos de recarga, o valor médio da cargabilidade é maior do que o obtido nos outros períodos com pouca recarga (C1 e C4). Se relacionarmos a recarga com o aumento de chorume dentro da célula, e, portanto, ao aumento de metais solubilizados e de salinidade, é de se esperar que aconteça que com o aumento de recarga a cargabilidade aumente se a anomalia de cargabilidade for devido ao efeito de polarização de membrana.

Nos perfis C1 e C2 de cargabilidade é possível observar uma região de altíssima cargabilidade (maior do que  $30 \text{ mV/V}$ ) na base da célula experimental, sendo esta anomalia melhor definida no perfil C2. Essa anomalia de alta cargabilidade ocorre pela saturação por acúmulo de chorume na base da célula e é maior no perfil C2. No estudo realizado por Cardarelli et al. (2004), onde são aplicados os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida em duas áreas de disposição de resíduos domiciliares, sendo um aterro sanitário (revestido com membrana impermeável) e um aterro controlado (sem revestimento), os resultados obtidos revelaram baixos valores de resistividade e altos valores de cargabilidade para a base das valas, onde ocorre saturação por acúmulo de chorume, concordando com os resultados obtidos neste estudo e podendo atribuir esses valores de alta cargabilidade à concentração de chorume na base da célula.

Finalmente, se comparamos os perfis de cargabilidade levando em conta a idade dos resíduos, o que se espera segundo Moreira et al. (2008) é que entre mais antigos apresentem menor a cargabilidade, o que indica que a quantidade de metais e argilominerais em solução seja reduzida, a ponto de não produzirem anomalias em

magnitude acima dos padrões naturais da área. No nosso caso, e concordando com Moreira et al. (2008), o perfil C4, o último perfil obtido, apresenta em média um valor de cargabilidade mais baixo do que nos perfis C1 e C2 realizado em 2015 e 2016 respectivamente. Isso indica que existe uma diminuição nos sais dissolvidos e na precipitação de metais nos resíduos. Por outro lado, aquela anomalia de alta cargabilidade nos perfis C1 e C2 da base da célula não aparece mais nesse perfil C4, provavelmente indicando que o pH do chorume localizado na base da célula aumentou ou foi drenado.

No perfil C4 aparece uma nova anomalia de alta cargabilidade entre 55 e 65 m, que pode ser devido a presença de um bolsão de chorume nessa região. Essa anomalia também é visível no perfil de resistividade do caminhamento C4 onde aparece uma região de baixa resistividade que não aparece nos outros perfis nessa posição, concordando com a presença de um bolsão de chorume. Embora a célula experimental fosse construída com o sistema de drenagem de lixiviado segundo os preceitos vigentes de engenharia de aterros, o funcionamento de drenagem não acontece da forma esperada, já que se tem formação de bolsões de chorume como comprovado por Moretto et al. (2017) e agora nesse estudo.

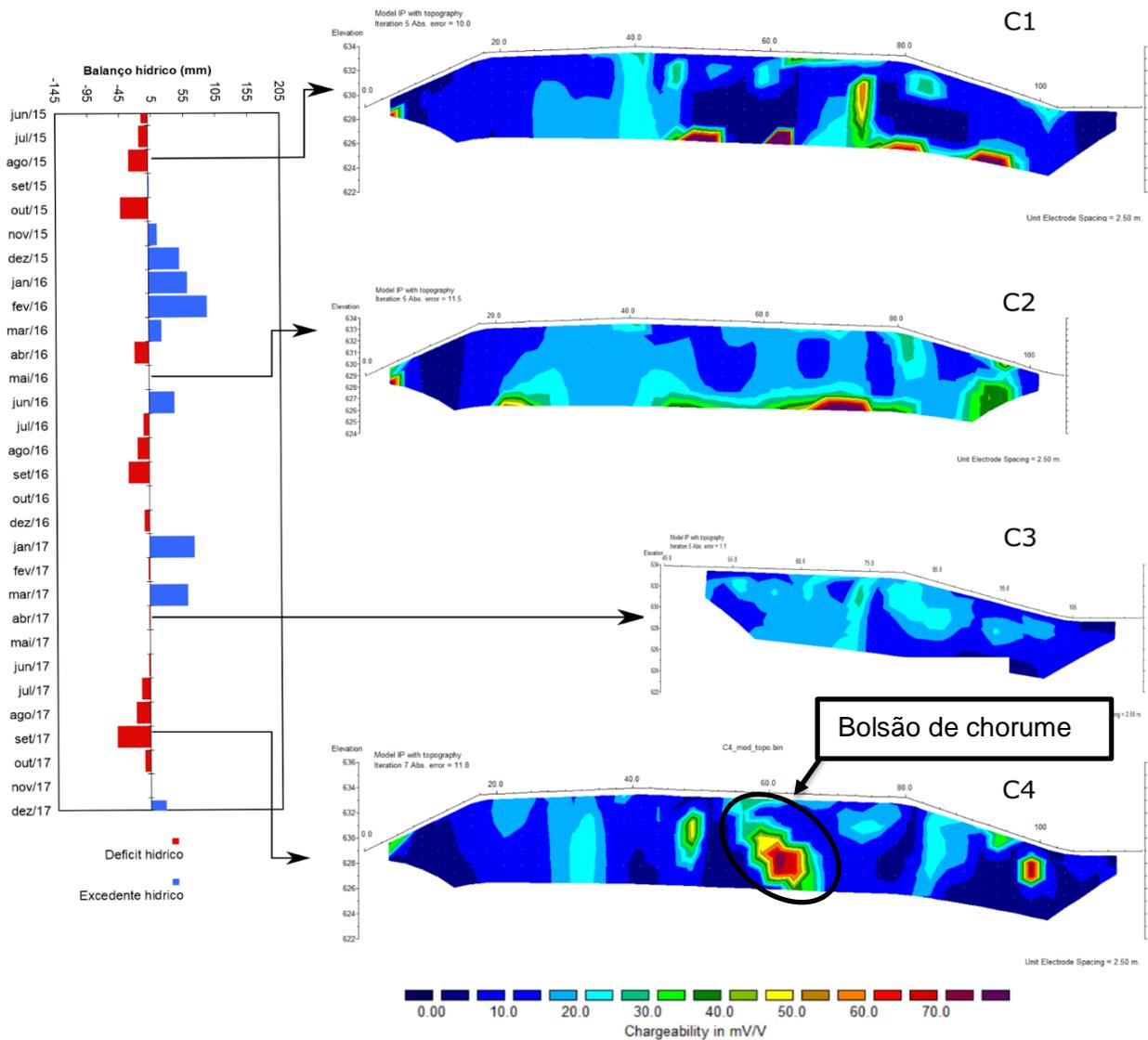
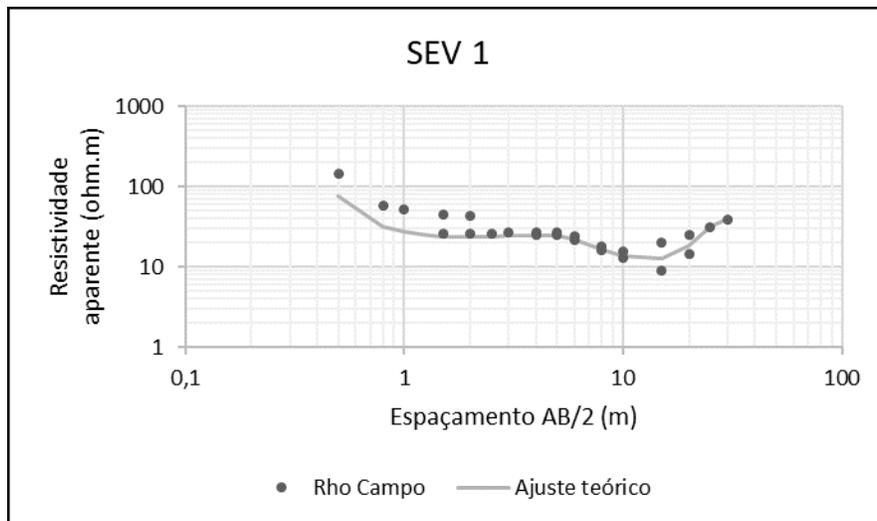


Figura 5.36: Comparação perfis de cargaabilidade Linhas C1-C4.

### Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

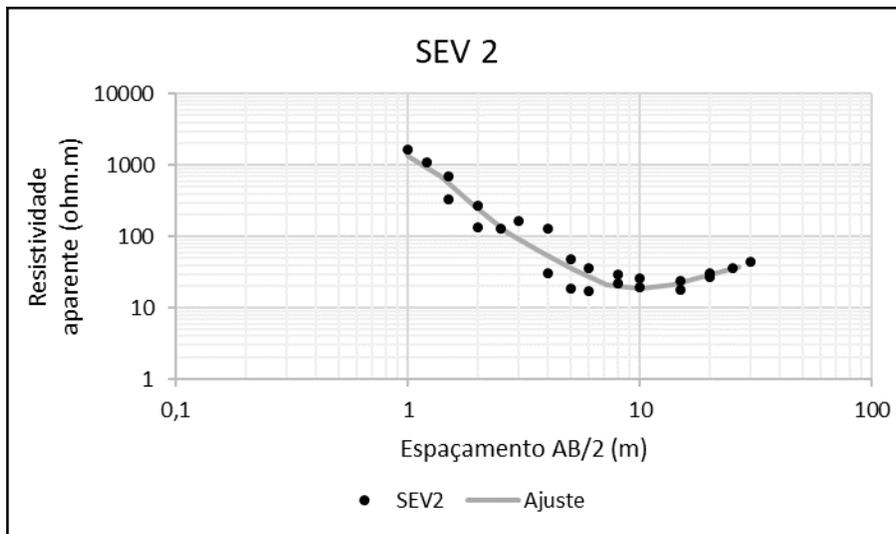
Os dados de SEV foram analisados com o programa livre IPI2win da Universidade Estatal de Moscou, utilizado para interpretação 1D manual de SEV. Os resultados do modelo obtido assim como a curva teórica de ajuste e os dados obtidos em campo para cada uma das aquisições são apresentados nas Figura 5.37 até a Figura 5.39.



SEV 1			
Camada	Espessura (m)	Resistividade Ohm.m	Interpretação
1	0,181	229	Camada de cobertura
2	1,51	22,3	RSU umidos
3	1,47	43,2	RSU secos
4	1,74	1,75	Chorume + Resíduos
5		5000	Base do aterro
Erro de ajuste = 11.2%			

Figura 5.37: Interpretação da SEV obtida no furo 2

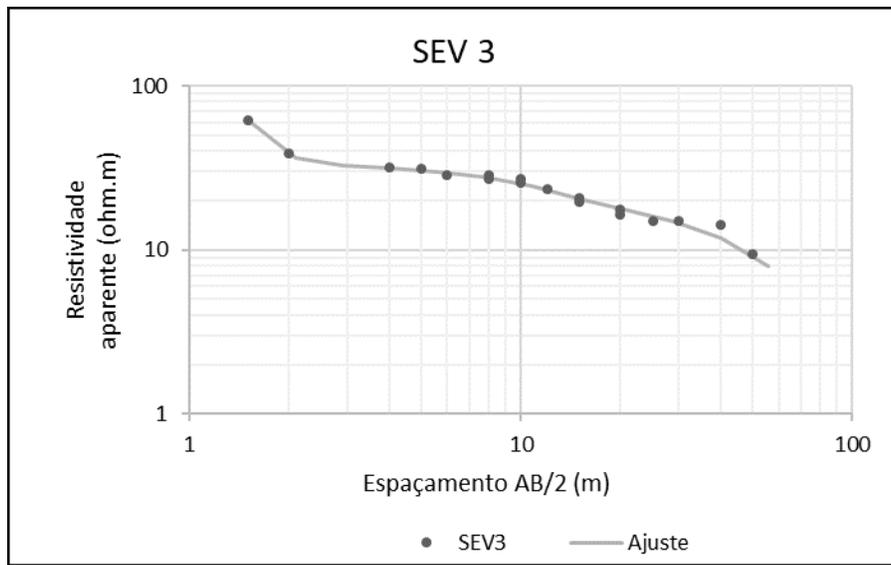
A SEV 1 apresenta alta resistividade na camada de cobertura e a diminuição da resistividade na camada de RSU de 0,18 m até 1,69 m de profundidade resistividade é de 22,3 ohm.m que representa resíduos úmidos. Logo, até os 3,16 m a resistividade aumenta para 43,2 ohm.m indicando RSU não saturados. Depois desde os 3,16 m até 4,9 m a resistividade diminui abruptamente, indicando uma camada de resíduos com mais chorume ou a presença de um bolsão de chorume. Na base da célula experimental, se obtém valores altíssimos de resistividade devido ao geotêxtil localizado na base da célula experimental.



SEV 2			
Camada	Espessura (m)	Resistividade Ohm.m	Interpretação
1	0,477	3225	Camada de cobertura
2	1,76	110,6	Resíduos secos + solo
3	0,92	4,24	Chorume + Resíduos
4	1,09	51,2	Resíduos
5	1,01	2,26	Chorume + Resíduos
6		10000	Base do aterro
Erro de ajuste= 13,7 %			

Figura 5.38: Interpretação da SEV 2 obtida no furo 5.

A SEV 2 apresenta uma primeira camada até 0,5 m de profundidade correspondente à camada de cobertura com alta resistividade de 3225 ohm.m. Depois diminui a resistividade para 110,6 ohm.m na profundidade entre 0,5 -2,2 m e representa resíduos secos mais provavelmente solo. Depois entre 2,2 e 3,1 m de profundidade, a resistividade diminui para 4,24 ohm.m, indicando a presença de chorume. Entre 3,1 m e 4,25 m a resistividade aumenta para 51,2 ohm.m sendo uma camada de resíduos secos. Finalmente a resistividade diminui entre 4,25 e 5,2 m de profundidade até 1,01 indicando a concentração de chorume nessa região. Na base da célula experimental, se obtém valores altíssimos de resistividade devido ao geotêxtil localizado na base da célula experimental.



SEV 3			
Camada	Espessura (m)	Resistividade Ohm.m	Interpretação
1	0,311	1363	Camada de cobertura
2	6,44	31,7	Resíduos
3	3,37	7,17	Chorume + resíduos
4	10,5	28,7	Resíduos
5		1,58	Chorume
Erro de ajuste = 3,91%			

Figura 5.39: Interpretação SEV 3 obtida no furo 7 no antigo aterro sanitário Delta A.

A SEV 3, realizada fora da célula experimental no antigo aterro sanitário, apresenta alta resistividade na primeira camada relacionada à camada de cobertura e com uma espessura de 0,3 m. A segunda camada, entre 0,31 m e 6,75 m tem uma resistividade de 31,7 ohm.m indicando a presença de resíduos com pouca umidade. A terceira camada, localizada entre 6,75 m e 10.1 m de profundidade tem uma resistividade de 7,17 ohm.m o que indica ser uma camada de resíduos úmidos. Finalmente, a camada 4 localizada entre 10.1 e 20,6 m tem uma resistividade de 28,7 indicando uma camada de resíduos. A última camada, apresenta uma baixíssima resistividade indicando a presença de chorume.

Os modelos de resistividades obtidos para as três SEV realizadas são apresentados na Figura 5.40. As SEV 1 e 2 foram obtidas dentro da célula experimental e a profundidade máxima alcançada foi de 4,9 m e 5,3 m respectivamente. O comportamento de resistividade para as SEV 1 e 2 é similar, sendo alta resistividade na camada de cobertura da célula experimental e diminuindo com a profundidade. A SEV 1 apresenta valores menores de resistividade ao longo do perfil se comparamos com os valores de resistividade da SEV 2. Os erros dos modelos são relativamente altos se comparados com o erro da SEV 3, mas por ser um material muito heterogêneo e por ter alta concentração de umidade, é de esperar que o erro seja dessa magnitude.

Para a SEV 3 a profundidade de pesquisa é maior, alcançando até os 20 m de profundidade, também vemos que se comparamos com os valores obtidos na célula experimental, a SEV 3 apresenta valores mais estáveis de resistividade sendo que para os primeiros 6,4 m a resistividade se mantém em 31,7 ohm.m e depois diminui para 7,2 ohm.m até os 10 m de profundidade. Esses resultados são coerentes, já que o corpo de resíduos do aterro é mais antigo e se encontra muito mais estável que a célula que tem só 6 anos de idade, isso é visto também na precisão do modelo, que tem um erro de apenas 3,9%.

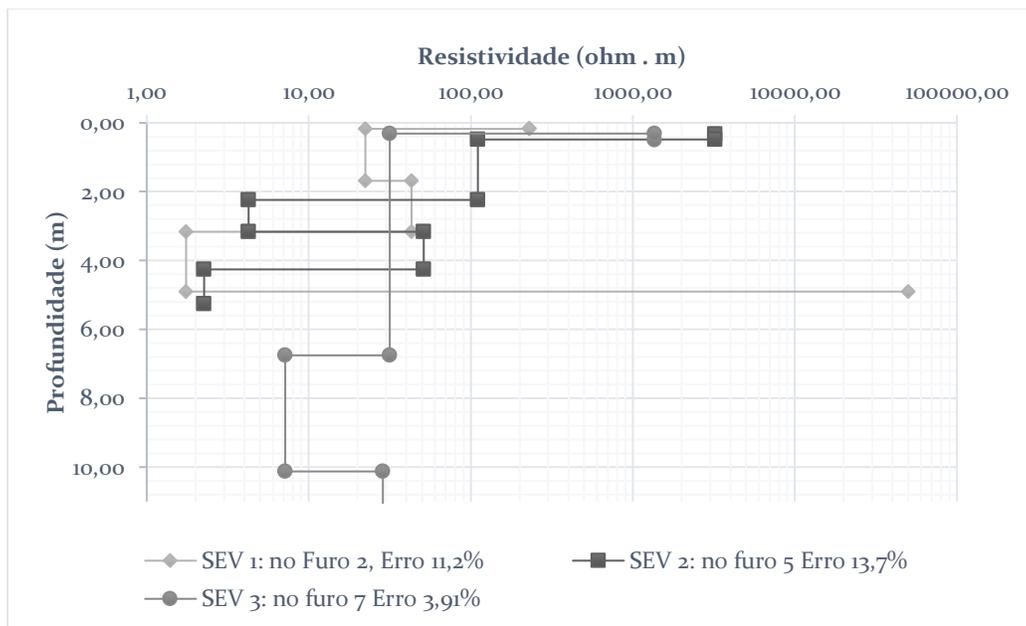


Figura 5.40: Perfis de resistividade obtidas a partir das SEV 1,2 e 3 feitas nos furos 2, 5 e 7 respectivamente.

## TEOR DE UMIDADE DAS AMOSTRAS

O teor de umidade gravimétrico  $W_w$  foi calculado com a relação entre a massa úmida e a massa seca:

$$W_w = \frac{M_1}{M_{tw}} \quad ( 5.3 )$$

com  $M_1$  a massa de líquido da amostra e  $M_{tw}$  a massa total da amostra seca. Os resultados dos pesos da massa úmida e seca assim como a descrição de cada amostra é mostrada nos anexos.

Devido à lei de Archie relacionar a resistividade com o teor de umidade volumétrico e não o gravimétrico, foi necessário calcular o teor de água volumétrico usando a seguinte relação:

$$W_w = \theta \frac{D_1}{D_{tw}} \quad ( 5.4 )$$

Onde  $D_1$  é a densidade do líquido ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) e  $D_{tw}$  a densidade da amostra úmida, sendo esta densidade a mesma densidade dos resíduos in situ. Os resultados dos valores de conteúdo de umidade gravimétrico e volumétrico se encontra relatado na Tabela 5-6, o valor de densidade usado para o cálculo de umidade volumétrica foi de  $622,4 \text{ kg/m}^3$ , valor calculado com a relação entre a velocidade da onda S (obtida do crosshole) e o peso específico proposta por Choudhury & Savoikar, (2009).

*Tabela 5-6: Umidade gravimétrica (W) e umidade volumétrica (θ) obtida nas amostras dos furos perfurados 2,5 e 7 da célula experimental no aterro Delta A.*

Profundidade	Furo 2		Furo 5		Furo 7		
	Ww (%)	θ (%)	Ww (%)	θ (%)	Profundidade	Ww (%)	θ (%)
<b>0,5 m</b>	15	9	8	5	0 - 0,5 m	9	6
<b>1,0 m</b>	18	11	12	8	1,0 - 1,5 m	10	6
<b>1,5 m</b>	20	12	56	35	2,0 - 2,5 m	45	28
<b>2,0 m</b>	23	15	28	17	3,0 - 3,5 m	38	24
<b>2,5 m</b>	27	17	69	43	4,0 - 4,5 m	15	9
<b>3,0 m</b>	62	38	85	53	5,0 - 5,5 m	17	11
					6,0 - 6,5 m	30	19
					7,0 - 7,5 m	27	17
					8,0 - 8,5 m	25	15

Os dados de umidade obtida para o furo 7 (no antigo aterro sanitário), não serão usados na conversão de resistividade a umidade usando a lei de Archie, já que por problemas de greve na época das análises não foi possível colocar as amostras no forno logo depois de serem obtidas e os dados de umidade obtidos não são confiáveis.

### 5.10. Lei de Archie e teor de umidade obtido de dados de resistividade

Para obter o teor de umidade dos dados de eletrorresistividade é usada a **lei de Archie** que relaciona a resistividade elétrica com a porosidade e a saturação das rochas e dos solos, simplificada para RSU por (Grellier et al., 2006 a) como:

$$\rho = a\rho_1\theta^{-m} \quad ( 5.5 )$$

onde  $\rho$  é a resistividade elétrica interpretada,  $\rho_1$  a resistividade elétrica do lixiviado,  $\theta$  o teor de umidade volumétrico,  $a$  (variando entre 0.6-2) e  $m$  (próximo a 2) sendo estes últimos parâmetros empíricos.

#### 5.10.1. Correção de Resistividade das SEV nos furos 2, 5 e 7

Para obter os valores  $a$  e  $m$  da equação ( 5.5 ), é realizada uma correlação entre os dados de umidade das amostras estudadas e os valores de resistividade obtidos das SEVs. Porém, antes de realizar a correlação é necessário corrigir as resistividades medidas com as SEVs de acordo com as temperaturas obtidas das amostras no campo, devido a que a temperatura do solo influencia na condutividade elétrica, representada por uma lei linear baseada na teoria da viscosidade. Grellier et al., (2006 a) encontraram empiricamente e validaram para RSU que a condutividade aumenta 2% com o aumento de cada grau de temperatura de acordo a seguinte expressão:

$$\sigma_{Tref} = \frac{\sigma_{med}}{1 + 0,02(T_{med} - 25)} \quad ( 5.6 )$$

Onde  $\sigma_{Tref}$  é a temperatura corrigida a 25°,  $\sigma_{med}$  e  $T_{med}$  são a condutividade e a temperatura medidas in situ respectivamente. Os valores de resistividade corrigida usando a equação ( 5.6 ), assim como os valores de umidade e temperatura para cada amostra dos furos 2 e 5 amostrados são apresentados na Tabela 5-7.

Tabela 5-7: Dados de temperatura das amostras a diferentes profundidades medidas em campo, resistividade medida com SEV e resistividade corrigida usando a equação ( 5.6 ), para os furos 2 e 5 na célula experimental.

Prof. (m)	Furo 2			Furo 5		
	Temperatura (°C)	Resistividade (Ωm)	Resistividade Corrigida (Ωm)	Temperatura (°C)	Resistividade (Ωm)	Resistividade Corrigida (Ωm)
0,5	22	22,3	21,0	25,0	3225,0	3225,0
1	24	22,3	21,9	25,0	110,6	110,6
1,5	25	22,3	22,3	26,0	110,6	112,8
2	29	43,2	46,7	31,0	110,6	123,9
2,5	29	43,2	46,7	30,0	4,2	4,7
3	30	1,8	1,9	35,0	4,2	5,1

### 5.10.2. Lei de Archie para os RSU da célula experimental

Para encontrar os valores empíricos  $a$  e  $m$  da *Lei de Archie* que se ajustaram aos dados de resistividade e umidade obtidos na célula experimental, foram plotados os valores corrigidos de resistividade em função da umidade volumétrica para cada amostra, e foi realizado o ajuste de dados com a função potencial da forma da lei de Archie. Na Figura 5.41 são apresentados os resultados da variação de resistividade com a umidade volumétrica usando a Lei de Archie para as amostras obtidas dos furos 2 e 5 separadas.

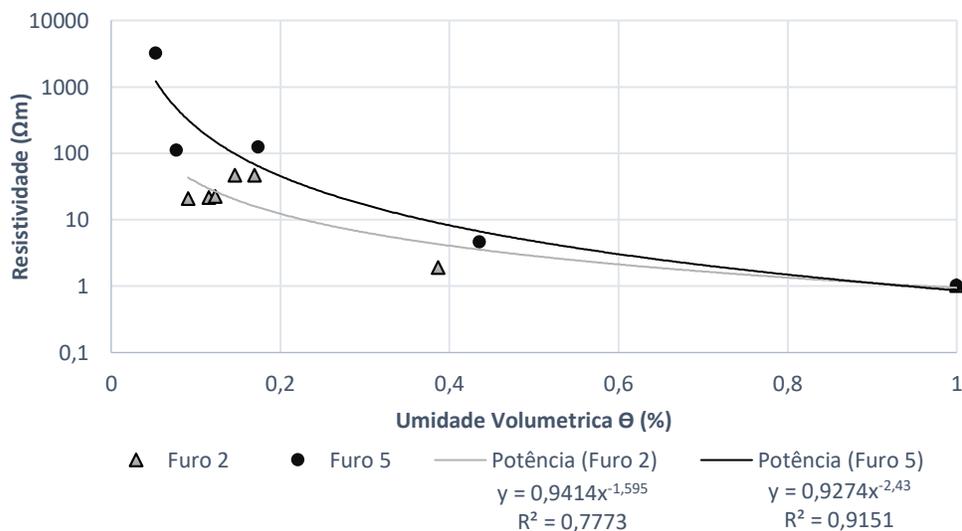


Figura 5.41: Variação da resistividade com a umidade volumétrica obtida das amostras dos furos 2 e 5.

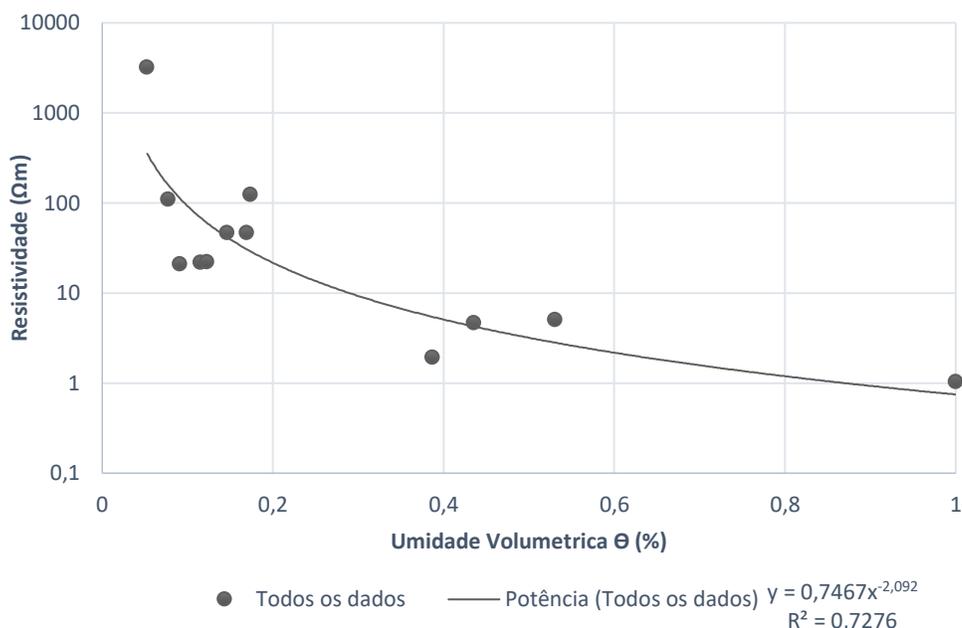


Figura 5.42: Correlação entre a resistividade elétrica determinada por SEV e a umidade volumétrica das amostras coletadas nos furos 2 e 5 da célula experimental no aterro Delta A. Cada um com o respectivo ajuste de dados com a função potencial.

Na Figura 5.42 são apresentados a relação obtida entre a resistividade e a umidade volumétrica com os dados obtidos dos dois furos na célula experimental e o ajuste. Da equação de ajuste  $\rho = 0,7467\Theta^{-2,092}$ , foram deduzidos os valores dos parâmetros  $a$  e  $m$  usando o valor de resistividade do lixiviado como  $1.03 \Omega\text{m}$  (obtido como a média de análises prévias de resistividade nos piezômetros 1, 2, 3 e 5 da célula experimental).

Os valores obtidos são:

$$a = 0,725 \qquad m = 2,092$$

Os parâmetros  $a$  e  $m$  encontrados se encontram na faixa de valores esperada, sendo que no caso geral, Archie (Archie, 1942) propôs que  $a$  varia entre 0,6 e 2,  $a < 1$  para uma porosidade intergranular, caso do RSU e  $m$  está em torno de 2.

A Figura 5.43 apresenta a resistividade elétrica e o teor de umidade gravimétrico medido no laboratório e o calculado com a lei de Archie, versus a profundidade, para os dois furos analisados na célula experimental. Nessa figura é possível observar a correlação que existe entre os dados de umidade medidos no laboratório e os dados obtidos usando a

lei de Archie. Para o furo 2 a correlação entre as duas umidades (a medida e a calculada) é de 0,91 enquanto para o furo 5 a correlação achada é de 0,96, o que indica uma relação colinear entre os dados medidos e os calculados muito boa. Analisando a tendência dos dados de umidade obtidos e calculados, é possível ver que é similar para ambos dados de umidade só que com valores diferentes. Também é possível ver na figura que a correlação entre a resistividade e a umidade obtida é muito boa, para os dois furos existe uma relação inversa entre o comportamento de umidade e resistividade, entre menor a resistividade maior a umidade como era esperado.

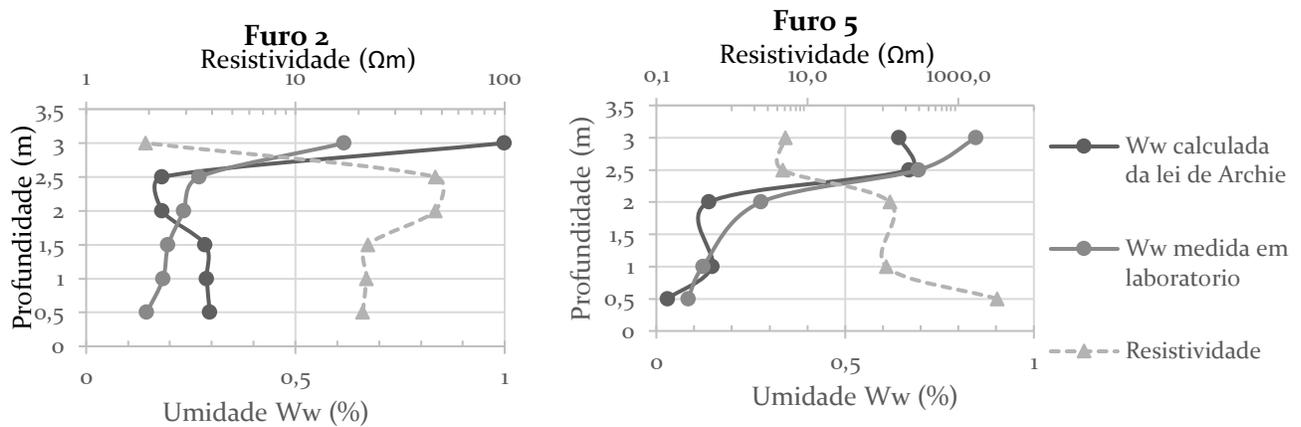


Figura 5.43: Comparação entre o conteúdo de umidade gravimétrico ( $W_w$ ) medido e o calculado com a lei de Archie e resistividade em relação à profundidade para os furos 2 e 5.

A comparação dos dados da lei de Archie obtidos para a célula experimental com dados da literatura é apresentada na Figura 5.44. A umidade máxima nos dados de Grellier et al. (2006 a) foi de 40%, para Dumont et al. (2016) a máxima umidade foi de 68% e para Feng et al. (2017) a máxima umidade foi de 42%, para a célula experimental a umidade máxima medida foi de 53%.

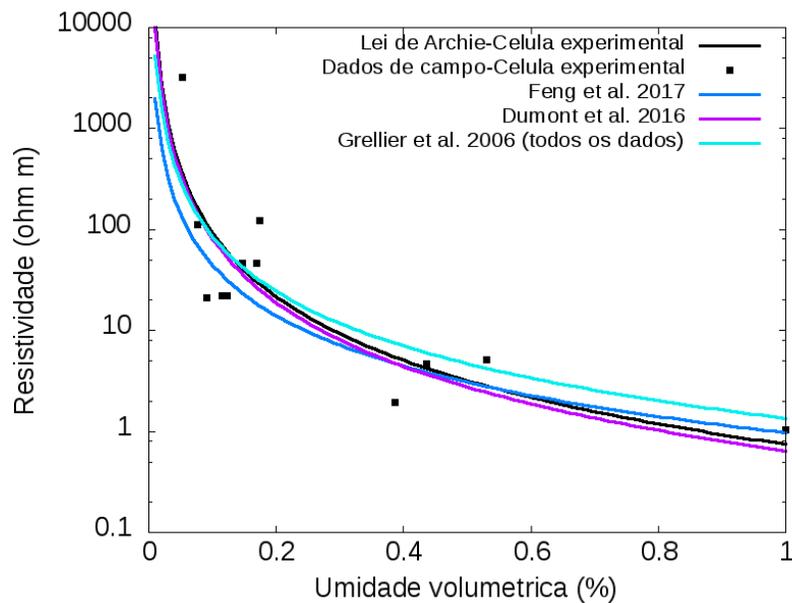


Figura 5.44: Comparação entre a lei de Archie obtida nesse estudo para a célula experimental e outros estudos.

### 5.10.3. Conversão de tomografia elétrica para tomografia de umidade

Com a equação de ajuste e os parâmetros  $a$  e  $m$  calculados o seguinte passo foi converter as tomografias de resistividade obtidas ao longo do projeto (C1, C2, C3 e C4) em tomografias de umidade.

Os dados da tomografia de resistividade elétrica foram convertidos em umidade usando a lei de Archie encontrada ( $\rho = 0,746 \theta^{-2,092}$ ) e empregando o software Surfer da Golden Software foram plotados os dados de umidade.

Na Figura 5.45 são apresentadas as quatro tomografias de umidade obtidas. Na figura observamos que no meio da célula é onde estão concentrados os valores mais altos de umidade. Levando em conta que a célula tem uma geomembrana de baixa permeabilidade e o sistema de revestimento foi instalado na parte inferior para coletar e remover o chorume, se espera que o lixo esteja em um processo de drenagem contínuo, de modo que a umidade volumétrica contida nos resíduos devem ser devidos à capacidade de campo, e possíveis variações na umidade podem ser devidas a maiores ou menores chuvas no período entre cada aquisição de eletrorresistividade.

Para o perfil C1, a umidade gravimétrica máxima foi de 123%, para o perfil C2 foi de 171%, para o perfil C3 o máximo de umidade foi de 95% e para o perfil C4 o máximo foi de 84%. A umidade média para cada perfil é: 34,6% para C1, 35,9% para C2, 34% para C3 e 33,9 para C4. Esses resultados mostram que a tomografia C2 apresenta maiores valores de umidade, sendo 1,2% mais úmido do que a média de todos os perfis.

Nos quatro perfis são observadas regiões com baixa umidade (menor a 10%) nas esquinas de cada perfil entre 10 e 20 metros e entre 100 e 110 m de posição lateral, essas baixas umidades são devido as localizações dos declives de contenção da célula experimental, evitando a acumulação de umidade nessa região. Na base dos perfis também é possível observar um baixo teor de umidade abaixo da geomembrana impermeável da célula experimental (que evita que o chorume infiltre no solo), indicando o funcionamento da geomembrana da célula experimental.

No perfil C4, entre 70 e 80 m de posição lateral, se encontra localizada uma região com alta umidade com valores máximos de 84,6%, indicando a presença de um bolsão de chorume nessa região.

### **5.11. Análises temporal do teor de umidade na célula experimental**

Com os dados de umidade e da recarga hidráulica obtidos para a célula experimental, é analisada a evolução da umidade dentro da célula, levando em conta o estágio de biodegradação e a recarga hidráulica para cada época em que foram feitas as aquisições de eletrorresistividade com o caminhamento elétrico.

As quatro tomografias de umidade volumétrica obtidas usando a lei de Archie foram obtidas em épocas com déficit hídrico, os valores da recarga hidráulica entre os meses das aquisições estão mostrados na Tabela 5-8 e o resultado da tomografia de umidade gravimétrica para cada aquisição se encontra na Figura 5.45.

Os valores de recarga entre cada aquisição de ER, mostram que no período entre C1 e C2 (de agosto de 2016 até maio de 2016) a recarga que teve a célula experimental foi de 256 mm, sendo a maior recarga em todo o período estudado. No período entre C2 e C4 (de maio de 2016 até setembro de 2017) a recarga foi de 188 mm. Essas informações foram usadas para comparar quanto aumenta a umidade devido à recarga.

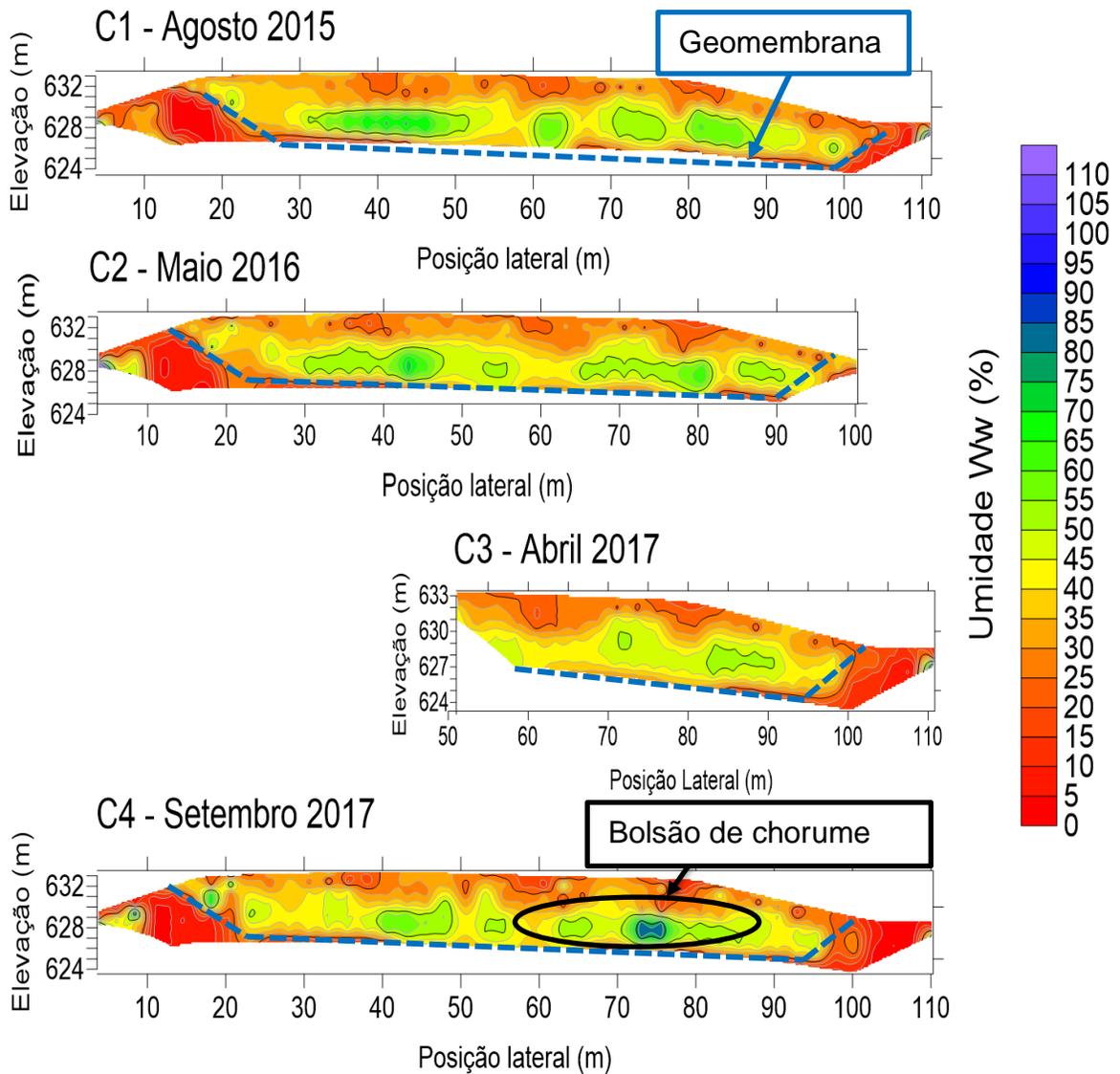


Figura 5.45: Tomografia de umidade gravimétrica  $W_w(\%)$  obtida da conversão das tomografias de resistividade usando a lei de Archie. Linha azul tracejada representa a geomembrana impermeável da base da célula experimental.

Para analisar a evolução do teor de umidade dentro da célula ao longo do tempo de estudo, as tomografias de umidade gravimétrica  $W_w$  foram divididas em três áreas, as duas primeiras áreas estão localizadas entre 225 e 230 m de elevação, sendo que a área A1 está entre 30 e 60 m de posição lateral, e a área A2 está entre 60 e 100 m de posição lateral. Nessas duas regiões é onde está concentrada as maiores umidades dentro da célula. A área A3, está localizada entre 20 e 90 m de posição lateral e entre 630-633m de

elevação, essa área está na parte mais superficial da célula contendo o solo de cobertura. E a AT que representa a área total das tomografias. As tomografias de umidade divididas por áreas são mostradas na Figura 5.46. Em cada área foi calculada a umidade média e os dados são mostrados na Tabela 5-8.

*Tabela 5-8: Valor da recarga hidráulica entre as datas de aquisições de ER e média de umidade gravimétrica Ww para cada uma das áreas estudadas e a área total AT das tomografias de Umidade gravimétrica.*

Linha	Data da aquisição de ER.	Recarga Hidráulica (mm)	% Ww média A1	% Ww média A2	%Ww média A3	%Ww média AT
C1	21 de agosto de 2015	-	46,9	45,8	31,8	35
C2	24 de maio de 2016	256	45,6	43,1	32,4	35,9
C3	19 de abril de 2017	188	-	42,4	-	-
C4	28 de setembro de 2017	0	43,9	45,0	31,3	33,9

Na Figura 5.47 é apresentada a variação de umidade gravimétrica e a recarga para as aquisições C1, C2 e C4. Para a área A1 vemos que a umidade está diminuindo ao longo do tempo. Entre a primeira e a segunda aquisição a umidade diminuiu 1,3%, e da segunda aquisição (C2) até a última aquisição (C4) a umidade diminuiu só 1.7%.

Para a área A2, observamos que da primeira aquisição até a segunda a umidade diminuiu 2,7%, e da segunda aquisição (C2) até a última (C4) a umidade aumento 1,9%, mostrando um que nessa região tem acumulação de chorume. No período entre a aquisição C2 e a última C4, teve recarga de 188 mm, como observado na Figura 5.32, e esse excedente de água pode estar formado um bolsão de chorume nessa área.

Para a área A3, que é a camada de cobertura da célula, o valor para a segunda aquisição C2 aumento 0,6% ao contrário do que aconteceu nas outras áreas, também vemos que a recarga no período entre a aquisição C1 e C2 foi de 256 mm, o que indica que esse excedente de água que entrou na célula foi acumulado na cobertura e não dentro dos

resíduos. Para a área total AT, vemos que a maior umidade se encontra no perfil C2 o que coincide com a maior recarga.

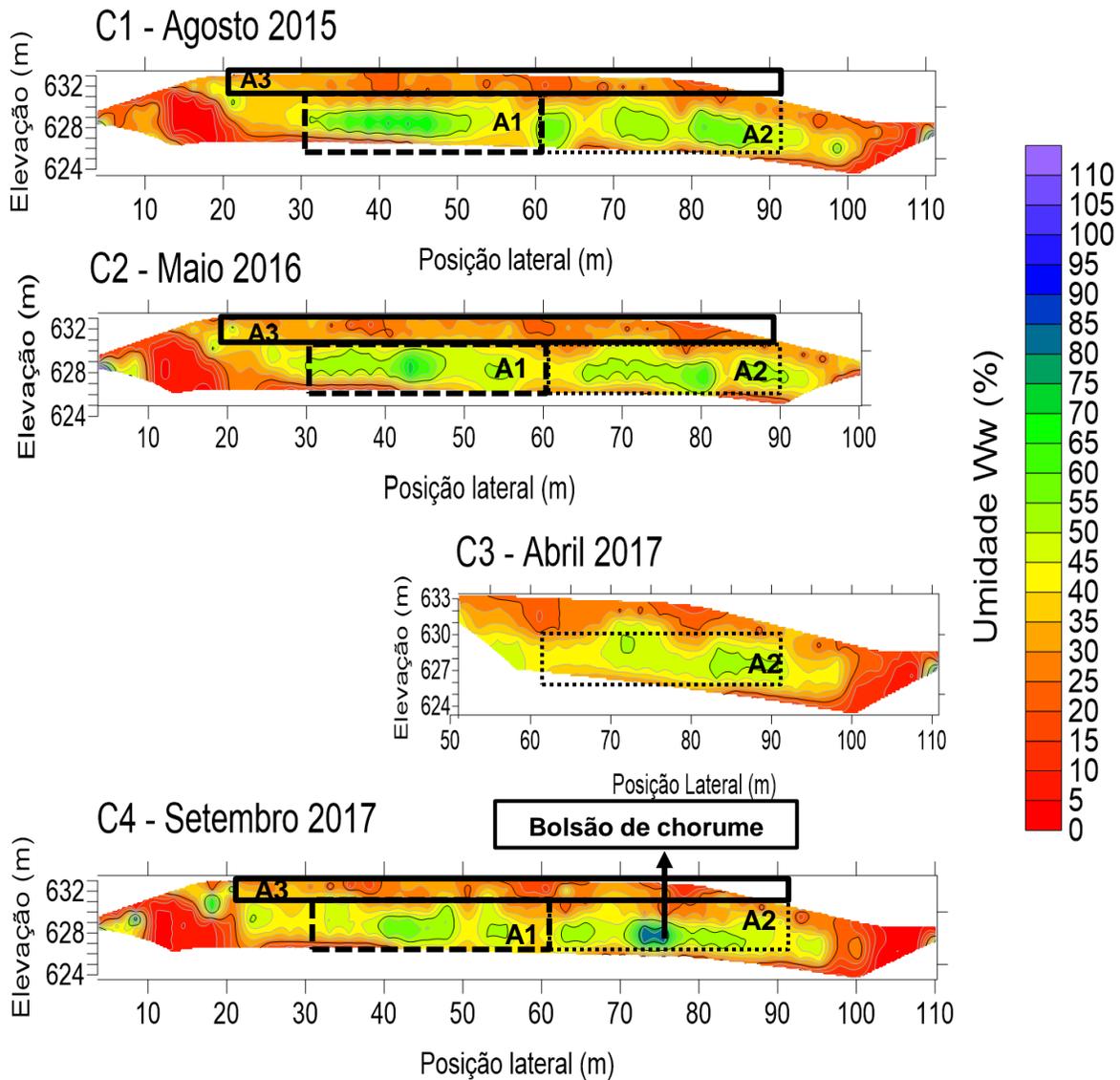


Figura 5.46: Tomografias de teor de umidade gravimétrica para a célula experimental ao longo do tempo. Os quadrados são a divisão por áreas usada para comparar o conteúdo de umidade por época. A área A1 está localizada entre 30-60 m de posição lateral e entre 625-630 m de elevação, a área A2 está localizada entre 60-90 m de posição lateral e entre 625-630 m de elevação, a área A3 está localizada entre 20-90 m de posição lateral e entre 630-633 m de elevação.

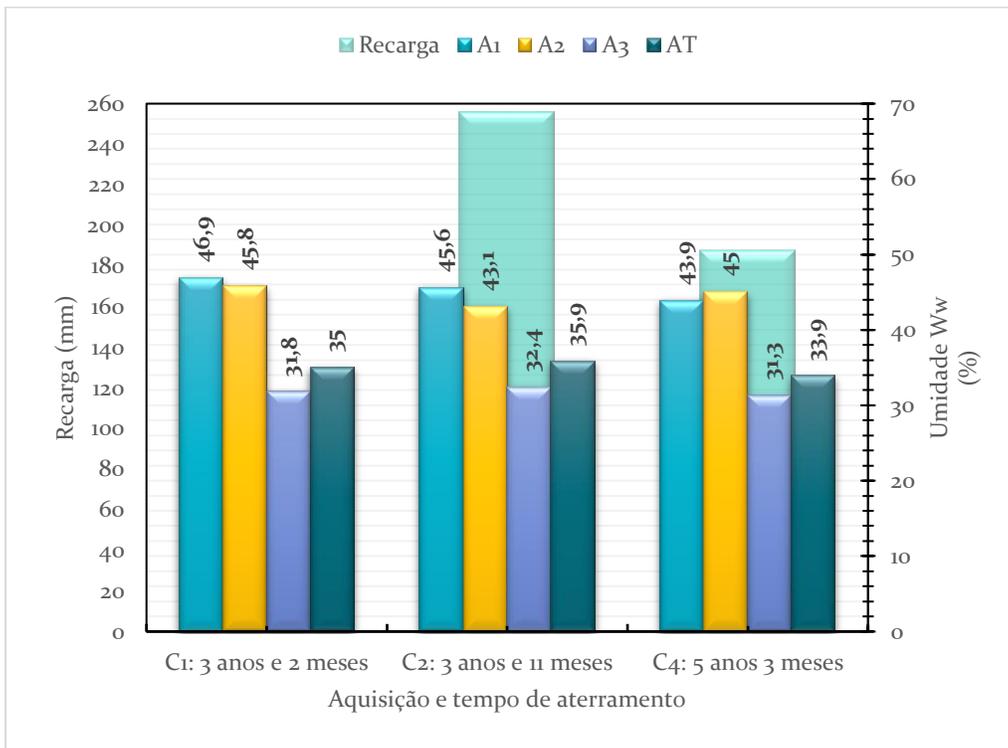


Figura 5.47: Variação de umidade gravimétrica ao longo do tempo nas áreas A1, A2, A3 e na área total AT e recarga entre cada aquisição.

## Capítulo 6 – Conclusões

Nesta tese, o escopo principal foi o mapeamento e caracterização de algumas propriedades físicas e parâmetros mecânicos dos resíduos sólidos urbanos usando a combinação de vários métodos geofísicos. As propriedades que foram caracterizadas foram: teor de umidade, velocidade de onda cisalhante ( $V_s$ ), velocidade de onda compressiva ( $V_p$ ), peso específico ( $\gamma$ ) e os parâmetros elásticos como: módulo de Young ( $E$ ), módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Foram estudados dois protótipos experimentais (uma célula experimental e um lisímetro) localizados na cidade de Campinas-SP, Brasil, caracterizada por ser uma área climática subtropical úmida, com invernos geralmente secos e verões chuvosos com altas temperaturas. Neste estudo, foram combinados diferentes métodos sísmicos (tomografia sísmica de refração, análise multicanal de ondas superficiais, teste crosshole e medida de ondas diretas) para obter as velocidades das ondas P e S e métodos elétricos (eletroresistividade e polarização induzida) para caracterizar o teor de umidade dentro da célula experimental.

### 6.1 Velocidades $V_p$ e $V_s$

As velocidades da onda P obtidas usando a tomografia sísmica de refração na célula experimental variou entre 160 m/s e 220 m/s para os primeiros 1,6 m de profundidade. A velocidade da onda P do lisímetro, obtida usando ondas transmitidas diretamente, variou entre 185 m/s e 244 m/s. A onda P obtida usando testes de crosshole variou entre 217 e 252 m/s. Estes valores são inferiores ou estão no limite inferior das velocidades relatadas na literatura geral; no entanto, eles estão de acordo com os valores obtidos em aterros localizados em países com condições socioeconômicas e climáticas semelhantes.

A velocidade média da onda S para a célula experimental obtida pela combinação da análise multicanal de ondas de superficiais ativa e passiva foi de 58 m/s. A onda S obtida usando testes de crosshole variou entre 86 e 89 m/s. As diferenças de valores obtidos entre os dois métodos, são atribuídas às diferentes frequências usadas por cada método. Porém, ambos os valores estão na faixa inferior dos valores relatados na literatura. Estes baixos valores são característicos dos aterros brasileiros e podem ser atribuídos ao seu

alto teor de matéria orgânica, baixa compactação, camada de cobertura fina, além das condições climáticas (alto índice pluviométrico e altas temperaturas). Todos esses fatores contribuem para mudanças na saturação dos poros, e na poropressão, que têm implicações nas propriedades elásticas dos materiais e, portanto, nas velocidades das ondas sísmicas.

Os modelos empíricos de velocidade  $V_s$  obtidos para a célula experimental e para o aterro de São Carlos-SP apresentam um comportamento similar. Pelo contrário, se comparamos com o modelo de Zekkos et al. (2013), proposto para aterros sem informações de velocidade, vemos que o modelo do último autor não se adequa aos dados de velocidades nos aterros do Brasil.

Os resultados dos modelos de  $V_s$  com a profundidade desse estudo, confirmam que os modelos propostos na literatura para as diferentes propriedades dos aterros sanitários devem ser usados com precaução. Isso porque em sua maioria são feitos para aterros sanitários com diferentes características às encontradas no Brasil, como por exemplo, diferentes graus de compactação, teor de umidade e composições, sendo que não são ajustáveis aos aterros sanitários do Brasil. No entanto, o modelo desenvolvido no aterro sanitário Delta A deve ser usado somente em aterros com as mesmas características. Porém, é um avanço para a ampliação do banco de dados de velocidades em aterros sanitários caracterizados com baixa compactação, alta composição de matéria orgânica e localizado em áreas tropicais, que serviram na construção de um modelo robusto que se ajuste a aterros com características similares.

## **6.2. Propriedades físicas e elásticas dos RSU**

O peso específico foi achado empregando a relação empírica entre a velocidade da onda S ( $V_s$ ) e o peso específico ( $\gamma_{waste}$ ) proposto por Choudhury e Savoikar (2009), usando os valores de  $V_s$  obtidos nos testes crosshole. O valor do peso específico encontrado para a célula experimental foi de  $6,1 \text{ kN/m}^3$ , sendo esse valor típico de aterros com baixa compactação e pouca quantidade de solo. Este valor concorda bem com o valor projetado para o lisímetro ( $5,93 \text{ kN/m}^3$ ).

O perfil de peso específico com a profundidade para os RSU antigos, localizados embaixo da célula experimental, que foi calculado usando os dados de  $V_s$  obtidos com o método

MASW e a relação empírica proposta por Choudhury e Savoikar (2009), varia entre 4,2 e 13,3 kN/m<sup>3</sup> para uma profundidade entre 5 e 16 m. Quando comparado o perfil de peso específico obtido nesse estudo com os três perfis propostos por Zekkos et al. (2006), para aterros sanitários com baixa, média e alta compactação respectivamente, vemos que o perfil obtido aqui não concorda com nenhum dos perfis propostos por Zekkos et al. (2006), mesmo que estes perfis incluam o grau de compactação que no caso da célula seria baixa compactação. Isso indica que outros aspectos tais como a composição dos resíduos, e o teor de umidade são muito importantes e fazem a diferença nas propriedades dos RSU, mostrando uma vez mais que não sempre é adequado o uso dos perfis propostos na literatura para uso em aterros sanitários em geral.

Os parâmetros elásticos foram calculados usando a relação entre eles com as velocidades das ondas P e S e a densidade dos resíduos. A massa específica dos resíduos utilizada foi de 627 kg/m<sup>3</sup>, calculada usando o valor do peso específico dividido entre a gravidade. E os valores de velocidade usados foram os adquiridos usando os métodos sísmicos.

O módulo de cisalhamento obtido usando os dados do método crosshole, variou entre 4,6 e 5 MPa, sendo que esses valores estão no limite inferior dos dados reportados na literatura. Esses valores são esperados devido à alta composição em material orgânico principalmente, sendo também importante o baixo grau de compactação e o baixo peso específico.

O módulo de Young (E) achado para a célula experimental, variou entre 6,3 e 10,9 MPa. Estes valores estão no limite inferior dos resultados relatados na literatura geral, mas estão de acordo com os valores obtidos em outros aterros brasileiros, sendo valores característicos de aterros com alta composição de material orgânico.

Os valores do coeficiente de Poisson obtidos para a célula experimental (usando os dados de crosshole) variam entre 0,40 e 0,42. Esses valores indicam um alto conteúdo de umidade dentro da célula experimental.

### **6.3. Eletroresistividade, Polarização Induzida e Teor de Umidade**

O balanço hídrico para a célula experimental realizado usando a média de 20 anos de precipitação e temperaturas para a região de Campinas, mostrou que nos meses de novembro até março existe recarga hídrica, ou seja, a água excedente infiltra no solo fazendo com que aumente a umidade dentro da célula. No restante dos meses existe déficit hídrico, quer dizer que não infiltra água no solo e a recarga é zero. Porém, quando realizado o balanço hídrico com os dados da época estudada nesse projeto (período de julho de 2015-novembro de 2018) os resultados mostraram que nem sempre existe recarga para os meses entre novembro até março, como no caso do final do ano 2016 e começo de 2017, que só teve recarga nos meses de janeiro e março e, ao contrário dos resultados anteriores, o mês de junho de 2016 apresentou um excedente hídrico devido as altas quantidades de chuvas dessa época. O balanço hídrico realizado na época de estudo, permitiu encontrar os meses em que teve infiltração de água de chuva na célula, aumentando o chorume e, portanto, o teor de umidade dentro da célula experimental. Os dados do balanço hídrico permitiram analisar os perfis de eletroresistividade, cargabilidade e teor de umidade da célula experimental, levando em conta a infiltração e aumento de chorume produzido pelas chuvas.

As tomografias de resistividade e de polarização induzida serviram para identificar a base da célula experimental caracterizada por ser uma camada não resistiva, assim como para identificar zonas de concentração de chorume ao longo do tempo.

Além disso, foi possível observar as mudanças de resistividade e cargabilidade na análise temporal após épocas de baixa e alta recarga hídrica. A tomografia C2, tomada após a época de maior recarga hídrica no tempo estudado, apresenta uma área maior de valores com baixas resistividade e alta cargabilidade se comparada com os outros perfis obtidos após épocas de baixa recarga hídrica. Isso é devido ao aumento de chorume e maior conteúdo de sais dissolvidos, trazendo como resultado a diminuição da resistividade e o aumento na cargabilidade.

Além disso a análise de IP mostra que último perfil obtido, o C4 obtido em setembro de 2017, apresenta em média um valor de cargabilidade mais baixo do que nos perfis C1 e C2 realizados em 2015 e 2016 respectivamente, indicando que existe uma diminuição

nos sais dissolvidos e na precipitação de metais nos resíduos pelo processo avançado de biodegradação.

Dois furos foram perfurados na célula experimental do aterro sanitário Delta A para correlacionar a resistividade elétrica medida antes da perfuração com SEV, e o teor de umidade gravimétrica medido usando amostras de resíduos obtidos durante a perfuração. Os parâmetros empíricos da lei de Archie foram achados e permitiram o cálculo da umidade volumétrica a partir da resistividade elétrica. Os dados calculados de teor de umidade se ajustaram razoavelmente bem com os dados medidos em laboratório. Este estudo, sendo novo no Brasil, mostrou que a lei de Archie descreve bem a relação entre a resistividade elétrica e o teor de umidade volumétrico.

Com a lei de Archie obtida para a célula experimental, foram convertidas as quatro tomografias de eletrorresistividade em tomografias de umidade, permitindo analisar a umidade dentro da célula ao longo do tempo. Os dados mostraram que a umidade tende a diminuir ao longo do tempo, mas a presença de chuvas e recargas pode aumentar a umidade por um período. Também a tomografia de umidade mostrou a localização de bolsões de chorume que concordaram com os dados de IP, assim como também permitiu enxergar que a base impermeável e a drenagem estão funcionando corretamente, mostrando valores baixos de umidade para essa área.

#### **6.4. SUGESTÕES**

Por ser a área de estudo uma célula experimental com profundidade de 5 m, não foi possível mapear as propriedades a maiores profundidades, mas esses resultados são fundamentais para a caracterização das propriedades nos RSU do Brasil. Por outro lado, como não foi possível medir o peso específico in-situ, e as propriedades elásticas dependem diretamente da densidade, se sugere que novas pesquisas sejam realizadas medido o peso específico in-situ, comparado com o valor obtido da velocidade da onda cisalhante.

## Referências

- ASTM D4428. (2000). Standard test methods for crosshole seismic testing. Em *Annual Book of ASTM Standards* (Vol. 4).
- Abdullahi, N. K., Osazuwa, I. B., & Sule, P. O. (2011). Application of integrated geophysical techniques in the investigation of groundwater contamination: a case study of municipal solid waste leachate. *Ocean J Appl Sci*, 4(1), pp. 7-25.
- ABNT. (2004). NBR 10.004 Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 8419/ NB 843. (1996). *ABNT Catalogo*. Acesso em 2019, disponível em <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=2584>
- ABRELP. (2017). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017*. ABRELP.
- Abreu, A. (2015). *Investigação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades*. São Carlos: Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Abreu, A., Gandolfo, O., & Vilar, O. (2016). Characterizing a Brazilian sanitary landfill using geophysical seismic techniques. *Waste Management*, 53, pp. 116–127.
- Anbazhagan, P., SivakumarBabu, G., & Lakshmikanthan, P. (2016). Seismic characterization and dynamic site response of a municipal solid waste landfill in Bangalore, India. *Waste Management & Research*, 34(3), 205–213. doi:DOI: 10.1177/0734242X15622814
- Archie, G. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *146*, 54-67.
- Bacellar, L., & Catapreta, C. (2010). Emprego de eletrorresistividade para delimitação de pluma de contaminação por líquidos lixiviados no aterro sanitário de Belo Horizonte. *Águas Subterrâneas*, 21, pp. 60-72.

- Benatti, J., da Paixão Filho, J., & Gabrielli, G. (2013). Parceria para Implantação de uma Célula Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos de Grandes Dimensões. São Paulo: III Conferência Internacional de Gestão de Resíduos na América Latina.
- Bortolin, J., & Malagutti Filho, W. (2010). Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, pp. 367-374.
- Braga, A. (1999). Métodos de Prospecção em Hidrogeologia.
- Cardarelli, E., & Di Filippo, G. (2004). Integrated geophysical surveys on waste dumps: evaluation of physical parameters to characterize an urban waste dump (four case studies in Italy). *Waste management & research*, 22(5), pp. 390-402.
- Carpenter, P., Calkin, S., & Kaufmann, R. (1991). Assessing a fractured landfill cover using electrical resistivity and seismic refraction techniques. *Geophysics*, 56.
- Carpenter, P., Reddy, K., ASCE, F., & Thompson, M. (2013). Seismic Imaging of a Leachate-Recirculation Landfill: Spatial Changes in Dynamic Properties of Municipal Solid Waste. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 17(4), 331-341.
- Carvalho, M. F. (1999). Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos.
- Castelli, F., & Maugeri, M. (2014). Mechanical properties of Municipal Solid Waste by SDMT. *Waste Management*, 34, 256-265.
- Cavalcanti, M., Borges, W., Stollberg, R., Rocha, M., Cunha, L., Seimetz, E., . . . Olivera e Sousa, F. (2014). Levantamento geofísico (eletrorresistividade) nos limites do aterro controlado do Jokey Clube, vila estrutural, Brasília-DF. *Geociências*, 33, pp. 298-313.
- Cavalcanti, S., Sato, H., & Lima, O. (2001). Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19, pp. 155-168.

- Choudhury, D., & Savoikar, P. (2009). Simplified method to characterize municipal solid waste properties under seismic conditions. *29*, 924-933.
- Cohen, J., & Stockwell, J. (1996). CWP/SU release 28, a free Seismic Software Environment For Unix Platforms. *CWP-Colorado School of Mines*.
- Conicelli, B. P. (2014). *Gestão das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (SP)*. São Paulo: Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- 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*. Institute of geology environmental and engineering.
- Dahlin, T., Rosqvist, H., & Leroux, V. (2010). Resistivity-IP mapping for landfill applications. *first break*, *8*.
- De Iaco, R., Green, A., Maurer, H.-R., & Horstmeyer, H. (2003). A combined seismic reflection and refraction study of a landfill and its host sediments. *Journal of Applied Geophysics*, *52*, 139-156.
- Dixon, N., & Langer, U. (2006). Development of a MSW classification system for the evaluation of mechanical properties. *Waste management*, *26*(3), 220-232.
- Dixon, N., Langer, U., Reddy, K., Maugeri, M., Tinjum, J., Mahler, C., & Cho, Y. (2011). Waste Characterization. Em A. S. Engineers (Ed.), *Waste Characterization. Geotechnical Characterization, Field Measurement, and Laboratory Testing of Municipal Solid Waste* (pp. 135-152).
- Dixon, N., Russell, D., & Jones, V. (2005). Engineering properties of municipal solid waste. *Geotextiles and Geomembranes*, *23*, 205-233.
- Doll, W., Gamey, T., Nyquist, J., Mandell, W., Groom, D., & Rohdewald, S. (2001). *Evaluation of new geophysical tools for investigation of a landfill, Camp Roberts, California*. In 14th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.

- Dumont, G., Pilawski, T., Dzaomuh-Lenieregue, P., Hilgsmann, S., Delvigne, F., Thonart, P., . . . Hermans, T. (2016). Gravimetric water distribution assessment from geoelectrical methods (ERT and EMI) in municipal solid waste landfill.
- Elis, V. R. (1998). *Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos*. Campus de Rio Claro-SP: Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências exatas, UNESP.
- Elis, V. R. (2002). *Geofísica aplicada ao estudo de poluição de solos e águas subterrâneas*. Apostila interna do curso de Geofísica Ambiental, IAG - USP.
- Fachin, S., Huber, F., Shiraiwa, S., Borges, W., & Migliorini, R. (2006). Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtume. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24, pp. 129-138.
- Favery, R. L., Manzatto, M. P., Moretto, R. L., Almeida, , G., Miguel, M. G., & Teixeira, , E. (2016). Study of influential factors on the compaction of municipal solid waste in lysimeters. *Journal of Solid Waste Technology & Management*, 42(1).
- Feng, S., Bai, Z., Cao, B., Lu, S., & Ai, S. (2017). The use of electrical resistivity tomography and borehole to characterize leachate distribution in Laogang landfill, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(25), pp. 20811-20817.
- Fenn, D. G., Hanley, K. J., & DeGeare, T. V. (1975). *Use of the water-balance method for predicting leachate generation from solid-waste-disposal sites*. Washington, DC (USA): Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste.
- Foti, S., Hollender, F., Garofalo, F., Albarello, D., Asten, M., Bard, P., . . . Forbriger, T. (2018). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(6), pp. 2367-2420.
- Genelle, F., Sirieix, C., Naudet, V., Riss, J., Naessens, F., Renie, S., . . . Dabas, M. (2011). Geophysical methods applied to characterize landfill covers with geocomposite. *Symposium on geosynthetics (GEOFRONTIERS)*. Dallas, USA. doi:10.1061/41165

- Genelle, F., Sirieix, C., Riss, J., Naudet, V., Dabas, M., & Bégassat, P. (2014). Detection of landfill cover damage using geophysical methods. *Near Surface Geophysics*, 12, pp. 599-611.
- Gidarakos, E., Havas, G., & Ntzamilis, P. (2006). Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete. *Waste management*, 26(6), pp. 668-679.
- Greenwood, W., Zekkos, D., & Sahadewa, A. (2015). Spatial Variation of Shear Wave Velocity of Waste Materials from Surface Wave Measurements. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 20(4), pp. 287-301.
- Grellier, S. (2005). *Suivi hydrologique des centres de stockage de déchets inertes*. Paris: Ph.D. Thesis Université Pierre et Marie Curie.
- Grellier, S., Reddy, K., Gangathulasi, J., Adib, R., & Peters, C. (2007). Correlation between Electrical Resistivity and Moisture Content of Municipal Solid Waste in Bioreactor Landfill. *Geoenvironmental Engineering*, pp. 1-14.
- Grellier, S., Reddy, K., Gangathulasi, J., Adib, R., & Peters, C. (2006 b). Electrical Resistivity Tomography Imaging of Leachate Recirculation in Orchard Hills Landfill. *Proceedings of the SWANA Conference*, Charlotte.
- Grellier, S., Robain, H., Bellier, G., & Shiri, N. (2006 a). Influence of temperature on the electrical conductivity of leachate from municipal solid waste. *Journal of Hazardous Materials, B* 137.
- Grisolia, M., Napoleoni, Q., & Tancredi, G. (1995). Contribution to a technical classification of MSW. *Proceedings Sardinia*, 95, 761-767.
- Guerin, R., Munoz, M., Aran, C., Laperrelle, C., Hidra, M., Drouart, E., & Grellier, S. (2004). Leachate recirculation: moisture content assessment by means of a geophysical technique. 24, 785–794.
- Hagedoorn, J. (1959). The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. 7(2), 158 – 182.

- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a waste: a global review of solid waste management*. Washington, DC: World Bank.
- Houston, W., Houston, S., Liu, J., Elsayed, A., & Sanders, C. (1995). In situ Testing Methods for Dynamic Properties. *Geotechnical Special Publication*, pp. 73-82.
- Imhoff, P., Reinhart, D., Englund, M., Guérin, R., Gawande, N., Han, B., . . . Yazdani, R. (2007). Review of state of the art methods for measuring water in landfills. *Waste Management*, 27(6), 729-745.
- Jamiolkowski, M. (2012). Role of geophysical testing in geotechnical site characterization. 2(2).
- Jianguo, J., Yong, Y., Shihui, Y., Bin, Y., & Chang, Z. (2010). Effects of leachate accumulation on landfill stability in humid regions of China. *Waste management*, 5.
- Kavazanjian , E., Matasovic , N., Stokoe, K., & Bray, J. (1996). In-situ Shear Wave Velocity of Solid Waste from Surface Wave Measurements. *Proc. 2nd International Congress Environmental Geotechnics*, 1, 97-104.
- Kavazanjian, E. (1999). Seismic Design of Solid Waste Containment Facilities. Vancouver: Proceedings of the Eight Canadian Conference on Earthquake Engineering.
- Kavazanjian, E. (2003). Evaluation of MSW properties using field measurements. *Proceedings 17th Geosynthetic Research Institute Conference, Hot Topics in Geosynthetics—IV*.
- Kavazanjian, E. (2006). Waste mechanics: Recent findings and unanswered questions. Em *Advances in unsaturated soil, seepage, and environmental geotechnics* (pp. 34-54).
- Kearey , P., Brooks, M., & Hill, I. (2009). *Geofísica de exploração*. São Paulo: Oficina de Textos.

- Konstantaki, L. A. (2016). *Imaging and characterization of heterogeneous landfills using geophysical methods*. Tese de doutorado, Technische Universiteit Delft.
- Konstantaki, L., Ghose, R., Draganov, D., Diaferia, G., & Heimovaara, T. (2015). Characterization of a heterogeneous landfill using seismic and electrical resistivity data. *80*(1).
- Lago, A., Elis, V., & Giacheti, H. (2006). Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, *24*, pp. 357-374.
- Landva, A., & Clark, J. (1990). Geotechnics of waste fill. Em *Geotechnics of waste fill - Theory and practice* (Vol. 1070, pp. 86-103). Philadelphia, USA: Astm International.
- Lei Nº 12.305. (2010). *Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Presidência da República.
- Loke, M. (2003). *Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using the least-squares method*.
- Loke, M. (2004). *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*.
- Lopes, I., Strobbia, C., Santos, J., & Almeida, I. (2003). O estudo das ondas sísmicas superficiais como método de caracterização dinâmica de solos. *VI Congresso Nacional de Geologia, Ciências da Terra (UNL)*. Lisboa.
- Manassero, M., Van Impe, W., & Bouazza, A. (1996). Waste disposal and containment. Em *Proceedings Second International Congress on Environmental Geotechnics* (Vol. 3, pp. 193–242). Osaka.
- Manzatto, M. P. (2016). *Análise comparativa das variáveis de lixiviado produzido por resíduo sólido urbano confinado em lisímetros e em célula experimental*. Universidade estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas: Dissertação de Mestrado.
- Matasovic, N., & Kavazanjian, E. J. (1998). Cyclic Characterization of Oil Landfill Solid Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.*, *124*(3), pp. 197-210.

- Matasovic, N., El-Sherbiny, R., & Kavazanjian, J. (2011). In-Situ Measurements of MSW Properties. Em *Geotechnical Characterization, Field Measurement, and Laboratory Testing of Municipal Solid Waste* (pp. 153-194). New Orleans, Louisiana, United States: American Society of Civil Engineers.
- McMechan, G., & Yedlin, M. (1981). Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *46*(6), 869-874.
- Melges Bortolin, J., & Malagutti Filho, W. (2010). Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. *15*(4), 367-374.
- Miguel, M., Paixão Filho, J., Benatti, J., Leme, M., Mortatti, B., & et al. (2016). Gravimetric composition of municipal solid waste disposed in a large-scale experimental cell in Southeastern Brazil. *Int. J. Environ. Waste Management*, *17*, 128-145. doi:10.1504/IJEW.2016.076758
- Miller, R., Xia, J., Park, C., & Ivanov, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *18*(12), 1392-1396.
- Mondelli, G., 2008. *Integração de diferentes técnicas de investigação para avaliação da poluição e contaminação de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Moreira, C. A., & Braga, A. (2009a). Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, *14*, pp. 257-264.
- Moreira, C., & Braga, A. (2008). Aplicação do método de polarização induzida em aterro controlado. *27*(2), 219-227.
- Moreira, C., & Braga, A. (2009b). Caracterização geolétrica de contaminantes provenientes da decomposição de resíduos sólidos domiciliares. *Revista Ambiente e Água*, *4*, pp. 106-114.

- Moretto , R., Siqueira Neto, A., Elis, V., & Miguel, M. (2017). Detection of Leachate Pockets in Experimental Cell of Municipal Solid Waste with Aid of Geophysics. *Sixteenth International Waste Management and Landfill Symposium*. Margherita di Pula: Proceedings Sardinia 2017. CISA Publisher.
- Moura, H. P., & Malaguetti Filho, W. (2003). Eletrorresistividade e de Polarização Induzida Aplicados na Área de Disposição de Resíduos Urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro, SP. 22, 129-139.
- Naveen, B. P. (2018). Measurement of static and dynamic properties of municipal solid waste at Mavallipura landfill site, India. *Geo-Engineering*, 9(26). doi:<https://doi.org/10.1186/s40703-018-0088-9>
- Naveen, B. P., Sitharam, T. G., & Sivapullaiah, P. V. (2017). Evaluation of Dynamic properties of Municipal Solid Waste Sites by Geophysical Tests. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 4, pp. 273-279. doi:<https://doi.org/10.5276/JSWTM.2017.273>
- Nazarian, S., Stokoe, I., Kenneth, H., & Hudson, W. (1983). Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems. (930).
- Neves, S., Borges, J., Caldeira, B., Moita, P., Pedro , J., & Boaventura, R. (2014). Aspectos sobre os métodos de refração sísmica. 28, 79 - 92.
- Ólafsdóttir, E. (2016). *Multichannel Analysis of Surface Waves for assessing soil stiffness*. Faculty of Civil and Environmental Engineering University of Iceland.
- Oliveira, M., Moreira, C., & Menezes, A. (2011). Aplicação do método de Polarização Induzida em área de disposição de resíduos sólidos no município de Caçapava do Sul-RS. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29(2), pp. 377-384.
- Paixao Filho, J. L., & Miguel, M. G. (2017). Long-Term Characterization of Landfill Leachate: Impacts of the Tropical Climate on its Composition. *American Journal of Environmental Sciences*, 13, 116-127.
- Palmer, D. (1980). The generalized reciprocal method seismic refraction interpretation.

- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *Expanded Abstracts* (pp. 1377-1380). 68th Annual International Meeting, SEG.
- Park, C., Miller, R., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. *26*(1), 60-64.
- Pereira, A., Sopena, L., & Mateos, M. (2002). Compressibility of a municipal solid waste fill. *1*, pp. 201–206. Rio de Janeiro: Proceedings of 4th International Congress on Environmental Geotechnics.
- Pomposiello, C., Dapeña, C., Favetto, A., & Boujon, P. (2012). Application of Geophysical Methods to Waste Disposal Studies. Em Dr. Xiao-Ying Yu, *Municipal and Industrial Waste Disposal*. InTech.
- Porsani, J. L., Walter Filho, M., Elis, V. R., Shimeles, F., Dourado, J. C., & Moura, H. P. (2004). The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, *55*(3-4), pp. 199-209.
- Qin, F., Luo, Y., Olsen, K., Cai, W., & Schuster, G. (1992). Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts. *57*(3), 478-487.
- Reynolds, J. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- Richart Jr., F., Woods, R., & Hall Jr., J. (1970). *Vibrations of soils and foundations*. Prentice-Hall.
- Rix, G., Lai, C., Foti, S., & Zywicki, D. (1998). Surface Wave Tests in Landfills and Embankments. *III*, 1008-1019.
- Rohdewald, S. (s.d.). *The DeltatV 1D method for seismic refraction inversion: Theory*. Canada. : Intelligent Resources Inc. .

- Sahadewa, A., Zekkos, D., Woods, R. D., & Stokoe, K. H. (2015). Field Testing Method for Evaluating the Small-Strain Shear Modulus and Shear Modulus Nonlinearity of Solid Waste. *Geotechnical Testing Journal*, 38(4).
- Schuster, G., & Quintus-Bosz, A. (1993). Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. *58*(9), 1314-1323.
- Seehan, J., Doll, W., & Mandell, W. (2005). An evaluation of methods and available software for seismic refraction tomography analysis. *10*(1), 21–34.
- Sharma, H. D., Dukes, M. T., & Olsen, D. M. (1990). Field measurements of dynamic moduli and Poisson's ratios of refuse and underlying soils at a landfill site. Em A. Landva, & G. Knowles, *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice* (pp. 57 –70.). Philadelphia: ASTM STP 1070.
- Shiraiwa, S., Lisovsky, S., Elis, V., Porsani, J., & Borges, W. (2002). Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá, MT, Brasil: resultados preliminares. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20, pp. 181-186.
- Silva, J., Loureiro, E., Elis, V., Hiodo, F., & Porsani, J. (2002). Aplicação de ensaios elétricos e eletromagnéticos em problema de poluição ambiental. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20, pp. 193-198.
- Singh, M. (2008). *Characterization of stress-deformation behaviour of municipal solid waste*. Saskatoon, Canada: Teses de doutorado, Department of Civil and Geological Engineering University of Saskatchewan.
- Singh, M., Fleming, I., & Sharma, J. (2007). Estimation of mechanical properties of municipal solid waste using stochastic modeling. *Proceedings 11th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia*. Cagliari, Italy, CISA.
- Socco, L., & Strobbia, C. (2004). Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. *Near Surface Geophysics*, 2, pp. 165-185.
- Song, Y., Castagna, J., Black, R., & Knapp, R. (1989). Sensitivity of near-surface shear-wave velocity determination from Rayleigh and Love waves. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* (pp. 509-512). Society of Exploration Geophysicists.

- Soupios , P., & Ntarlagiannis, D. (2017). Characterization and Monitoring of Solid Waste Disposal Sites Using Geophysical Methods: Current Applications and Novel Trends. *Modelling Trends in Solid and Hazardous Waste Management*, 75-103.
- Stokoe, K., Wright , S., Bay, J., & Roesset, J. (1994). Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method. 15-25.
- Tchobanoglous, G., Theisen , H., & Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management*. New York.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R., & Keys, D. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Thornthwaite, C., & Mather, J. (1948). *The Water Balance Publications*. New Jersey, Drexel Institute of Technology: Climatology.
- Van Elk, A. (2007). *Redução de emissões na disposição final*. Rio de Janeiro: IBAM.
- Watanabe, T., Matsuoka, T., & Ashida,, Y. (1999). Seismic travelttime tomography using Fresnel volume approach. *SEG technical program expanded abstracts* (pp. 1402-1405). Society of Exploration Geophysicists.
- Whiteley, R. (2004). Shallow seismic refraction interpretation with visual interactive ray trace (VIRT) modelling. 35(2).
- Wikipedia. (s.d.). *Campinas*. Acesso em Dezembro de 2018, disponível em Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Campinas#cite\\_note-11](https://en.wikipedia.org/wiki/Campinas#cite_note-11)
- Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, J. J., Feddema, K. M., & Klink, D. R. ( 1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. 90, 8995-9005.
- Wongpornchai, P., Phatchaiyo, R., & Srikoch, N. (2009). Seismic Refraction Tomography of Mae-Hia Landfill Sites, Mueang District, Chiang Mai. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 3, 621-624.
- Worrell, W., & Vesilind, P. (2011). *Solid Waste Engineering*. Cengage Learning.

- Yegian, M., Harb, J., & Kadakal, U. (1998). Dynamic response analysis procedure for landfills with geosynthetic liners. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124(10), 1027-1033.
- Yilmaz, O., & Doherty, S. (1987). Seismic data processing. 2.
- Zalachoris, G. (2010). *Field measurements of Linear and Nonlinear Shear Moduli of Solid Municipal Waste Using a Dynamically Loaded Surface Footing*. Austin- Texas: Dissertação de mestrado. The University of Texas at Austin.
- 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. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(1), pp. 45–58. doi:10.1139/T07-069
- Zekkos, D., Bray, J. D., Kavazanjian, J. E., Matasovic, N., Rathje, E. M., Riemer, M. F., & Stokoe, K. H. (2006). Unit Weight of Municipal Solid Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(10), pp. 1250-1261. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:10(1250)
- Zekkos, D., Kavazanjian Jr., E., Bray, J. D., Matasovic, N., & Riemer, M. F. (2010). Physical Characterization of Municipal Solid Waste for Geotechnical Purposes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1231-1241.
- Zekkos, D., Matasovic, N., El-Sherbiny, R., Athanasopoulos-Zekkos, A., Towhata, I., & Mageri, M. (2011). Dynamic properties of municipal solid waste. *Geotechnical special publication, geotechnical characterization, field measurement and laboratory testing of municipal solid waste*, 209, 112-134.
- Zekkos, D., Sahadewa, A., Woods, R. D., & Stokoe, K. H. (2014). Development of model for shear-wave velocity of municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(3). doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001017.
- Zekkos, D., Sahadewa, A., Woods, R., Stokoe, K., & Matasovic, N. (2013). In Situ Assessment of the Nonlinear Shear Modulus of Municipal Solid Waste.

*Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.* Paris.

Zhu, X., & McMechan, G. A. (1989). Estimation of a two-dimensional seismic compressional-wave velocity distribution by iterative tomographic imaging. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 1(1), pp. 13-17.

## Anexo 1 – Teor de umidade das amostras

**Ensaio** Determinação do Teor de Umidade  
**NBR** 6457/2016  
**Local** LABPRO - Laboratório de Protótipos - Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP  
**Responsável** Mariane e Nataly  
**Data** 23/05/2018

		<b>Furo 4 (Célula Experimental)</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Unidade</b>	<b>0,5 m</b>	<b>1,0 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2,0 m</b>	<b>2,5 m</b>	<b>3,0 m</b>
$M_{RSU}+M_w+M_{\text{saco plástico}}$	(g)	243,7349	229,5901	178,6703	149,2233	276,3427	194,2526
$M_{RSU}+M_{\text{saco plástico}}$	(g)	216,6648	199,9907	154,3186	126,0798	224,4484	132,644
$M_{\text{saco plástico}}$	(g)	30,0039	38,9472	30,2339	26,9803	32,5169	32,7829
$M_w$	(g)	27,0701	29,5994	24,3517	23,1435	51,8943	61,6086
$M_{RSU}$	(g)	186,6609	161,0435	124,0847	99,0995	191,9315	99,8611
$\omega$	(%)	0,15	0,18	0,20	0,23	0,27	0,62
$\omega$	<b>(%)</b>	<b>15%</b>	<b>18%</b>	<b>20%</b>	<b>23%</b>	<b>27%</b>	<b>62%</b>
Data Massa Úmida	d/m/a	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018
Data Massa Seca	d/m/a	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018
Coleta no Aterro	d/m/a	22/05/2018	22/05/2018	22/05/2018	22/05/2018	22/05/2018	22/05/2018
Observações		solo	solo	solo + plástico	plástico mole + plástico duro	papel + plástico + vidro + solo	plástico mole + plástico duro
Temperatura in-situ	°C	22	24	25	29	30	33

		<b>Furo 6 (Célula Experimental)</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Unidade</b>	<b>0,5 m</b>	<b>1,0 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2,0 m</b>	<b>2,5 m</b>	<b>3,0 m</b>
$M_{RSU}+M_w+M_{saco\ plástico}$	(g)	200,0255	133,1733	235,0419	126,3097	161,1633	167,2221
$M_{RSU}+M_{saco\ plástico}$	(g)	187,1623	122,3717	160,4244	105,7009	109,4827	103,0649
$M_{saco\ plástico}$	(g)	34,1962	34,6546	28,1062	31,3079	35,0729	27,2895
$M_w$	(g)	12,8632	10,8016	74,6175	20,6088	51,6806	64,1572
$M_{RSU}$	(g)	152,9661	87,7171	132,3182	74,393	74,4098	75,7754
$\omega$	(%)	0,08	0,12	0,56	0,28	0,69	0,85
<b><math>\omega</math></b>	<b>(%)</b>	<b>8%</b>	<b>12%</b>	<b>56%</b>	<b>28%</b>	<b>69%</b>	<b>85%</b>
Data Massa Úmida	d/m/a	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018
Data Massa Seca	d/m/a	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018
Coleta no Aterro	d/m/a	22/05/2018	22/05/2018	22/05/2018	22/05/2018	22/05/2018	22/05/2018
Observações		solo	solo	plástico mole + plástico duro	plástico mole + plástico duro	plástico + tecido	plástico mole + plástico duro
Temperatura in-situ	°C	28	27	26	30	32	36

		<b>Furo 8 (Célula Antiga ±20 anos)</b>								
<b>Amostra</b>	<b>Unidade</b>	<b>0 - 0,5 m</b>	<b>1,0 - 1,5 m</b>	<b>2,0 - 2,5 m</b>	<b>3,0 - 3,5 m</b>	<b>4,0 - 4,5 m</b>	<b>5,0 - 5,5 m</b>	<b>6,0 - 6,5 m</b>	<b>7,0 - 7,5 m</b>	<b>8,0 - 8,5 m</b>
$M_{RSU}+M_w+M_{saco\ plástico}$	(g)	342,2083	325,1980	109,2072	187,4741	465,7058	274,1344	170,1121	242,3515	204,7535
$M_{RSU}+M_{saco\ plástico}$	(g)	314,4742	296,4354	75,7306	136,4028	405,4437	233,6728	130,7675	191,2806	164,7104
$M_{saco\ plástico}$	(g)	1,6130	1,6130	1,6130	1,6130	1,6130	1,6130	1,6130	1,6130	1,6130
$M_w$	(g)	27,7341	28,7626	33,4766	51,0713	60,2621	40,4616	39,3446	51,0709	40,0431
$M_{RSU}$	(g)	312,8612	294,8224	74,1176	134,7898	403,8307	232,0598	129,1545	189,6676	163,0974
$\omega$	(%)	0,09	0,10	0,45	0,38	0,15	0,17	0,30	0,27	0,25
$\omega$	(%)	<b>9%</b>	<b>10%</b>	<b>45%</b>	<b>38%</b>	<b>15%</b>	<b>17%</b>	<b>30%</b>	<b>27%</b>	<b>25%</b>
Data Massa Úmida	d/m/a	23/05/2018	23/05/2018	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018	6/06/2018
Data Massa Seca	d/m/a	6/06/2018	6/06/2018	19/06/2018	19/06/2018	19/06/2018	19/06/2018	19/06/2018	19/06/2018	19/06/2018
Coleta no Aterro	d/m/a	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018	23/05/2018
Observações		solo	solo	plástico mole + plástico duro	plástico mole + plástico duro	solo + plástico + pedra	solo + plástico	plástico mole + plástico duro	plástico mole + plástico duro + PET	plástico mole + plástico duro
Temperatura in-situ	°C	25	31	34	34	38	39	42	42	44

### Observações

As amostras de 2,0 a 8,5 m do furo 8 sofreram atrasos na medição da massa úmida devido à greve dos caminhoneiros, no final de Maio de 2018. Coleta de amostras por perfuração SPT.

## Anexo 2 – Dados das sondagens elétricas verticais

<b>SEV localizada na posição do Furo 2</b>					
<b>AB/2</b>	<b>MN/2</b>	<b><math>\Delta V</math></b>	<b>I</b>	<b>RHO</b>	<b>M</b>
<b>0,5</b>	0,1	2870	76	143	3,9
<b>0,6</b>	0,1				
<b>0,8</b>	0,1	777	131	59	4
<b>1</b>	0,1	404	123	51,3	5,1
<b>1,2</b>	0,1	42,7	106	9,1	6,4
<b>1,5</b>	0,1	257,3	204,1	44,4	8,5
<b>1,5</b>	0,2	308	204,5	26,1	8,1
<b>2</b>	0,1	174	245	43,6	11,2
<b>2</b>	0,2	207	248	26	10,8
<b>2,5</b>	0,2	107,8	201,1	26,1	12,6
<b>3</b>	0,2	73	191	26,9	13,9
<b>4</b>	0,2	24,8	114,7	27,1	15,7
<b>4</b>	0,5	59	116,3	25,1	15,5
<b>5</b>	0,2	6,27	46,4	26,5	18,2
<b>5</b>	0,5	14,8	46,2	24,9	16,9
<b>6</b>	0,5	22,8	105,2	24,4	16,9
<b>6</b>	1	40,9	105	21,5	-10,5
<b>8</b>	0,5	4,56	51,7	17,7	13,1
<b>8</b>	1	8,4	51,6	16,4	-6,6
<b>10</b>	0,5	5,5	112,9	15,5	13
<b>10</b>	1	9,4	112,7	13	-47
<b>15</b>	0,5	1,32	46,4	20,1	5,6
<b>15</b>	1	1,1	46	9,1	387
<b>20</b>	1	2,4	106,7	14,3	181,7
<b>20</b>	2	8,7	106,8	25,4	9,1
<b>25</b>	2	5,3	83,2	31,5	9,1
<b>30</b>	2	7	126,4	39,3	8,4

<b>SEV localizada na posição do Furo 5</b>					
<b>AB/2</b>	<b>MN/2</b>	<b><math>\Delta V</math></b>	<b>I</b>	<b>RHO</b>	<b>M</b>
<b>0,5</b>	0,1				
<b>0,6</b>	0,1				
<b>0,8</b>	0,1				
<b>1</b>	0,1	3782	35,53	1655	7,1
<b>1,2</b>	0,1	1501	30,7	1096	7,6
<b>1,5</b>	0,1	868	43,9	695	9,4
<b>1,5</b>	0,2	833	44	328	-12,4
<b>2</b>	0,1	224,6	50,9	276,6	13,1
<b>2</b>	0,2	461	108	132	-16,4
<b>2,5</b>	0,2	217	83,7	126,7	-62,7
<b>3</b>	0,2	183	77,1	167,4	-99,9
<b>4</b>	0,2	105,6	103,36	128,2	-99,9
<b>4</b>	0,5	63,9	101,6	31,1	16,6
<b>5</b>	0,2	18,2	73,5	48,5	-99,8
<b>5</b>	0,5	17,6	73,6	18,6	-21
<b>6</b>	0,5	7,2	47,1	17,4	-35,9
<b>6</b>	1	30,5	46,9	35,8	16,2
<b>8</b>	0,5	6,1	55,4	22,1	14,1
<b>8</b>	1	16,3	55,01	29,4	14,1
<b>10</b>	0,5	3,9	63,8	19,6	12,2
<b>10</b>	1	10,6	63,9	26	14
<b>15</b>	0,5	3,22	126,1	18	7,9
<b>15</b>	1	8,5	126,7	23,7	9,8
<b>20</b>	1	9,7	197	30,8	10,2
<b>20</b>	2	17,5	198,3	27,5	12,4
<b>25</b>	2	11	147,5	36,4	12,2
<b>30</b>	2	4,4	69,4	45	14

<b>SEV localizada na posição do Furo 8</b>						
<b>AB/2</b>	<b>MN/2</b>	<b><math>\Delta V</math></b>	<b>I</b>	<b>RHO</b>	<b>M</b>	
<b>1,5</b>	0,5	1083	109,6	62,1	7,7	
<b>2</b>	0,5	647,5	198,3	38,5	9,7	
<b>3</b>	0,5	49,7	213,3	6,4	11,2	
<b>4</b>	0,5	177	274	32	10,7	
<b>5</b>	0,5	158	397	31,1	10,8	
<b>6</b>	0,5	14	275,8	5,7	11,2	
<b>6</b>	1	143,1	273	28,8	11,7	
<b>8</b>	0,5	45,3	317,6	28,6	11,5	
<b>8</b>	1	86,9	317,6	27,1	12	
<b>10</b>	0,5	22,8	264	27,1	11,4	
<b>10</b>	1	43,64	263,6	25,7	11,9	
<b>12</b>	1	65,2	626	23,4	12,1	
<b>15</b>	1	30	512	20,7	12	
<b>15</b>	2	59	516,5	19,8	-99	
<b>20</b>	1	12,8	458	17,6	12,2	
<b>20</b>	2	23,9	457	16,3	13,3	
<b>25</b>	2	18,8	616	14,9	12,3	
<b>30</b>	2	13,6	635	15,1	13,4	
<b>40</b>	2	5,4	478	14,3	10,5	
<b>50</b>	2	4,7	635,2	9,4	13,9	