

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

ANTONIO CARLOS DE SIQUEIRA NETO

**UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS NA CARACTERIZAÇÃO DE
CÉLULA EXPERIMENTAL NO ATERRO DE RESÍDUOS URBANOS DELTA-A EM
CAMPINAS - SP**

São Paulo
2015

ANTONIO CARLOS DE SIQUEIRA NETO

**UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS NA CARACTERIZAÇÃO DE
CÉLULA EXPERIMENTAL NO ATERRO DE RESÍDUOS URBANOS DELTA-A EM
CAMPINAS - SP**

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

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciências: Geofísica.

Área de concentração: Geofísica Aplicada

Orientador: Prof. Dr. Vagner Roberto Elis

SÃO PAULO
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Siqueira Neto, Antonio Carlos de

Utilização de métodos geelétricos na caracterização de célula experimental no aterro de resíduos urbanos Delta A em Campinas – SP / Antonio Carlos de Siqueira Neto; Orientador: Vagner Roberto Elis.

São Paulo, 2015

81p.; 54 fig.

Dissertação(Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geofísica. Área de Concentração: Geofísica Aplicada) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

1. Geofísica. 2. Meio Ambiente. 3. Aterro Sanitário

SIQUEIRA NETO, A.C. Utilização de métodos geoeletricos na caracterização de célula experimental no aterro de resíduos urbanos Delta A em Campinas – SP.

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências: Geofísica.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Aos meus pais Geisa e Carlos Roberto que sempre me incentivaram e me apoiaram incondicionalmente durante toda minha trajetória acadêmica.

Ao meu filho César, pela alegria que me motiva a viver.

A minha amada Flávia, minha dedicada e compreensiva companheira.

A minha irmã Géssica, que tanto me diverte.

E ao meu grande amigo Djonatan, que foi e sempre será eterno em nossos corações.

**“O improviso é o início do acaso”
(Antonio Siqueira, Djonatan Santos)**

Agradecimentos

Agradecimento ao IAG-USP e a todo seu corpo docente, especialmente aos Professores Dr. Vagner Roberto Elis e Dr. Jorge Luiz Porsani e ao técnico Marcelo Stangari.

Ao Professor Dr. Shozo Shiraiwa pelo incentivo irrestrito e pela orientação durante a graduação.

Ao Professor Dr. Alterêdo Oliveira Cutrim por ter me orientado durante toda a graduação, me dado à oportunidade na Geofísica aplicada e por ter me ensinado a ser um pesquisador.

Ao Professor Dr. Eric Font da Universidade de Lisboa, pelas oportunidades, amizade e confiança. O admiro por ser este grande orientador e pesquisador.

Ao Dr. Otávio Coaracy Brasil Gandolfo e ao corpo técnico do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, pelo empréstimo do equipamento EM-34 Geonics, para coleta de dados no aterro Delta A em Campinas-SP.

Aos meus colegas de pós-graduação e meus amigos, Oscar Andrés Lazcano Patroni, Jorge Tapias, Cyntia Okida Minei e Álvaro Matos Sandoval com os quais compartilhei momentos de felicidade, apreensão e expectativas.

Ao CNPq pela bolsa concedida.

A todos os funcionários do IAG.

Aos meus colegas de sala, Marco Antonio Couto Jr, Suzan Vasconcelos e Brian Saam Shams, pela troca de conhecimento, discussões frutíferas e infrutíferas e gargalhadas.

E em especial a minha família que sempre me motivou desde o momento da escolha do curso de graduação até este momento, meus pais, meu filho, minha noiva e ao meu grande amigo Djonatan Freitas dos Santos, companheiro durante toda graduação, sócio e principalmente um grande ser humano, levarei para sempre seus valores e nunca deixarei seu legado ser esquecido.

RESUMO

Siqueira Neto, A.C. Utilização de métodos geoeletricos na caracterização de célula experimental no aterro de resíduos urbanos Delta A em Campinas – SP. 2015. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Os métodos de eletrorresistividade (ER) com a técnica de caminamento elétrico (CE), método da polarização induzida (IP) e o método eletromagnético indutivo (EM) foram aplicados no aterro Delta A, localizado ao lado da rodovia dos Bandeirantes no município de Campinas (SP). Dentro do aterro há uma região de aproximadamente 5.200 m² denominada “célula experimental”, com impermeabilização de base por meio de geomembrana de PEAD (Polietileno de alta densidade) onde ocorre um monitoramento regular pelo Departamento de Geotecnia da UNICAMP. Esse projeto teve como objetivo principal verificar como o corpo de resíduos e a geomembrana são imageados com os métodos geofísicos, e se existe evidência de zonas de concentração de chorume e como seriam as imagens caso houvesse ruptura da geomembrana com vazamento. Na área foram executadas 6 linhas com extensão de 110 m e espaçamento de 12 m entre elas, utilizando arranjo dipolo-dipolo com espaçamento entre eletrodos de 4 m e 5 m e cabo de 10 e 20 m para as medidas de EM. Com os resultados apresentados podemos afirmar que o método que melhor forneceu informações sobre a célula experimental foi o de eletrorresistividade, pois identificou a camada resistiva (geomembrana) e nos permitiu comparar os dados com as simulações feitas em laboratório. No entanto, para uma melhor resolução dos dados de ER se faz necessário diminuir a distância entre os eletrodos, aumentando assim a acurácia do levantamento.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrorresistividade, Polarização induzida, Aterro Sanitário, Célula Experimental.

ABSTRACT

Siqueira Neto, A.C. Use of geoelectrical methods in the characterization of an experimental cell at the landfill of municipal waste Delta A in Campinas - SP. 2015. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

The methods of resistivity (ER) with the electrical profiling technique (EP), the method of induced polarization (IP) and the inductive electromagnetic method (EM) were applied to landfill Delta A, located next to the highway dos Bandeirantes in Campinas (SP). Within the landfill there is a region of approximately 5,200 m² called "experimental cell" with waterproofing base through HDPE (High Density *Polyethylene*) geomembrane which is regular monitoring by the UNICAMP Geotechnical Department. The main objective was to verify how the body of waste and the geomembrane are imaged with geophysical methods, and if there is evidence of leachate concentration areas and how the images would be if there was rupture of the geomembrane leaking. In the area were performed 6 lines with a length of 110 m and 12 m spacing between them using dipole-dipole array with electrode spacing of 4 m and 5 m and cable of 10 and 20 m for EM measures. With the results presented we can say that the method that best provided information on the experimental cell was the resistivity method, as identified resistive layer (geomembrane) and allowed us to compare the data with simulations in the laboratory. However, for better resolution of the ER data is needed to close the distance between the electrodes, thereby increasing the accuracy of the survey.

KEYWORDS: Electrical Resistivity, Induced Polarization, Landfill, Experimental Cell

Lista de ilustrações

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Modelo de aterro sanitário (Bosco, M.E.G. Benvenuto, C. ABMS, 2012). | 20 |
| Figura 3.1 Localização do aterro sanitário Delta A e respectivas vias de acesso. | 29 |
| Figura 3.2 Célula experimental implantada no aterro Delta A..... | 31 |
| Figura 3.3 Instalação da camada de geomembrana no início da instalação da célula experimental | 31 |
| Figura 3.4 Sistema de drenagem finalizada | 32 |
| Figura 3.5 Compactação do RSU no interior da célula experimental..... | 33 |
| Figura 3.6 Visão do topo da célula experimental com os piezômetros instalados. ... | 33 |
| Figura 4.1 Esquema de campo para a determinação da resistividade (Braga, 2006) | 34 |
| Figura 4.2 Modelo real em meio heterogêneo/Esquema de quatro eletrodos para medidas de eletrorresistividade (Braga, 1999) | 35 |
| Figura 4.3 Valores de resistividades elétricas de rochas e materiais conhecidos. (modificado de Ustra, 2008). | 37 |
| Figura 4.4 Resistímetro Íris modelo Syscal R2 Plus, receptor modelo Syscal Elrec Pro, bateria 12V e eletrodos não polarizáveis. | 38 |
| Figura 4.5 Esquema de arranjo Dipolo-Dipolo utilizado em caminhamentos elétricos (Elis, 1998)..... | 40 |
| Figura 4.6 Forma de plotagem dos dados para construção da seção de resistividade aparente (Elis, 1998)..... | 40 |
| Figura 4.7 Variação de ΔV com o tempo. A linha pontilhada vertical indica o momento em que se corta a corrente e começa a descarga (Braga, 1997). | 42 |
| Figura 4.8 Efeitos de polarização de membrana e eletrodo. a) Distribuição normal de íons em arenito poroso; b) Polarização de membrana em arenito poroso devido à aplicação de voltagem em corrente contínua; c) Fluxo eletrolítico no poro superior e polarização de eletrodo no poro inferior. (modificado de Telford et al, 1990). | 45 |
| Figura 4.9 Rotina básica de inversão de dados de resistividade elétrica (Fachin, 2007)..... | 48 |
| Figura 4.10 Parte da rede de células bidimensional utilizada para a modelagem 2D, mostrando as posições dos eletrodos (modificado de Loke, 1999). | 49 |
| Figura 4.11 Indução Eletromagnética (modificado de Sheriff, 1989). | 50 |
| Figura 4.12 Componentes do método eletromagnético EM-34..... | 51 |
| Figura 4.13 Configurações convencionais de bobinas utilizadas no método de dupla bobina (a) Bobinas horizontais, com dipolo magnético vertical. (b) Bobinas verticais, com o dipolo magnético horizontal (Borges, 2004)..... | 54 |
| Figura 5.1 Syscal R2, Elrec Pro e conversor de voltagem e bateria 12 V utilizados na aquisição com a técnica de caminhamento elétrico. | 59 |
| Figura 5.2 Aplicação das técnicas CE e IP em uma das linhas da célula experimental. | 59 |
| Figura 5.3 Esquema dos eletrodos não polarizáveis, com solução de sulfato de cobre (CuSO ₄), utilizados no caminhamento elétrico (Camargo, 2014). | 60 |
| Figura 5.4 Equipamento EM 34, composto por bobina transmissora, bobina receptora, módulo de controle e transmissão de corrente e módulo de leitura. | 60 |
| Figura 5.5 Distribuição das linhas de investigação de CE, IP e EM-34 na célula experimental. | 61 |
| Figura 6.1 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 1 – C1 (Fora da célula). | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.2 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 2 – C2..... | 63 |
| Figura 6.3 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 3 – C3..... | 63 |
| Figura 6.4 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 4 – C4..... | 63 |
| Figura 6.5 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 5 – C5..... | 64 |
| Figura 6.6 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 6 – C6..... | 64 |
| Figura 6.7 Seção de cargabilidade(mV/V) para linha 1..... | 65 |
| Figura 6.8 Seção de cargabilidade(mV/V) para linha 2..... | 65 |
| Figura 6.9 Seção de cargabilidade(mV/V) para linha 3..... | 65 |
| Figura 6.10 Seção de cargabilidade(mV/V) para linha 4..... | 65 |
| Figura 6.11 Seção de cargabilidade(mV/V) para linha 5..... | 66 |
| Figura 6.12 Seção de cargabilidade(mV/V) para linha 6..... | 66 |
| Figura 6.13 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 01..... | 67 |
| Figura 6.14 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 02..... | 67 |
| Figura 6.15 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 03..... | 68 |
| Figura 6.16 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 04..... | 68 |
| Figura 6.17 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 05..... | 69 |
| Figura 6.18 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 06..... | 69 |
| Figura 6.19 Modelo de célula experimental sem a aplicação de geomembrana de PEAD..... | 70 |
| Figura 6.20 Modelo de célula experimental com a aplicação de geomembrana de PEAD..... | 71 |
| Figura 6.21 Modelo de célula experimental com a aplicação de geomembrana de PEAD, com níveis de chorume..... | 72 |
| Figura 6.22 Modelo de célula experimental com a aplicação de geomembrana de PEAD, com furo de 3m no centro..... | 73 |
| Figura 6.23 Modelo de célula experimental com a aplicação de geomembrana de PEAD, com furo de 3m no centro e vazamento de chorume..... | 74 |
| Figura 6.24 Modelo de célula experimental com a aplicação de geomembrana de PEAD, com furo de 1 m no centro e vazamento de chorume..... | 75 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1.1 Disposição final dos Resíduos Sólidos no Brasil 1989/2000/2008 (PNSB/IBGE, 2010). | 18 |
| Tabela 1.2 Classificação quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente. | 22 |
| Tabela 1.3 Classificação quanto à natureza ou origem. | 23 |
| Tabela 4.1 Espaçamento entre bobinas, frequência de operação e profundidade de investigação de acordo com a disposição das bobinas. | 54 |

Sumário

| | |
|---|----|
| CAPITULO 1. INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 1.1 Introdução e objetivos | 15 |
| 1.2. Aspectos gerais | 17 |
| 1.3 Conceitos complementares | 17 |
| CAPITULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 25 |
| 2.1. Contexto Geológico | 25 |
| 2.2. Aplicações de métodos geofísicos em aterros sanitários | 25 |
| CAPITULO 3. ÁREA DE ESTUDO | 29 |
| 3.1 Descrição da área de estudo | 29 |
| 3.2 Instalação da Célula Experimental..... | 30 |
| CAPITULO 4. METODOLOGIA | 34 |
| 4.1. Métodos Geofísicos | 34 |
| 4.2. Eletrorresistividade..... | 34 |
| 4.2.1. Técnica de caminhamento elétrico | 38 |
| 4.2.2. Arranjos de eletrodos | 39 |
| 4.3. POLARIZAÇÃO INDUZIDA | 40 |
| 4.3.1. Fontes dos efeitos de IP | 41 |
| 4.3.2. Polarização de membrana | 42 |
| 4.3.3. Polarização de eletrodo | 43 |
| 4.3.4. Processos de medidas de IP | 44 |
| 4.3.5. Interpretação de dados de ER e IP..... | 46 |
| 4.4. MÉTODO ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO | 50 |
| 4.4.1. Fundamentos teóricos | 52 |
| 4.4.2. Aquisição e interpretação de dados eletromagnéticos | 53 |
| 4.5. MODELAGEM | 55 |
| 4.5.1. Princípios da modelagem | 55 |
| 4.5.2 Modelagens com o software RESIXIP2DI | 55 |
| CAPITULO 5. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS | 58 |
| 5.1. Equipamentos Utilizados | 58 |
| 5.2. Trabalhos Realizados em Campo | 60 |
| CAPITULO 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 62 |
| 6.1. Caminhamento Elétrico (CE) | 62 |
| 6.2. Polarização Induzida (IP)..... | 64 |
| 6.3. Método Eletromagnético (EM-34)..... | 66 |
| 6.4. Resultados da Modelagem | 69 |

| | |
|--|-----------|
| CAPITULO 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 76 |
| Referências..... | 77 |

CAPITULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 Introdução e objetivos

O aumento expressivo da população mundial tem gerado grandes impactos e desafios para as próximas gerações, a produção e deposição de resíduos sólidos é um deles. A geração destes resíduos no mundo gira em torno de 12 bilhões de toneladas/ano e até 2020 o volume previsto é de 18 bilhões de toneladas/ano (UNEP-EEA, 2007). No Brasil a problemática é a mesma e a geração de resíduos cresceu 1,3% de 2011 para 2012 e a produção para o ano de 2012 foi de aproximadamente 63 milhões de toneladas (ABRELPE, 2012). O Ministério do Meio Ambiente em 2010 criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) na qual está prevista a implantação de aterros sanitários em todos municípios brasileiros os quais se encontram superlotados em alguns municípios e em outros inexistem.

O gerenciamento de RSU (resíduos sólidos urbanos) tem sido um verdadeiro desafio aos gestores públicos, devido a problemas como áreas disponíveis, licenciamento ambiental, custos de transporte, dentre outros. Segundo Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010), a situação atual dos municípios brasileiros referente à disposição final dos resíduos sólidos urbanos é: 50,8% dos municípios brasileiros despejam resíduos sólidos em lixões, 22,5% descartam em aterros controlados, 27,7% utilizam aterro sanitário para o descarte.

Vários estudos de poluição das águas subterrâneas demonstram que todo lixão ou aterro controlado provoca algum tipo de poluição. Assim, preocupações como a contaminação do solo e dos recursos hídricos, das plantas, dos animais e do homem, decorrente da presença de contaminantes metálicos provenientes da inadequada disposição de resíduos sólidos, conduzem pesquisadores a direcionar seus objetivos de pesquisa a estes problemas (Oliveira & Pasqual, 2004).

A omissão dos órgãos de fiscalização ou o simples descaso da população, muitas vezes resultam no descarte clandestino de resíduos, geralmente em áreas inapropriadas, como nascentes, rios e áreas de proteção permanente. A geração de chorume (líquido poluente gerado da decomposição de resíduos orgânicos) pode ultrapassar quinze anos após o final da deposição de lixo, dependendo de vários fatores (Possamai et al., 2007). Caso o solo sob os resíduos seja permeável e

desprotegido, o chorume pode atingir o nível freático contaminando assim os aquíferos ocorrentes na região.

Atualmente os métodos geofísicos têm sido amplamente utilizados nos estudos de pluma de contaminação devido à sua rapidez e custo relativamente baixo quando comparados a outras técnicas de investigação. Os principais métodos geofísicos para investigação de contaminantes são: Eletromagnéticos, Eletrorresistividade, Potencial Espontâneo, Radar de Penetração no Solo e, eventualmente, Magnetometria (CETESB, 2001).

O local onde foi realizado este trabalho é o aterro sanitário Delta-A em Campinas (SP), que recebe todos os RSU do município. Dentro deste aterro encontra-se uma célula experimental implantada e monitorada pelo departamento de Geotecnia da UNICAMP. O controle de fluxo dos efluentes na célula indica possíveis acúmulos de chorume. Embora o uso do método de eletroresistividade seja ideal para identificar bolsões de chorume devido ao contraste de resistividade no meio, a estrutura da célula experimental pode ser um fator limitante, já que o PEAD é um material isolante elétrico. Desta forma, o estudo será complementado pelas medidas de polarização induzida (IP) e pelo caminhamento eletromagnético (EM-34).

Durante o desenvolvimento da pesquisa foram feitos modelos matemáticos simulando as situações criadas na Célula Experimental e posteriormente comparadas com as seções obtidas através dos ensaios reais. Essas comparações serão importantes para avaliação do desempenho das metodologias utilizadas.

Em função de todos esses fatores, esse projeto foi desenvolvido com o objetivo de contribuir com o estudo de contaminação em aterros sanitários controlados e aplicação de métodos geofísicos no mapeamento desse tipo de área. O objetivo principal foi verificar como o corpo de resíduos e a geomembrana são imageados com os métodos geofísicos, se existe evidência de zonas de concentração de chorume e como seriam as imagens caso houvesse ruptura da geomembrana com vazamento de chorume. Espera-se assim a confecção de um modelo geoelétrico ideal para a área de pesquisa.

1.2. Aspectos gerais

A dissertação está estruturada em oito capítulos, divididos com o intuito de organizar os dados e introduzi-los em uma ordem que proporcione sua melhor compreensão para quem o consulte. Os capítulos encontram-se divididos da seguinte forma:

O capítulo 1, Introdução, apresenta a descrição sucinta da dissertação, o contexto que determinou a escolha do tema da pesquisa, sua motivação e objetivos, e introduz alguns conceitos básicos considerados relevantes para a inserção do leitor no tema.

O capítulo 2, Revisão bibliográfica, elenca trabalhos anteriores relacionados ao tema e/ ou principais trabalhos realizados na área de estudo e os que serviram como base ou direcionamento para alguns aspectos da pesquisa.

O capítulo 3, Área de estudo e Instalação da Célula experimental, identifica a localização e vias de acesso da área de pesquisa e explica passo-a-passo a implantação da célula experimental no aterro sanitário.

O capítulo 4, Metodologia, apresenta os fundamentos teóricos dos métodos utilizados: eletrorresistividade, polarização induzida e eletromagnético indutivo. E finalizando com uma introdução sobre os conceitos básicos sobre modelagem matemática e sobre o software utilizado no projeto de pesquisa.

O capítulo 5, Aquisição e processamento dos dados, descreve os ensaios realizados em campo, os equipamentos utilizados e a forma como os dados foram processados.

O capítulo 6, Interpretação e discussão dos resultados, discute as informações obtidas, sua adequação aos objetivos e suas possibilidades de aplicação.

O capítulo 7, Conclusões e considerações finais.

O capítulo 8, As referências bibliográficas citadas e consultadas.

1.3 Conceitos complementares

1.3.1 DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Com o crescimento das metrópoles e dos centros urbanos não basta apenas recolher todo o lixo das ruas e edificações, é preciso dar um destino final adequado a estes resíduos coletados. Daí a importância do planejamento e construção de aterros sanitários que estejam aptos a receber todo contingente das cidades em que se situam. O IBGE em 2010 apresentou os resultados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico que podemos observar na Tabela 1.1, nela verificamos a diminuição de deposição de resíduos em “lixões” à céu aberto e conseqüentemente o aumento da instalação de aterros sanitários durante os intervalos de tempo apresentados. Apesar dos dados positivos é sabido que o Brasil precisa avançar quantitativamente e qualitativamente no tratamento adequado dos seus resíduos sólidos.

Tabela 1.1 Disposição final dos Resíduos Sólidos no Brasil 1989/2000/2008 (PNSB/IBGE, 2010).

| Ano | Destino final dos resíduos sólidos, por unidades e de destino (%) | | |
|------|---|-------------------|------------------|
| | Vazadouro a céu aberto | Aterro controlado | Aterro sanitário |
| 1989 | 88,2 | 9,6 | 1,1 |
| 2000 | 72,3 | 22,3 | 17,3 |
| 2008 | 50,8 | 22,5 | 27,7 |

Fonte: PNSB/IBGE

1.3.1.1. *Lixão*

Lixão é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos, que se caracteriza pela simples descarga do lixo sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. (IPT, 1995).

1.3.1.2 *Aterro Sanitário e Aterro Controlado*

A NBR 8.419 (ABNT, 1992) sobre a apresentação de projetos de aterros sanitários de RSU, define como aterro sanitário:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos a 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 intervalos

menores, se necessário (ABNT, NBR 8419, 1992, p.1). A (CETESB, 2014) ressalta a importância do isolamento dos contaminantes e os eventuais riscos causados por um funcionamento inadequado.

Um aterro sanitário conta necessariamente com as seguintes unidades:

- Unidades operacionais:
 - células de lixo domiciliar;
 - células de lixo hospitalar (caso o município não disponha de processo mais efetivo para dar destino final a esse tipo de lixo);
 - impermeabilização de fundo (obrigatória) e superior (opcional);
 - sistema de coleta e tratamento dos líquidos percolados (chorume);
 - sistema de coleta e queima (ou beneficiamento) do biogás;
 - sistema de drenagem e afastamento das águas pluviais;
 - sistemas de monitoramento ambiental, topográfico e geotécnico;
 - pátio de estocagem de materiais.
- Unidades de apoio:
 - cerca e barreira vegetal;
 - estradas de acesso e de serviço;
 - balança rodoviária e sistema de controle de resíduos;
 - guarita de entrada e prédio administrativo;
 - oficina e borracharia.

A operação de um aterro deve ser precedida do processo de seleção de áreas, do licenciamento, do projeto executivo e da implantação.

O aterro sanitário deve operar de modo a fornecer proteção ao meio ambiente, evitando a contaminação das águas subterrâneas pelo chorume (líquido de elevado potencial poluidor, de cor escura e de odor desagradável, resultado da decomposição da matéria orgânica), evitando o acúmulo do biogás resultante da decomposição anaeróbia do lixo no interior do aterro. Caso isto não ocorra, o biogás pode sair do interior do aterro de forma descontrolada ou infiltrar pelo solo e atingir redes de esgotos, fossas e poços rasos, podendo causar explosões. A diferença entre um aterro controlado para um aterro sanitário é que este último precisa da coleta e tratamento do chorume, assim como da drenagem e queima do biogás.

1.3.1.3. *Implantação de Aterros Sanitários*

A localização para a implantação de um aterro sanitário (Figura 1.1) é escolhida de forma a minimizar o risco de contato de contaminantes com o lençol freático. Nos aterros sanitários os fluidos e gases contaminantes são escoados através de um sistema de drenagem, e abaixo dos resíduos há uma camada de solo altamente compactado e uma membrana impermeável de PEAD (polietileno de alta densidade) para impedir a percolação de líquidos no solo. O gás metano gerado pela decomposição dos resíduos normalmente são queimados e em alguns casos são drenados gerando energia (biogás) transformando o metano em dióxido de carbono e participando da venda de créditos de carbono.



Figura 1.1 Modelo de aterro sanitário (Bosco, M.E.G. Benvenuto, C. ABMS, 2012).

1.3.2. GEOMEMBRANA

De acordo com a *International Geosynthetic Society*, a geomembrana é uma camada polimérica, plana e impermeável, usada em contato com o solo, rocha, ou qualquer outro material geotécnico em aplicações da engenharia civil. São feitas a partir de finas camadas poliméricas contínuas, podendo também ser fabricadas a partir da impregnação de geotêxteis com asfalto, pulverização elastomérica e material betuminoso.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na norma NBR 12.553 (ABNT, 2000a) define a geomembrana como um produto bidimensional, de baixa permeabilidade, composto predominantemente por asfaltos, elastômeros ou plastômeros, utilizado para controle de fluxo e separação, nas condições de solicitação. A geomembrana é chamada “geomembrana reforçada” (GMR) quando há uma armadura de reforço incorporada ao produto, formando uma estrutura monolítica. A “geomembrana texturizada” (GMT) é aquela com acabamento superficial rugoso com a função de aumentar as características de atrito de interface.

As geomembranas são classificadas em sintéticas ou asfálticas, de acordo com o material empregado em sua fabricação. Os polímeros sintéticos são compostos químicos de elevado peso molecular. Os tipos mais comuns usados na fabricação de geomembranas sintéticas estão classificados em:

- Termoplásticos (ex.: PVC);
- Termoplásticos cristalinos: geomembranas de polietileno (ex.: PEBD - baixa densidade, PEAD - alta densidade);
- Elastômeros;
- Elastômeros termoplásticos.

As geomembranas de polietileno (PEBD e PEAD) possuem espessuras variando de 0,5 e 3,0 mm, largura usual em torno de 7 m e comprimento superior a 100 m, dependendo da espessura da lâmina. Sua contração é quase insignificante pelo fato de não conterem componentes voláteis, mas a expansão térmica é considerável, podendo chegar a formar rugas de alguns centímetros. Sua alta resistência química e mecânica a torna adequada para aplicação na impermeabilização de aterros sanitários e de resíduos industriais. A durabilidade do PEAD é alta e na maioria dos casos supera o tempo de vida da estrutura.

1.3.3. RSU (RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS)

De acordo com a NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação (ABNT, 2004a) o resíduo sólido é definido como qualquer resíduo nos estados sólido e semi-sólido que resulte de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição,

bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exija para isso soluções técnicas e economicamente inviável face à melhor tecnologia disponível.

1.3.3.1. *Classificação dos Resíduos Sólidos*

Existem várias maneiras de se classificarem os RSU, sendo os mais usados quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente, e quanto a natureza ou sua origem (IBAM, 2001).

1.3.3.1.1. Quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente

De acordo com a NBR 10.004 da ABNT, os resíduos sólidos podem ser classificados em:

Tabela 1.2 Classificação quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente.

| | |
|-----------------------------------|---|
| Classe I ou Perigosos | São aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada. |
| Classe II A ou não-inertes | São os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I – Perigosos – ou Classe II B – Inertes. |
| Classe II B ou inertes | São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma NBR 10.007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com |

água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, conforme teste de solubilização segundo a norma NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

1.2.3.1.2 Quanto à natureza ou origem

A origem é o principal elemento para a caracterização dos resíduos sólidos. Segundo este critério, os diferentes tipos de lixo (Tabela 1.3) podem ser agrupados em cinco classes (IBAM, 2001), a saber:

Tabela 1.3 Classificação quanto à natureza ou origem.

| | |
|--------------------------------------|---|
| Lixo doméstico ou residencial | São os resíduos gerados nas atividades diárias em casas, apartamentos, condomínios e demais edificações residenciais. |
| Lixo comercial | São os resíduos gerados em estabelecimentos comerciais, cujas características dependem da atividade ali desenvolvida. |
| Lixo público | São os resíduos presentes nos logradouros públicos, em geral resultantes da natureza, tais como folhas, galhadas, poeira, terra e areia, e também aqueles descartados irregular e indevidamente pela população, como entulho, bens considerados inservíveis, papéis, restos de embalagens e alimentos. |
| Lixo domiciliar especial | Grupo que compreende os entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus. Observe que os entulhos de obra, também conhecidos como resíduos da construção civil, só estão enquadrados nesta categoria por causa da grande quantidade de sua geração e pela importância que sua recuperação e reciclagem vem assumindo no cenário nacional. |
| Lixo de fontes especiais | São resíduos que, em função de suas características peculiares, passam a merecer cuidados especiais em seu |

manuseio, acondicionamento, estocagem, transporte ou
disposição final.

CAPITULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Contexto Geológico

Devido ao âmbito da pesquisa estar limitado a uma célula experimental dentro do aterro Delta-A em Campinas-SP, o conhecimento da geologia regional e local se torna inexpressivo para o desenvolvimento do projeto de pesquisa, portanto as informações sobre o contexto geológico podem ser expressas resumidamente:

Souza Filho (1986) caracteriza esta parte da região onde está localizado o Aterro Delta A como lamitos, que é individualizada na parte inferior do Subgrupo Itararé. Os termos litológicos característicos são os lamitos rítmicos na porção inferior e siltitos na porção superior. Essas rochas encontram-se assentadas sobre o embasamento cristalino, interdigitadas em sua parte inferior. As litofácies reconhecidas nessa unidade foram os lamitos maciços, lamitos acamados, os ritmitos e os siltitos.

2.2. Aplicações de métodos geofísicos em aterros sanitários

A utilização de métodos geofísicos em aterros sanitários com o objetivo de mapear plumas de contaminação tem aumentado com o passar dos anos, os órgãos estaduais e municipais estão cada vez mais interessados nos resultados obtidos pelos métodos geofísicos, dada a sua aplicação indireta e precisão nos resultados obtidos.

Em um aterro sanitário desativado no município de Caçapava do Sul - RS localizado sobre rochas metamórficas fraturadas pertencentes ao Complexo Metamórfico Vacacaí de idade Neoproterozóico foi aplicado o método de Polarização Induzida, segundo Oliveira et al, (2011). No total foram realizadas 8 linhas de caminhamento elétrico com espaçamento entre os eletrodos de 5 m e 10 níveis de investigação, o resultado permitiu evidenciar baixos valores de cargabilidade para as zonas de fraturas, com possível acúmulo de chorume e a rocha metamórfica sotoposta. Confirmando assim a aplicabilidade do método para o mapeamento de plumas de contaminação em aterros sanitários localizados sobre rochas fraturadas.

O mapeamento de pluma de contaminação no aterro sanitário de Coronel Vivida - PR feito por Stevanato et al, (2004) mostrou a aplicação de métodos elétricos sendo caminhamento elétrico (CE), polarização induzida (IP) e sondagem elétrica vertical (SEV) distribuídos em 5 linhas de CE-IP e duas de SEV, o aterro está localizado sobre basaltos da Formação Serra Geral de idade Mesozóica pertencente a Bacia do Paraná. Os resultados mostraram a definição dos limites verticais e laterais do depósito com altos valores de resistividade ($> 300 \text{ ohm.m}$) e cargabilidade superiores a 10 mV/V indicando resposta do substrato rochoso, possibilitando assim o mapeamento da pluma de contaminação (chorume) e ainda permitindo a caracterização de zonas de fraturas nos basaltos.

Lago et al, (2006) utilizou métodos geofísicos (eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo) com a finalidade de avaliar o potencial de integração dos métodos na caracterização geoambiental do aterro sanitário da cidade de Bauru-SP. No método do potencial espontâneo (SP) foram realizadas 5 linhas com espaçamento de 20 metros e o resultado permitiu detectar o sentido do fluxo subterrâneo. Nos métodos da eletrorresistividade (Caminhamento elétrico e Sondagem elétrica Vertical) e polarização induzida (IP) foram realizadas 5 linhas com espaçamento entre eletrodos de 10 metros e 5 níveis de investigação de CE e IP e 9 SEV com espaçamento AB de 150 metros e os resultados permitiram identificar anomalias dentro da zona saturada, que caracterizaram a presença da contaminação gerada pela migração do percolado proveniente da disposição dos resíduos sólidos. Concentrações anômalas de metais pesados e alterações de valores de alguns parâmetros físico-químicos foram observadas nos locais indicados pelos resultados geofísicos, evidenciando a importância do uso de geofísica em programas de caracterização geoambiental.

No aterro sanitário de Cuiabá-MT Laureano e Shiraiwa, (2008) desenvolveram o mapeamento da condutividade elétrica utilizando o método eletromagnético indutivo (EM-34) e o radar de penetração no solo (GPR). Parte do aterro e as lagoas de tratamento de chorume não possuem impermeabilização de base, facilitando assim a formação de uma pluma de contaminação no subsolo. Sendo assim, o objetivo proposto por este trabalho foi identificar a existência dessa pluma. A área estudada se situa nos domínios geológicos do Grupo Cuiabá, pertencente a Faixa Interna de Dobramentos Paraguai. Obteve-se resultados elevados de condutividade em profundidades teóricas de até 60 m, mas a zona que apresentou

as maiores condutividades está na faixa dos 30 m de profundidade. Foi possível observar também como o resultado de cada método influenciou no trabalho, com o método GPR foi observado o início da contaminação e com o método EM-34 observou-se a continuidade da pluma de contaminação no perfil investigado.

Um modelo conceitual para depósitos de resíduos sólidos urbanos antigos ou abandonados foi desenvolvido por Meju, (2000). Utilizando três principais características: a complexa geometria dos sítios de aterros, composição heterogênea dos materiais e os processos biogeomorfológicos complexos em condições ambientais severas. O modelo integra conceitos multidisciplinares consistentes em geotecnia, geomicrobiologia, geoquímica e intemperismo de rochas mantendo um esforço para desenvolver um esquema conjunto para estudos geotécnicos e ambientais empregando métodos elétricos e eletromagnéticos.

As anomalias de cargabilidade encontradas por Moreira e Braga, (2009) no mapeamento de uma pluma de contaminação em um aterro de resíduos sólidos domiciliares do tipo vala em Cordeirópolis - SP, utilizando dados de polarização induzida podem indicar segundo os autores, zonas enriquecidas em elementos metálicos presentes nos resíduos. Já o decréscimo constante de cargabilidade a jusante de onde estão enterrados os resíduos pode ser indicativo de contaminação além dos limites da área do aterro. O estudo também mostrou algumas limitações do método quando aplicado na caracterização de áreas contaminadas.

As aplicações dos métodos geofísicos relacionados nessa revisão bibliográfica possuem como característica apresentarem componentes físicos e resultados distintos, que interpretados em conjunto agregam valor e auxiliam nas tomadas de decisões.

No estudo de caso do canal de Marozzo, Itália realizado por Abu-Zeid et al, (2003) os autores estabelecem uma correlação entre cargas de metais pesados, encontrados em lixiviados de aterros municipais abandonados e uma forte resposta de polarização induzida (IP) em aterros situados em ambientes de água salobra. A alta resistividade abaixo da superfície do aterro está associada com materiais de cobertura compostos basicamente por areias siltosas. Já os valores de baixa resistividade correspondem tanto a sedimentos saturados com solução salina quanto a corpos condutivos (chorume). As cargas de metais pesados dispersas como partículas suspensa explicam as anomalias de IP, causando o efeito de polarização de eletrodo. A pesquisa sugere também que a aplicação de métodos geoeletricos

pode ser utilizada como uma ferramenta importante na delimitação plumas de contaminação.

Johansson et al, (2007) realizaram campanha geofísica em um aterro abandonado em Ekeboda, Suécia onde compararam dados de inversões 2D e 3D de resistividade e verificaram a relevância das aplicações dos métodos de IP e resistividade para o mapeamento de plumas de contaminação em aterros. Com os resultados os autores chegaram a conclusão que as inversões 3D geralmente lidam melhor com variações na subsuperfície do que as inversões 2D e que o método IP é melhor para delimitar a camada de cobertura e os limites horizontais, já o método da resistividade distingue melhor materiais com características distintas.

CAPITULO 3. ÁREA DE ESTUDO

3.1 Descrição da área de estudo

A área de estudo está localizada em uma célula experimental dentro do aterro sanitário Delta-A no município de Campinas-SP, distante cerca de 20 km do centro urbano e próximo à Rodovia Bandeirantes. A via de acesso se dá pela estrada vicinal que continua da Av. John Boyd Dunlop (Figura 3.1). O aterro Delta A recebe todo o resíduo sólido urbano do município de Campinas e já teve o seu tempo de uso prorrogado diversas vezes.

Esta célula experimental foi confeccionada para estudos de geomecânica dos resíduos sólidos urbanos e geoambientais por pesquisadores da UNICAMP. Embora tenha sido instalada de acordo com os preceitos vigentes da engenharia de aterros, seu funcionamento não ocorre de maneira adequada. Dos cinco pontos onde há controle do fluxo de chorume, dois apresentam um fluxo baixo, indicando um possível problema na drenagem gerando assim bolsões de chorume. Desta maneira, este trabalho, além de estudar a resposta dos resíduos e de como os métodos geolétricos identificam a geomembrana, também investiga a presença desses bolsões.

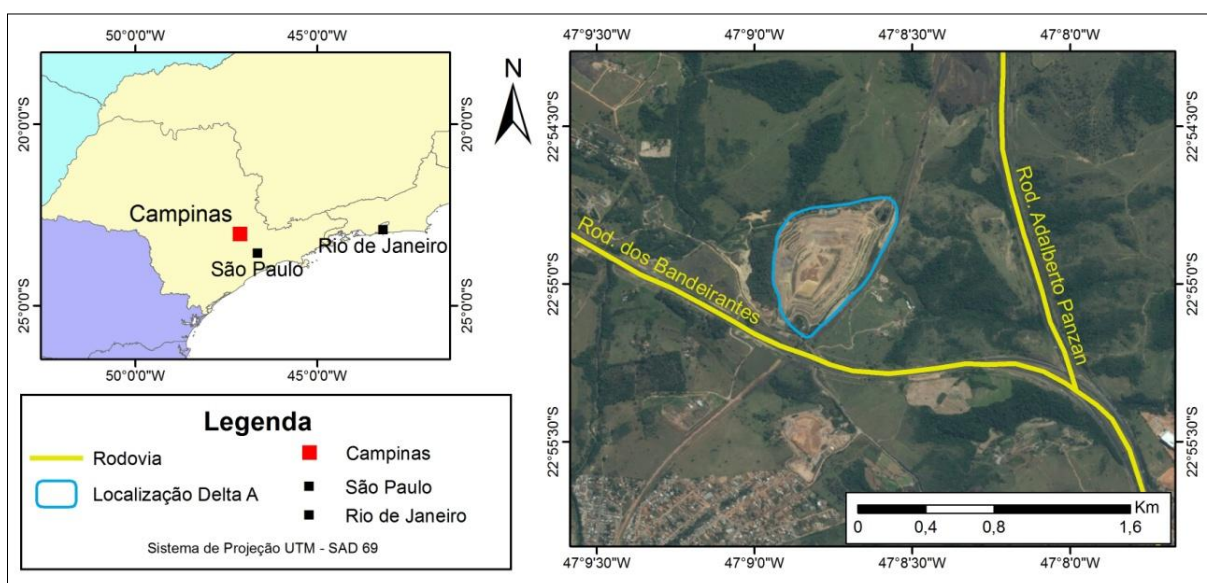


Figura 3.1 Localização do aterro sanitário Delta A e respectivas vias de acesso.

3.2 Instalação da Célula Experimental

A instalação da célula experimental no aterro Delta A foi realizada por Benatti et al, 2013. Esta localiza-se no topo do maciço do aterro Delta A, na cota 630 m, ocupando uma área de 5.080 m², foi projetada para receber resíduos sólidos domiciliares e residenciais, enquadrados nas categorias de resíduos Classe II-A e II-B (Figura 3.2). O empreendimento tem uma capacidade volumétrica total para disposição de resíduos de aproximadamente 15.000 m³, sendo o tempo de preenchimento de 20 dias. O sistema de impermeabilização de base da célula experimental foi composto por uma camada de solo compactado com 50 cm de espessura, geomembrana de PEAD e geotêxtil não tecido.

Uma geomembrana de PEAD de 1,5 mm de espessura foi instalada sobre a camada de solo compactado (Figura 3.3). Sobre a geomembrana foi instalado geotêxtil não tecido (300 g/m²) com a finalidade de proteção mecânica da geomembrana. Sobre o geotêxtil, foi disposta uma camada de silte areno-siltoso com 10 cm de espessura, com a finalidade de proteção termo-mecânica dos geossintéticos.

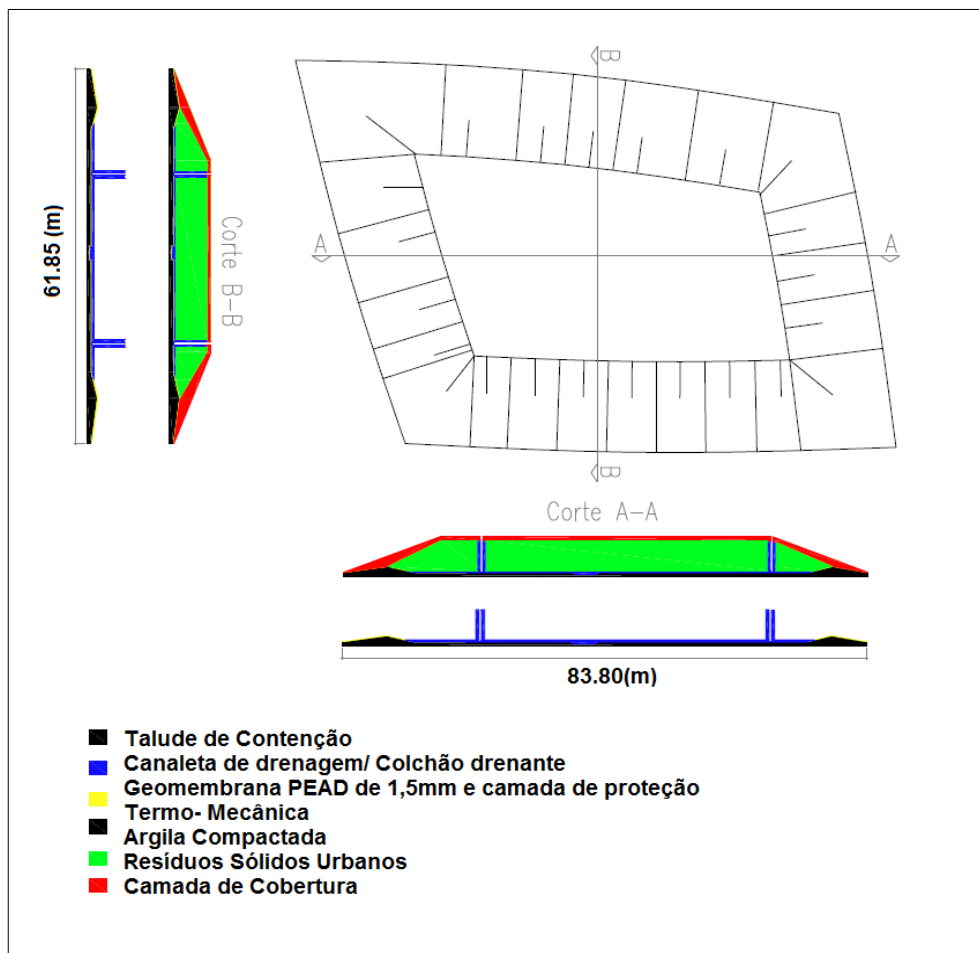


Figura 3.2 Célula experimental implantada no aterro Delta A.



Figura 3.3 Instalação da camada de geomembrana no início da instalação da célula experimental.

O sistema de drenagem de lixiviado foi executado com uma camada de brita 4 ou rachão de 30,0 cm de espessura, disposta sobre toda a base da célula, incluindo a canaleta central, com 30 cm de profundidade e 2 m de largura. Nessa etapa foi também executada a caixa de medição de vazão de lixiviado. A Figura 3.4 mostra a etapa final de instalação da camada drenante.



Figura 3.4 Sistema de drenagem finalizada.

O sistema de drenagem de gás foi construído com 5 drenos com seção circular e diâmetro de 1,5 m, com telas com malha de 10 cm x 10 cm soldadas e arame de 4,2 mm. Cada cilindro de tela foi preenchido com rachão e tem em seu centro um tubo dreno (30 cm de diâmetro) de concreto perfurado em toda a sua parede. Foram então instalados no interior dos tubos piezômetros e placas de recalque, além de um sistema de coleta de gases, capaz de coletar o gás produzido nos cinco drenos e direcioná-lo para um único ponto, onde deverá ser instalado um equipamento para a medição da vazão de gás. Cerca de um mês antes do início da disposição dos resíduos na célula experimental, foi iniciada uma campanha de caracterização gravimétrica dos RSU.

Foram realizados 22 ensaios de caracterização gravimétrica, totalizando 5.500 kg de RSU caracterizado. A célula experimental teve sua operação de preenchimento realizada apenas no turno diurno. Essa escolha foi feita com o objetivo de evitar choques dos tratores esteira com os drenos verticais de gás, que

são mais comuns no período noturno devido à menor visibilidade. Para o preenchimento, foram utilizados apenas os caminhões da coleta domiciliar. Durante a operação, trabalharam na célula 2 tratores esteira tipo D-6 e cerca de 3 apontadores, que auxiliavam na abertura dos caminhões. A Figura 3.5 mostra a etapa de compactação do RSU no interior da célula.



Figura 3.5 Compactação do RSU no interior da célula experimental

A camada de cobertura foi constituída de uma camada de solo compactado, com 50 cm de espessura. Foi utilizado o mesmo solo da camada de base, oriundo de uma jazida localizada dentro da área do aterro sanitário Delta A. A Figura 3.6 amostra a etapa final de construção da célula, durante a execução da camada de cobertura. Após a finalização desta camada, foram instalados 40 marcos superficiais distribuídos sobre a célula.



Figura 3.6 Visão do topo da célula experimental com os piezômetros instalados.

CAPITULO 4. METODOLOGIA

4.1. Métodos Geofísicos

Os métodos geofísicos de prospecção estão baseados nas medidas dos parâmetros físicos (resistividade, condutividade, velocidade de onda) e estão divididos em quatro grandes grupos: Métodos Geoelétricos, Sísmicos, Potenciais e Geotérmicos (Braga, 1999). Dentre estes, serão destacados os Métodos Geoelétricos, estes métodos são denominados não invasivos, pois não afetam e não destroem o terreno ou camadas selantes e são bastante utilizados de forma muito eficiente em estudos ambientais (Atekwana et al., 2000; Sauck, 2000; Sauck et al., 1998; Stanton & Schrader, 2001; Soupios et al, 2007), inclusive na caracterização de contaminação em aterros (Frid et al., 2008). Nesse trabalho foram utilizados os métodos da eletrorresistividade, polarização induzida e eletromagnético indutivo, especificados a seguir.

4.2. ELETORRESISTIVIDADE

Os métodos elétricos utilizam correntes diretas ou correntes alternadas de baixa frequência para investigar as propriedades elétricas de subsuperfície (Figura 4.1). O método da eletrorresistividade é usado no estudo de discontinuidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo e também na detecção de corpos tridimensionais de condutividade elétrica anômala (Kearey et al., 2009).

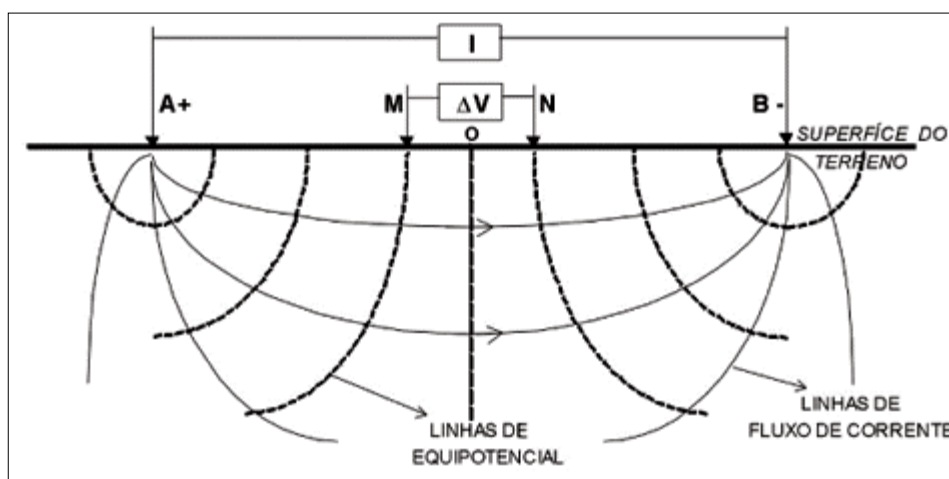


Figura 4.1 Esquema de campo para a determinação da resistividade (Braga, 2006)

Entretanto, no meio geológico (meio heterogêneo) todo esse processo acontece de maneira bem mais complexa (Figura 4.2), pois mecanismos de propagação de corrente elétrica influenciam os valores de resistividade por estarem diretamente ligados ao comportamento dos materiais geológicos. Sendo assim, os mecanismos principais de propagação de corrente elétrica são denominados de condutividade eletrônica e iônica.

- Condutividade eletrônica: acontece durante o transporte de elétrons na matriz das rochas, e neste caso a resistividade é afetada pela maneira na qual os minerais se encontram agregados e também pelo grau de impurezas. Assim, os materiais responsáveis fundamentalmente por esse tipo de condução são os metais e os semicondutores.
- Condutividade iônica: ocorre pelo deslocamento de íons existentes nos poros e nas fissuras das rochas, devido à presença de eletrólito (água + íons). Normalmente, é este tipo de propagação que ocorre no meio geológico, pelo fato de que as rochas sempre apresentam poros e fluidos em quantidades variadas.

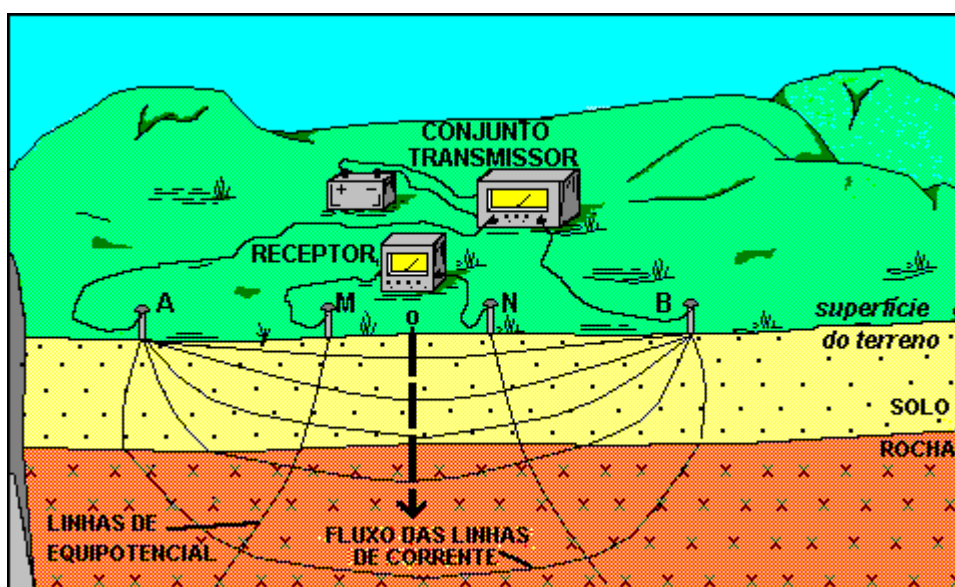


Figura 4.2 Modelo de meio heterogêneo e esquema de quatro eletrodos para medidas de eletrorresistividade (Braga, 1999)

Sendo assim, neste método as investigações elétricas são realizadas injetando uma corrente elétrica artificial no subsolo através de dois eletrodos, denominados eletrodos de corrente A e B. A separação dos eletrodos de corrente deve ser escolhida de forma que o solo seja energizado até a profundidade

requerida e deve ser pelo menos igual à sua profundidade. Estes eletrodos são utilizados para medir o potencial gerado por outros eletrodos, chamados eletrodos de potencial M e N. Conhecendo esta disposição de eletrodos (distância entre eles) é possível calcular a resistividade aparente das camadas no interior da Terra, a partir da equação:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (4.1)$$

Na equação 4.1 ρ representa a resistividade elétrica em ohm.m, K é o fator geométrico que depende da disposição do arranjo de eletrodos, ΔV é a diferença de potencial entre os eletrodos M e N e I é a intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B. O fator K depende da geometria do arranjo de eletrodos na superfície e pode ser calculado pela equação:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM}\right) + \left(\frac{1}{BN}\right)} \quad (4.2)$$

A resistividade é uma das propriedades físicas mais variáveis (Figura 4.3). Certos minerais, como metais nativos e a grafita, conduzem eletricidade via a passagem de elétrons. A maior parte dos minerais formadores de rochas é, entretanto, isolante e a corrente elétrica é conduzida através de uma rocha principalmente pela passagem de íons nas águas dos poros. Assim, a maior parte das rochas conduz a eletricidade por processos eletrolíticos mais que por processos eletrônicos. O parâmetro da resistividade elétrica é o inverso da condutividade elétrica e reflete a dificuldade encontrada pela corrente elétrica em se propagar num meio. Portanto, a porosidade e a permeabilidade são os principais controles da resistividade das rochas, e a resistividade geralmente aumenta com sua diminuição.

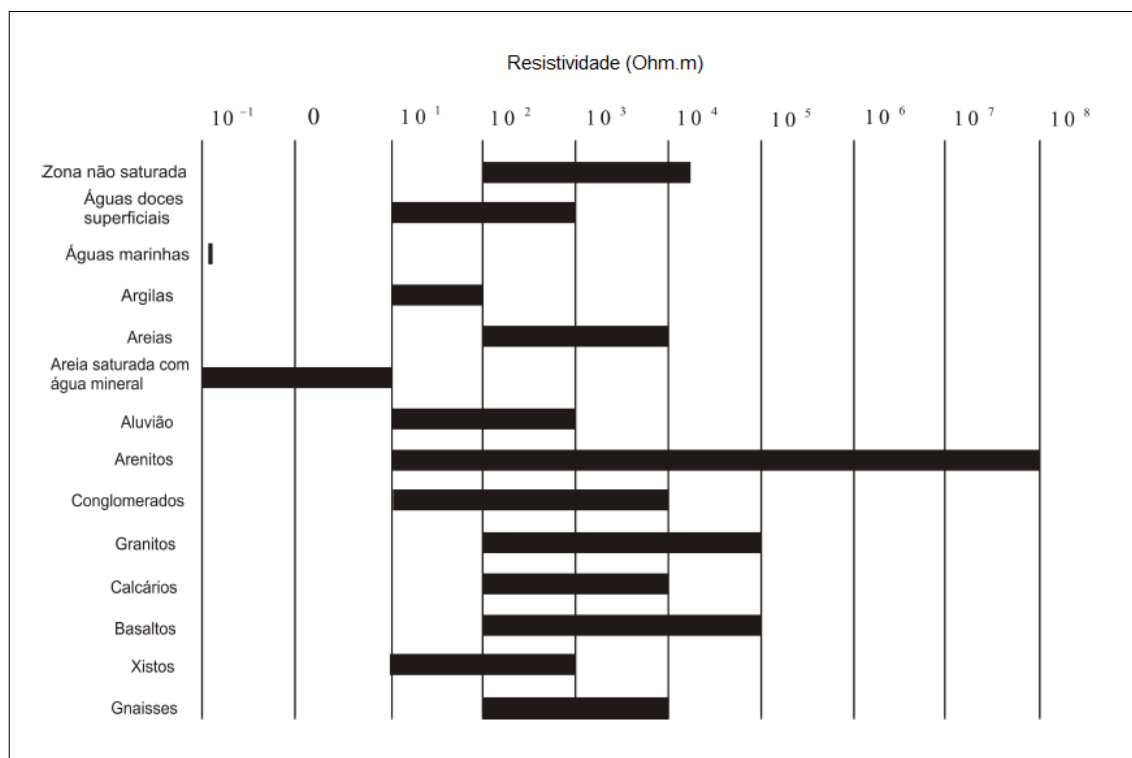


Figura 4.3 Valores de resistividades elétricas de rochas e materiais conhecidos (modificado de Ustra, 2008).

O método da eletrorresistividade permite várias técnicas para a execução dos ensaios geofísicos. São elas as técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico (CE), dentro das quais existe uma grande variedade de configurações possíveis de eletrodos, o que confere ao método grande versatilidade. Com os dados obtidos através das SEVs é possível investigar o subsolo verticalmente. Já quando o objetivo é observar a variação lateral de resistividade é utilizado o CE e com os dados deste é possível imagear o subsolo em profundidade e lateralmente (imageamento 2D). Com uma série de perfis perpendiculares e transversais é possível realizar uma interpretação 3D.

Os instrumentos de levantamento de resistividade são projetados para medir a resistência do solo, ou seja, a razão ($\Delta V/I$), com uma precisão muito alta. Eles devem ser capazes de medir níveis de resistência muito baixos comumente encontrados em levantamentos de resistividade. Os valores de resistividade aparente são calculados a partir das medidas de resistência usando-se a fórmula relevante para a configuração de eletrodos em uso.

Os instrumentos modernos têm circuitos eletrônicos controlados por microprocessador que realizam operações internamente, como o cálculo das médias de resistividade e, além disso, executam verificações no circuito antes de mostrar o

resultado. Na Figura 4.4 está o resistivímetro utilizado em campo para execução do método da eletrorresistividade.

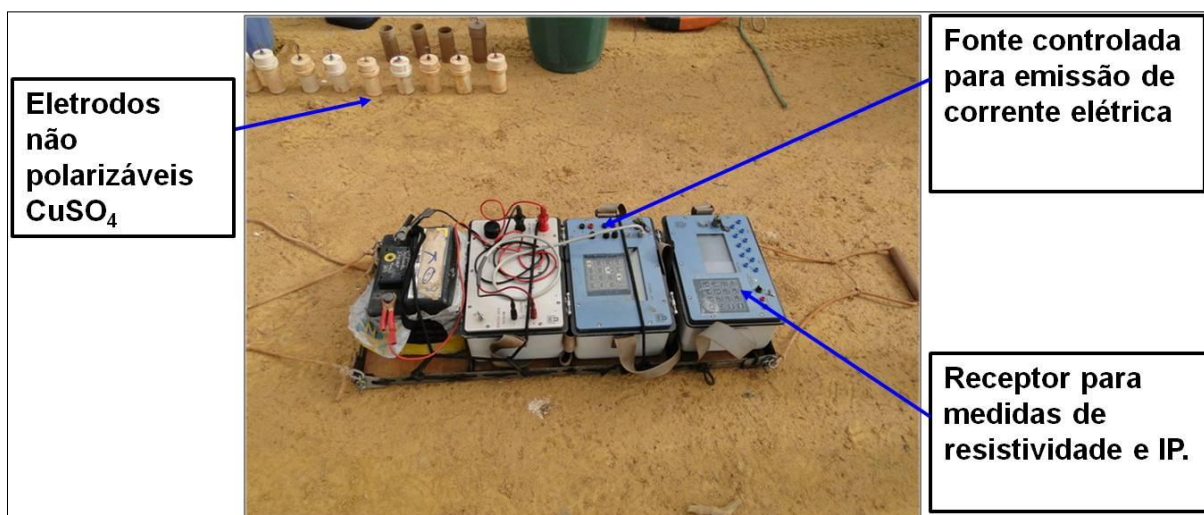


Figura 4.4 Resistivímetro Íris modelo Syscal R2 Plus, receptor modelo Syscal Elrec Pro, bateria 12V e eletrodos não polarizáveis.

4.2.1. TÉCNICA DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO

A técnica de caminhamento elétrico consiste em obter a variação lateral de resistividade a profundidades aproximadamente constantes. Isso é obtido fixando-se um espaçamento de eletrodos e caminhando-se com os mesmos ao longo de perfis efetuando as medidas de resistividade aparente.

O caminhamento elétrico é aplicado em casos onde é importante a observação de variações laterais de resistividade, como por exemplo, na detecção de contatos geológicos laterais ou inclinados, mudanças laterais de fácies ou estruturas, como falhas e fraturas, além da avaliação de contaminação de aquíferos a partir de fontes poluidoras, prospecção de aquíferos em meio fissurado, prospecção de areia e cascalho, e aplicações na prospecção de sulfetos (Elis, 1998).

4.2.2. ARRANJOS DE ELETRODOS

Existem várias formas de obtenção dos valores de resistividade elétrica, cada uma correspondendo a um ou mais tipos de arranjos elétricos (distribuição dos eletrodos na superfície do terreno). Os objetivos da pesquisa determinam o melhor arranjo ou distribuição de eletrodos a ser executado.

Adotou-se o arranjo dipolo-dipolo para aquisição dos dados de eletrorresistividade. Este arranjo é caracterizado por apresentar espaçamentos entre os centros dos dipolos (AB e MN), variável ao longo da linha levantada, sendo para cada nível de investigação (profundidade teórica) adota-se um determinado espaçamento dipolar superficial. Outras particularidades do arranjo dipolo-dipolo são as distâncias entre os eletrodos de corrente A e B serem iguais as dos eletrodos de potenciais M e N (Elis, 1998).

Normalmente, as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação, isto é $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , atribuídas na intersecção das linhas que partem do centro de AB e MN com ângulos de 45° (Figura 4.5). A cada ponto de medida os dipolos são deslocados de uma distância igual a X . Os dados obtidos são plotados nas posições $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , e interpolados, gerando uma pseudoseção de resistividade aparente, como ilustrado na Figura 4.6. O fator geométrico K para o arranjo dipolo-dipolo pode ser calculado pela fórmula:

$$K = 2\pi \cdot G \cdot X, \quad (4.3), \text{ onde}$$

$$G = 1 / [(1/n) - (2/n+1) + (1/n+2)]$$

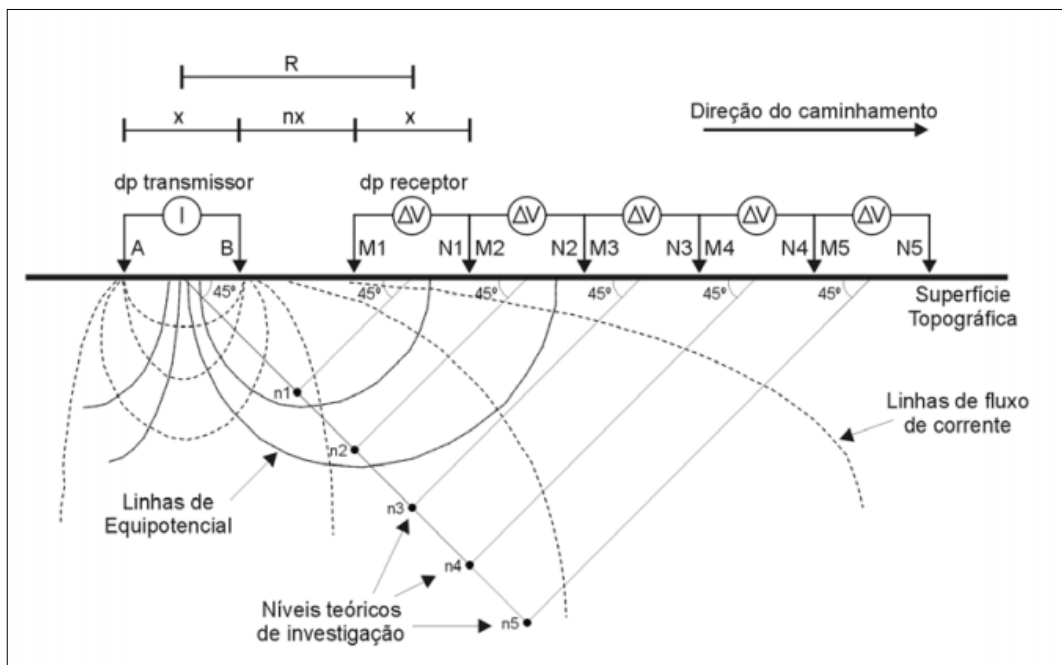


Figura 4.5 Esquema de arranjo dipolo-dipolo utilizado em caminhamentos elétricos (Elis, 1998).

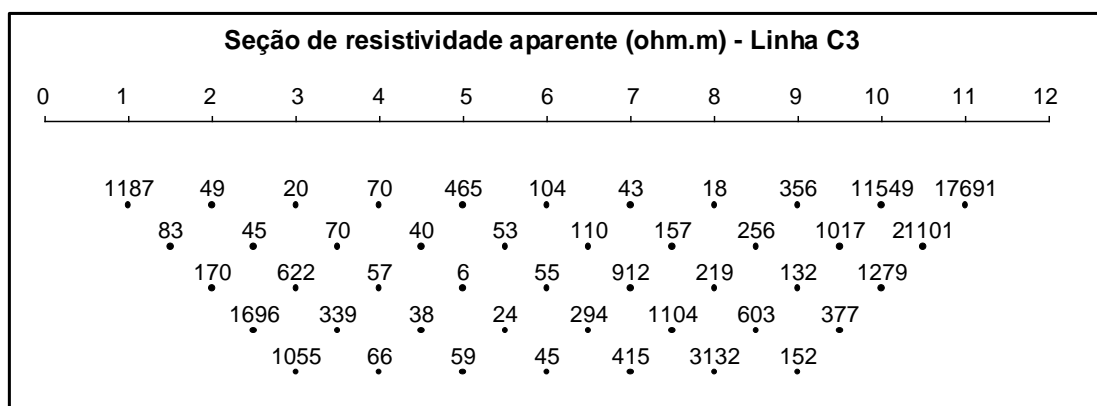


Figura 4.6 Forma de plotagem dos dados para construção da seção de resistividade aparente (Elis, 1998).

4.3. POLARIZAÇÃO INDUZIDA

A descrição da metodologia para o método da polarização induzida encontra-se em Elis (1998) como está a seguir:

A polarização induzida é um fenômeno elétrico estimulado por corrente elétrica observado como resposta retardada à voltagem estabelecida, em materiais naturais (Sumner, 1976). Os corpos que são atravessados por uma corrente elétrica, quando esta corrente é cortada, o campo elétrico não se estabelece e não desaparece imediatamente e sim assintoticamente. Esta é a chamada polarização induzida ou residual.

O fenômeno se observa quando se faz passar corrente elétrica através de um eletrólito que contém corpos ou partículas que possuem condutividade eletrônica (metais, semicondutores). Por exemplo, aplicando uma corrente constante de intensidade (I) durante algum tempo (milissegundos e segundos, por exemplo), através de um circuito de emissão (AB), a um local onde existe um corpo de mineral condutor, se em seguida corta-se a corrente, a diferença de potencial (ΔV) entre M e N não desaparece bruscamente, mas é atenuada gradualmente com uma constante de tempo de várias dezenas de segundos (Orellana, 1972). Efeito análogo se observa no estabelecimento da corrente, de forma que a variação de ΔV entre M e N pode ser representada por uma curva como a da Figura 4.7.

4.3.1. FONTES DOS EFEITOS DE IP

Durante o tempo do fluxo original de corrente, presumivelmente algum armazenamento de energia ocorre no material. Embora esta energia armazenada possa existir em várias formas, por exemplo, mecânica, elétrica e química, estudos em laboratório de polarização induzida em vários tipos de rochas estabeleceram que a energia química é, de longe, a mais importante.

Este armazenamento de energia química é o resultado de: a) variações na mobilidade de íons fluindo através da estrutura da rocha; e b) variações entre condutividade iônica e eletrônica onde minerais metálicos estão presentes. O primeiro destes efeitos é conhecido como polarização de membrana ou eletrolítica e constitui o padrão, ou então chamado efeito IP normal. O segundo é conhecido como polarização de eletrodo ou sobrevoltagem. É geralmente maior em magnitude que o IP normal e depende da presença de minerais metálicos na rocha. Os dois efeitos são indistinguíveis pelas medições de IP. Eles parecem ser independentes da estrutura molecular ou atômica em rochas ou minerais, isto é, IP é um efeito total.

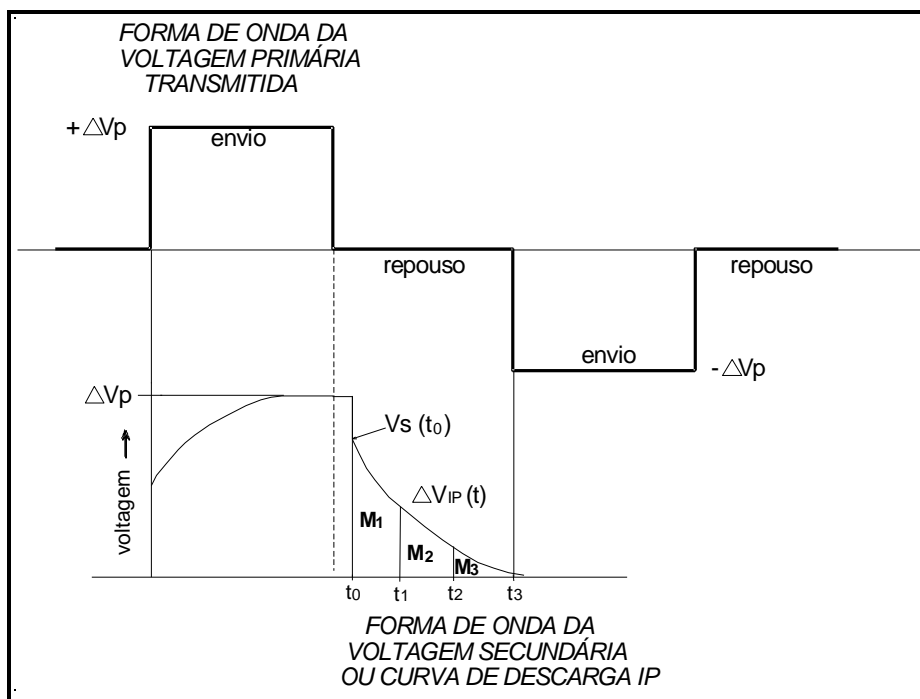


Figura 4.7 Variação de ΔV com o tempo. A linha pontilhada vertical indica o momento em que se corta a corrente e começa a descarga (Braga, 1997).

4.3.2. POLARIZAÇÃO DE MEMBRANA

No efeito de polarização de membrana a condução eletrolítica é o fator predominante, sendo a única forma de condução onde metais não estão presentes e a frequência é baixa. Portanto, a estrutura rochosa deve ser um tanto porosa para permitir o fluxo de corrente quando minerais metálicos estão ausentes. A maioria dos minerais (em especial as argilas) tem uma rede de cargas negativas na interface entre sua superfície e o fluido do poro. Conseqüentemente, cargas positivas são atraídas e negativas repelidas dessa interface; em alguns casos, essa concentração de íons positivos pode estender-se dentro da zona de fluido a uma distância igual a largura do próprio poro, e ao se passar uma corrente contínua através dessa zona, os íons negativos irão acumular-se em uma extremidade e deixar a outra, formando uma nuvem difusa de cátions, denominada de camada dupla (Figura 4.8b). Como resultado dessa distribuição polarizada, o fluxo de corrente é impedido. Posteriormente, quando a corrente é cortada, os íons retornam às suas posições originais, levando um intervalo de tempo finito para isso (Telford et al, 1990).

O efeito IP de membrana é mais pronunciado na presença de minerais de argila, nos quais os poros são particularmente pequenos. A magnitude da

polarização, no entanto, não cresce de forma constante com a concentração de minerais de argila, mas atinge um máximo e então começa a decrescer. Concentrações ótimas variam em diferentes tipos de argilas, e o efeito de membrana também aumenta com a salinidade do fluido dos poros.

Como resultado desses fatores, a polarização de membrana é geralmente máxima em rochas contendo minerais argilosos dispersos em uma matriz com uma concentração relativamente menor ($\leq 10\%$ do total da rocha) e nas quais o eletrólito tem alguma salinidade.

Outras fontes de polarização padrão incluem efeitos dielétricos e eletrocinéticos normais, presença de minerais condutores em quantidades muito pequenas, e possível condução superficial em material normalmente não condutor. Entre essas fontes, a resposta eletrocinética devido a variações nas seções dos poros, afetando o fluxo de fluido, é provavelmente mais significativa que as outras. Nenhuma dessas fontes, no entanto, é comparável em magnitude à polarização de membrana.

4.3.3. Polarização de Eletrodo

Este tipo, similar em princípio à polarização de membrana, existe quando minerais metálicos estão presentes na rocha e o fluxo de corrente é parcialmente eletrônico, parcialmente eletrolítico. Uma reação química ocorre na interface entre o mineral e a solução.

A Figura 4.8c (Telford et al, 1990) mostra duas passagens porosas. Na superior o fluxo de corrente é totalmente eletrolítico. Na inferior, a presença de um mineral metálico, tendo redes de cargas superficiais de sinais opostos em cada face, resulta em uma acumulação de íons no eletrólito adjacente a cada uma. A ação é de eletrólise, quando a corrente flui e ocorre uma troca de elétrons entre o metal e a solução iônica na interface; em físico-química, esse efeito é conhecido como sobrevoltagem (overvoltage).

Devido a velocidade do fluxo de corrente no eletrólito ser muito menor que no metal, o acúmulo de íons é mantido pela voltagem externa. Quando a corrente é interrompida, a voltagem residual decai com os íons difusos voltando ao seu estágio de equilíbrio original.

Minerais que são condutores eletrônicos exibem polarização de eletrodo. Isso inclui quase todos os sulfetos (exceto a esfalerita e possivelmente cinábrio e estibinita), alguns óxidos como magnetita, ilmenita, pirolusita, cassiterita, e também a grafita.

A magnitude da polarização de eletrodo depende da fonte de corrente externa e de um número de características do meio geológico. Ela varia diretamente com a concentração mineral, mas devido ao fato de ser um fenômeno de superfície, deve ser maior quando um mineral ocorre de forma disseminada do que quando é maciço. Porém a situação não é tão simples como descrito acima. O tamanho ótimo da partícula depende da porosidade da rocha hospedeira e sua resistividade. Além disso, os então denominados sulfetos maciços são geralmente heterogêneos, sendo intercamados com rocha hospedeira de menor condutividade. Entretanto, o fato de que mineralização disseminada oferece boa resposta IP é a característica mais importante, porque outros métodos elétricos não trabalham muito bem nessas circunstâncias.

4.3.4. PROCESSOS DE MEDIDAS DE IP

Em um tipo de detector IP o decaimento da voltagem é medido como uma curva em função do tempo em vários intervalos. Este procedimento é denominado de IP domínio do tempo. Devido ao tempo ser também finito, a impedância varia com a frequência, decrescendo com o aumento desta. Então medições de ρ_a em duas ou mais frequências, geralmente abaixo de 10 Hz, constitui outro método de detecção, denominado de IP domínio da frequência.

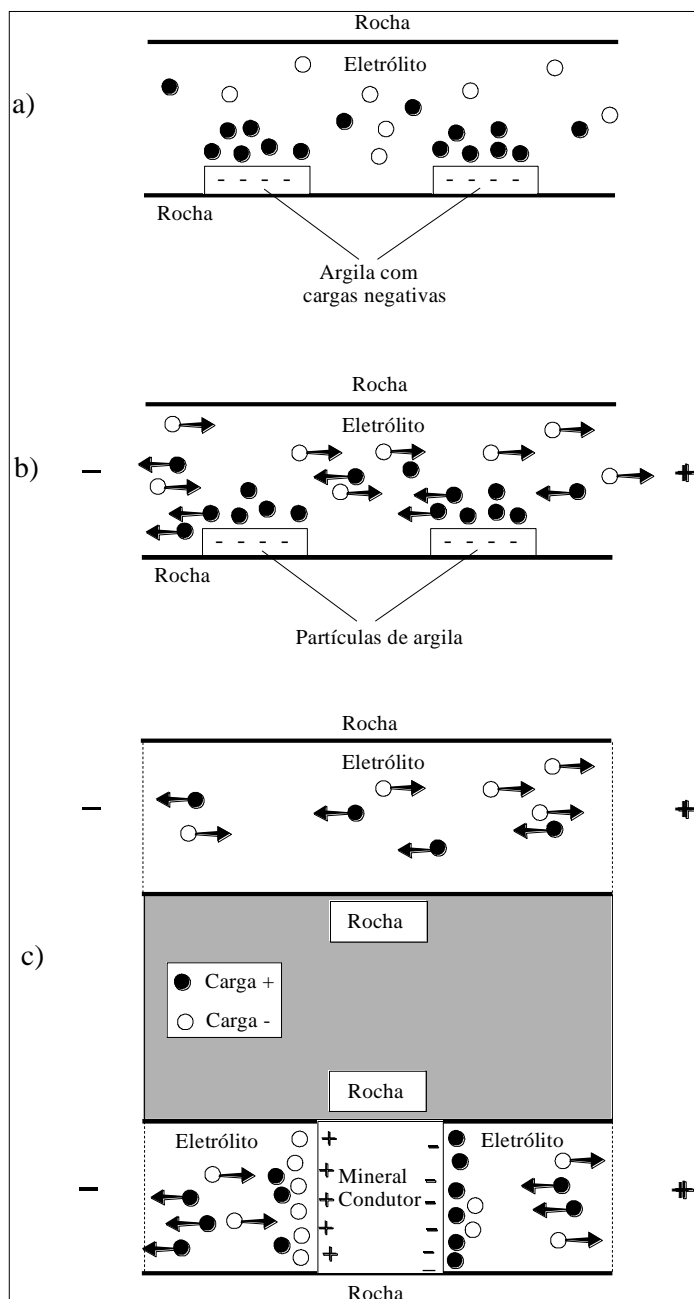


Figura 4.8 Efeitos de polarização de membrana e eletrodo. a) Distribuição normal de íons em arenito poroso; b) Polarização de membrana em arenito poroso devido à aplicação de tensão em corrente contínua; c) Fluxo eletrolítico no poro superior e polarização de eletrodo no poro inferior. (modificado de Telford et al, 1990).

4.3.4.1. Parâmetros Utilizados para Medidas de IP no Domínio do Tempo Milivolts por Volt

A forma mais simples de medir o efeito IP com o equipamento domínio do tempo é comparar a tensão residual ($\Delta V_{IP}(t)$) existente em um tempo (t) após o corte da corrente, com a tensão inicial (ΔV_P) emitida durante o intervalo de fluxo de

corrente. A voltagem residual ($\Delta V_{IP}(t)$) deve ser medida antes que tenha decaído ao nível do ruído.

Devido ao fato de $\Delta V_{IP}(t)$ ser muito menor que ΔV_P , a relação $\Delta V_{IP}(t)/\Delta V_P$ é expressa como milivolt por volt, ou como uma porcentagem. O intervalo de tempo t deve variar entre 0.1 e 10 s.

Cargabilidade (M)

A cargabilidade é definida pela integração da curva de descarga durante um intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$, e é fornecida por:

$$M = \frac{1}{\Delta V_P} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_{IP}(t) dt \quad (4.4)$$

É o parâmetro mais comumente usado em IP domínio do tempo. Quando $\Delta V_{IP}(t)$ e ΔV_P têm as mesmas unidades, a cargabilidade (M) pode ser medida em milissegundos.

4.3.5. INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE ER E IP

4.3.5.1. *Interpretação Qualitativa*

A interpretação de dados geofísicos pode ser realizada de forma qualitativa e quantitativa. A interpretação qualitativa 2D (que não é diferente para 1D) para os métodos da eletrorresistividade e o método IP tem como objetivo identificar, diferenciar e delimitar zonas anômalas em dados de resistividade elétrica e cargabilidade aparentes.

Geralmente os resultados obtidos através desses métodos são plotados graficamente e levam a denominação de “pseudoseção” de resistividade elétrica aparente e/ou cargabilidade aparente. Nessa técnica, proposta por Hallof (1957, apud Griffiths & Barker, 1994), cada ponto investigado na subsuperfície possui uma posição e profundidade teórica específica, de acordo com o espaçamento entre eletrodos e o arranjo de eletrodos utilizado.

A utilização da interpretação qualitativa através de pseudoseções pode ocasionar interpretações ambíguas, pois não reflete a distribuição de resistividade elétrica ou cargabilidade verdadeira e nem a profundidade real do meio investigado. Para este tipo de interpretação é imprescindível o uso da integração de informações diretas para diminuir as ambiguidades geofísicas (Minozzo, 2009).

4.3.5.2. *Interpretação Quantitativa*

A técnica de interpretação quantitativa de pseudoseções de resistividade objetiva obter um modelo de distribuição dos parâmetros medidos em subsuperfície similares aos valores medidos em campo, e gera modelos 2D da subsuperfície terrestre com uma melhor resolução espacial, melhor definição da geometria do alvo e maior precisão quanto à profundidade investigada, quando comparada com a interpretação qualitativa (Minozzo, 2009). Através de técnicas numéricas com o método da inversão, o programa formula, a partir dos dados de campo, um modelo que mais se aproxime dos dados reais.

Os dados de campo são comparados com a pseudo-seção sintética resultante da simulação feita pelo programa e o modelo é considerado satisfatório quanto menores forem as diferenças entre as pseudo-seções de campo e sintética (Loke, 1999). De acordo com Loke (2000), para se determinar a distribuição em subsuperfície de resistividade elétrica verdadeira se utiliza a técnica de inversão, que atualmente está implementada nos programas computacionais específicos permitindo um processamento relativamente rápido de uma grande quantidade de dados. A Figura 4.9 ilustra a rotina básica de um algoritmo de inversão para dados de resistividade elétrica (Fachin, 2007).

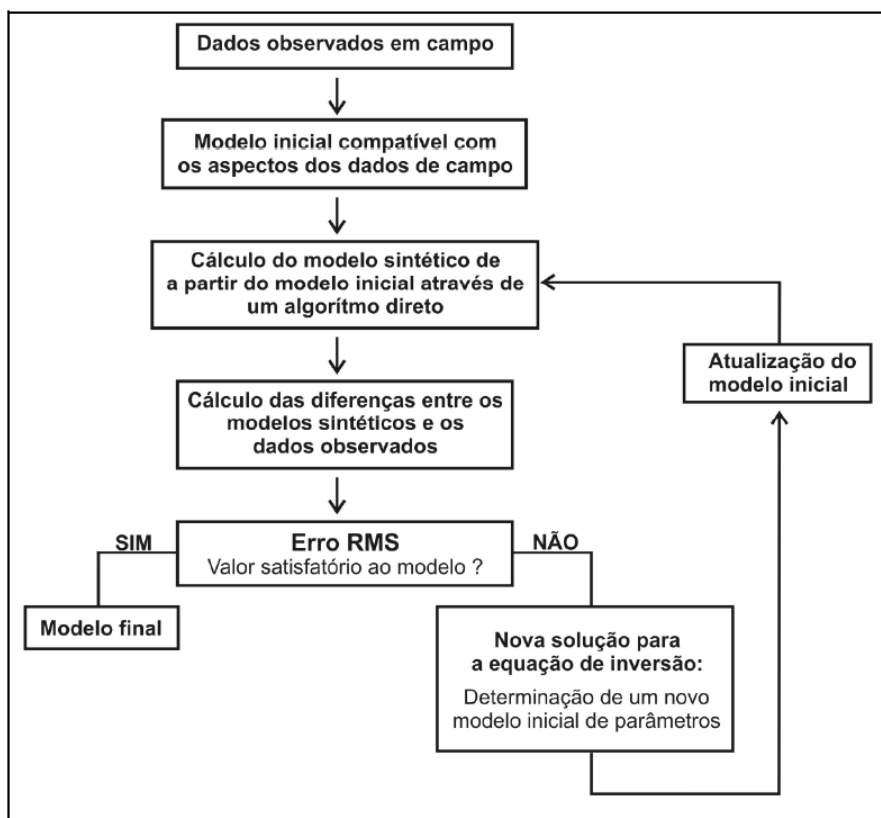


Figura 4.9 Rotina básica de inversão de dados de resistividade elétrica (Fachin, 2007).

De acordo com Olayinka & Yaramanci (2000), os dois tipos de inversão mais utilizados na interpretação de dados de eletrorresistividade e IP são a inversão por suavização (*smooth inversion*) e a inversão por blocos ou polígonos (*block inversion*). O *software* de inversão 2D de dados de resistividade elétrica e cargabilidade RES2DINV faz uso do método da inversão por suavização utilizando o método matemático dos mínimos quadrados (*smoothness-constrained least squares method*). De acordo com Loke & Barker (1996) esse método utiliza a inversão baseada em células, onde o *software* reconhece a subsuperfície como blocos retangulares possuindo valores constantes para a propriedade ou parâmetro físico investigado.

O arranjo dos blocos está vinculado ao número de pontos investigados em subsuperfície, baseado na pseudo-seção de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente (posição e profundidade teórica dos pontos investigados) (Loke & Barker, *op.cit.*). A profundidade teórica para cada ponto investigado é diferente para cada espaçamento entre eletrodos e para cada arranjo eletródico. O *software* RES2DINV se baseia nos critérios definidos por Edwards (1977) para estimar as profundidades de investigação. A Figura 4.10 ilustra a malha retangular e

a posição dos blocos que simulam a subsuperfície terrestre. Para a realização do cálculo da matriz de dados o *software* se utiliza dos métodos Gauss-Newton e *quasi-Newton* (Loke & Barker, 1996).

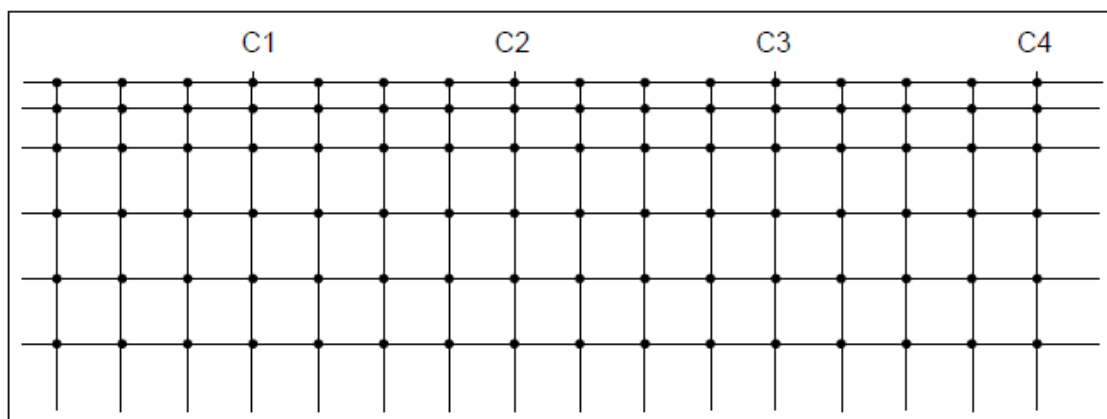


Figura 4.10 Parte da rede de células bidimensional utilizada para a modelagem 2D, mostrando as posições dos eletrodos (modificado de Loke, 1999).

4.4. MÉTODO ELETROMAGNÉTICO

Os métodos eletromagnéticos envolvem a propagação de campos eletromagnéticos de baixa frequência e baseiam-se nos fenômenos físicos de eletricidade e magnetismo. Quando uma corrente elétrica passa por um fio, é gerado um campo magnético nas vizinhanças desse fio. Conseqüentemente, quando se estabelece uma corrente AC, por exemplo, num fio colocado sobre a superfície do terreno, fluem correntes elétricas nos condutores subsuperficiais. Esse processo, conhecido como indução eletromagnética, é representado na Figura 4.11, com as seguintes etapas:

- A corrente AC fluindo na bobina cria um campo eletromagnético primário nas proximidades da bobina.
- O campo magnético primário causa o fluxo de correntes secundárias (*eddy currents*) em qualquer condutor presente.
- As correntes secundárias, ao fluírem pelo condutor criam um novo campo, o campo magnético secundário, que traz consigo informações sobre o condutor.

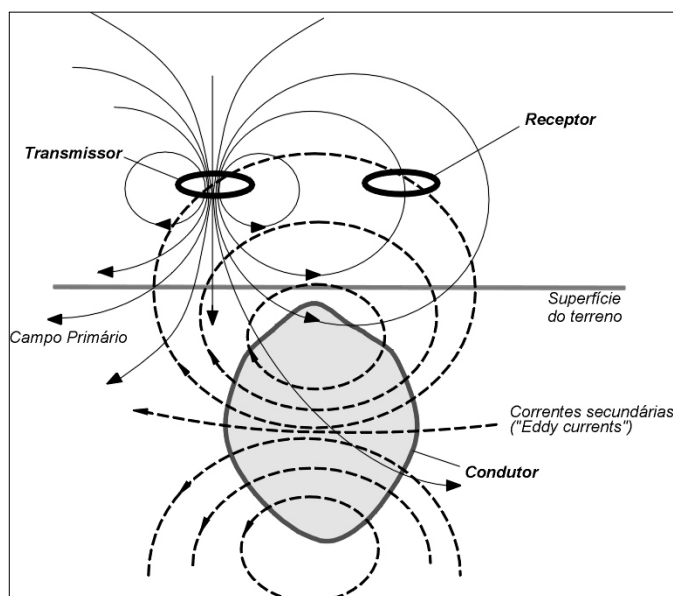


Figura 4.11 Indução Eletromagnética (modificado de Sheriff, 1989).

O campo secundário altera o primário e como consequência disso tem-se o campo resultante, que nada mais é do que uma composição do primário com o secundário. O campo resultante, assim como o secundário, traz informações sobre o condutor. O Método Eletromagnético caracteriza-se pelo uso de equipamentos de

operação muito simples e rápida, fatores que explicam sua extensa aplicação em estudos ambientais.

Os equipamentos utilizados nesse método podem ser denominados genericamente de condutivímetros. O condutivímetro (figura 4.12) é composto de duas bobinas (emissão e recepção).

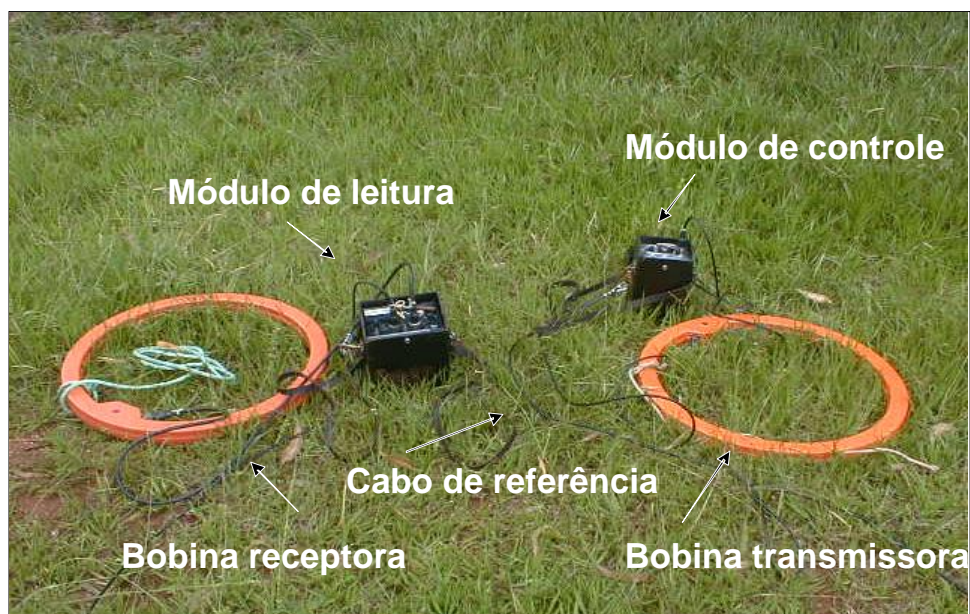


Figura 4.12 Componentes do método eletromagnético EM-34

A bobina transmissora emite um campo magnético primário H_p , que induz, em subsuperfície, correntes elétricas, que geram um campo secundário H_s , como visto anteriormente. A combinação destes dois campos é medida pela bobina receptora. Sob certas condições, definidas tecnicamente como “operação de baixo número de indução”, admite-se que a relação entre os módulos dos dois campos seja dada por $H_s = k.H_p$, onde k depende da frequência do campo, da permeabilidade magnética do material no vácuo, do espaçamento entre as bobinas e da condutividade elétrica do meio. O equipamento é construído de forma a permitir a leitura direta da condutividade em miliSiemens por metro (mS/m).

Os equipamentos mais consagrados nesse método são o EM-31 e o EM-34, fabricados no Canadá. São equipamentos construídos para investigar as profundidades pré-determinadas de 3 e 6 metros, dependendo da orientação das bobinas (EM-31) e de 7,5 a 60 metros, dependendo do comprimento do cabo de referência e da orientação das bobinas (EM-34). Os ensaios de campo são geralmente caminhamentos, que, devido a praticidade de operação e transporte dos

equipamentos, são realizados com muita rapidez. Como as profundidades de investigação são pré-determinadas, os equipamentos são bastante limitados para a execução de sondagens.

4.4.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Um campo eletromagnético pode ser dividido em um componente elétrico e um componente magnético, ambos mensuráveis, de maneiras diferentes. Os campos elétrico e magnético são funções da posição (r , x , y , z) e do tempo t (segundos), ou da frequência f (Hz) e podem ser descritos em termos de vetores de intensidade de campo E e H , ou de vetores de densidade de fluxo D e indução magnética B . Campos EM - dois componentes diretamente mensuráveis: campos elétrico (E) e magnético (H).

A teoria eletromagnética é fundamentada nas equações de Maxwell. O acoplamento dos campos E e H são descritos pelas leis de Ampère e Faraday.

A Lei de Ampère mostra que o campo magnético é produzido pela corrente de deslocamento e pela densidade de corrente elétrica.

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (4.5)$$

Para prospecção EM em baixas frequências, o campo magnético gerado pela densidade de corrente elétrica é mais importante.

Onde $\frac{\partial D}{\partial t}$ é a corrente de deslocamento e J é a densidade de corrente.

Na Lei de Faraday o campo elétrico (E) é produzido pela variação da indução magnética (B) em relação ao tempo.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.6)$$

A bobina transmissora (Tx) é energizada com uma corrente alternada em uma frequência baixa e é colocada em um meio uniforme, onde uma bobina receptora (Rx) também está posicionada. O campo magnético variante induz fracas correntes no solo, que, em contato com um corpo condutor, produzem as chamadas correntes parasitas (*eddy currents*). Estas correntes geram um campo magnético secundário (H_s) que é recebido junto com o campo magnético primário (H_p) pela bobina receptora. A bobina receptora, portanto, recebe um campo resultante (a soma dos

vetores dos dois componentes). De acordo com Borges (2007) o campo magnético secundário tem a mesma frequência do transmissor, mas difere em fase, intensidade e direção, tornando possível a identificação das anomalias condutivas.

A razão do espaçamento entre as bobinas (S) dividido pelo *skin depth* (δ) é conhecido como o “número de indução” (B).

$$B = \frac{S}{\delta} \quad (4.7)$$

Quando o número de indução é menor ou igual a 0,02, então a razão entre H_s e H_p no receptor é diretamente proporcional à condutividade aparente (σ_a). Nestas condições, conhecidas como *operação a baixo número de indução* (McNeil, 1980), o valor de condutividade elétrica aparente do terreno pode ser calculado pela equação:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad (4.8), \text{ onde}$$

σ_a = a condutividade aparente (mS/m)

$\omega = 2\pi f$, sendo f (Hz)

μ_0 = permeabilidade magnética no vácuo

s = espaçamento entre as bobinas (m)

4.4.2. AQUISIÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS ELETROMAGNÉTICOS

O equipamento usado neste trabalho é o EM34 da Geonics, que é composto por duas bobinas: uma transmissora Tx e outra receptora Rx. Acoplada à bobina transmissora existe um módulo de controle e emissão de corrente elétrica MC, alimentado por uma bateria. À bobina receptora está acoplado um módulo de leitura ML. Os módulos são ligados por um cabo de referência CR.

A disposição das bobinas é dada de duas maneiras, conforme a profundidade de investigação (Figura 4.13).

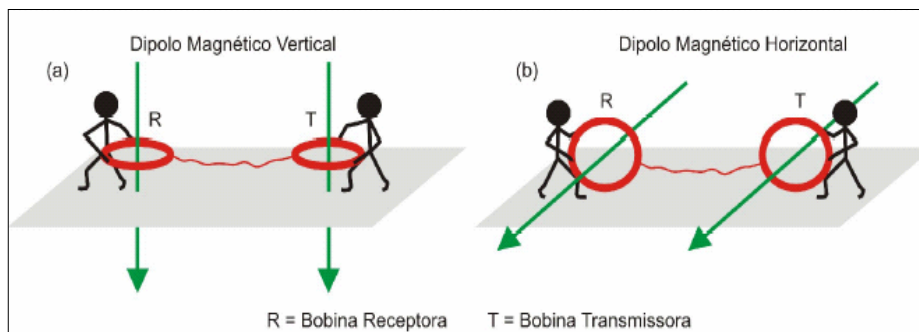


Figura 4.13 Configurações convencionais de bobinas utilizadas no método de dupla bobina (a) Bobinas horizontais, com dipolo magnético vertical. (b) Bobinas verticais, com o dipolo magnético horizontal (Borges, 2004).

As frequências de operação do equipamento, bem como as profundidades teóricas de exploração, variam de acordo com a disposição e o espaçamento entre as bobinas, esses dados estão explicitados na tabela abaixo.

Tabela 4.1 Espaçamento entre bobinas, frequência de operação e profundidade de investigação de acordo com a disposição das bobinas.

| Espaçamento entre as bobinas | Frequência de operação | Profundidade de exploração para Dipolo Horizontal | Profundidade de exploração para Dipolo Vertical |
|------------------------------|------------------------|---|---|
| 10m | 6.4 kHz | 0 - 7.5m | 0 - 15m |
| 20m | 1.6 kHz | 0 - 15m | 0 - 30m |
| 40m | 0.4 kHz | 0 - 30m | 0 - 60m |

Os ensaios de campo são geralmente caminhamentos, que, devido à praticidade de operação e transporte dos equipamentos, são realizados com muita rapidez.

Os dados de condutividade podem ser plotados em perfis, em função da distância, e um conjunto de perfis permite a confecção de mapas. A interpretação desses dados na maioria das vezes é qualitativa, porém já existem programas computacionais para quantificação desses dados. A etapa de inversão dos dados foi feita com a utilização do programa EM-34-2D (Monteiro Santos, 2004) utilizando o algoritmo de inversão Smooth S. Este programa é confeccionado para inversão de dados de condutividade aparente coletados com o equipamento EM-34.

O objetivo do processo de inversão é obter uma distribuição em subsuperfície de condutividade elétrica, considerando que esta propriedade varia suavemente. A

entrada de dados para o programa são os valores de condutividade aparente, a distância entre as bobinas e sua posição relativa (vertical ou horizontal). O processo de inversão fornece um perfil de distribuição de condutividade em subsuperfície, de forma semelhante aos programas de inversão 2D de resistividade.

4.5. MODELAGEM

4.5.1. PRINCÍPIOS DA MODELAGEM

“Os modelos teóricos fundamentados por princípios matemáticos têm em sua definição a finalidade de simplificar e abstrair do fenômeno explicado apenas as características conceituais. Nesse processo, há sempre resíduos de realidade que, por não estarem contidos nas equações do modelo explicativo, dão historicidade à ciência, colocando-a continuamente contra seus limites e sua falibilidade e, de outro lado, dinamizam, por constituírem desafios ao conhecimento, as suas mudanças e sofisticação. Assim, de um modo geral, são os modelos científicos” (Vogt, 2002).

A Modelagem Matemática constitui-se em um conjunto de procedimentos cujo objetivo é estabelecer um paralelo para tentar explicar, matematicamente, os fenômenos presentes no cotidiano do ser humano, ajudando-o a fazer previsões e a tomar decisões. (Burak, 1992).

4.5.2 MODELAGENS COM O SOFTWARE RESIXIP2DI

Com o objetivo de comparar situações hipotéticas com dados reais de campo, foram criados modelos sintéticos visando retratar as situações encontradas na célula experimental. Nas modelagens foi utilizado o programa RESIXIP2Di v3 e seu princípio de funcionamento é apresentado em Silva, 2004.

O programa RESIXIP2Di v3 (Interpex, 1996), que calcula as respostas teóricas de modelos geoeletricos através do método de “Elementos Finitos” (Rijo, 1977) e na inversão 2D o método de “Mínimos Quadrados Simples” (Inman, 1975). Informações mais aprofundadas a respeito de modelagem e interpretação de resistividade e IP podem ser encontradas em Fink et al., 1990.

Assim, o programa, por meio destas ferramentas matemáticas, permite que sejam geradas respostas teóricas de polarização induzida (IP) e resistividade (RE)

de modelos sintéticos, através da modelagem poligonal direta e inversa. Além disso, é possível escolher os tipos de arranjos: Wenner, gradiente, polo-dipolo, dipolo-polo, polo-polo, dipolo-dipolo, Schlumberger e também delimitar o número de eletrodos de corrente e de potencial.

O modelo sintético é construído a partir de uma seção de células retangulares (“grid”) que se estendem lateralmente do primeiro eletrodo de corrente até o último eletrodo de potencial. Posteriormente, cada retângulo é dividido em quatro triângulos para gerar a malha do elemento finito. Nesta malha, durante a modelagem poligonal, é permitida a construção de vários polígonos em que valores de resistividade e/ou cargabilidade e dimensões distintas aos corpos (polígonos) são atribuídas.

Os polígonos gerados no programa são especificados como uma série de vértices com propriedades e posições X e Z, de forma que cada um desses valores encontra-se disponível como um parâmetro na inversão.

Sendo assim na modelagem poligonal o intérprete define um valor de fundo (“background”) e vários polígonos, cada qual contendo valores constantes de resistividade e polarização induzida, de modo que os valores dos triângulos da malha de elementos finitos contidos dentro dos polígonos tornam-se uniformes, assim como os do background.

Além da uniformização dos valores, os triângulos que ficam parcialmente dentro de espaços de valores diferentes, assumem valores médios em função da área que ocupam em cada corpo. Durante a simulação do modelo, a corrente é injetada em cada um dos nódulos da malha para as profundidades teóricas definidas pelo “grid” e os eletrodos de corrente são responsáveis por gerar as voltagens nos eletrodos de potencial. O intérprete fornece ao programa informações sobre o arranjo de campo e posições dos eletrodos, de forma que os resultados combinados fornecem os valores de resistividade aparente na pseudo-seção.

No final da interpretação, um conjunto de polígonos com valores de resistividade e cargabilidade (ou outro parâmetro) representam os vários corpos e estratos presentes, que poderão ser correlacionados, então, a um modelo geológico.

Uma vez entendido o mecanismo de funcionamento do programa, foi executada a etapa de construção dos modelos referentes às linhas de estudo (resultados mostrados no capítulo 6). Nessa etapa foram fornecidas ao programa informações como tamanho e posicionamento dos alvos, o tipo de arranjo (dipolo-dipolo), a abertura do dipolo e os valores de resistividade (parâmetro utilizado nas

simulações) atribuídos aos alvos e ao background. A atribuição dos valores de resistividade para os modelos foi feita respeitando as características dos alvos.

Durante as simulações foram indicados valores de resistividade para serem utilizados na caracterização do chorume e da geomembrana, sendo de 1,5 ohm.m a 25 ohm.m para a caracterização do chorume e 100.000 ohm.m representando a geomembrana. No caso da geomembrana, o material PEAD é isolante, já para o chorume os valores indicados sugerem baixa resistividade.

CAPITULO 5. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

5.1. Equipamentos Utilizados

Na aquisição dos dados de resistividade e polarização induzida para a técnica de caminhamento elétrico foi utilizado o resistímetro Syscal R2 (módulo de transmissão/recepção e conversor 250 W DC/DC) e o Elrec Pro (módulo de recepção). As figuras 5.1 e 5.2 mostram o equipamento que foi utilizado no campo e uma das linhas executadas.

O Syscal R2 realizou a função de transmissão de corrente elétrica (Tx - *only time domain*) e o Elrec Pro realizou as medidas de resistividade e cargabilidade aparentes (Rx - *only time domain*). Para se estabelecer um sincronismo entre os módulos, o módulo Tx injeta um valor de corrente através dos eletrodos metálicos, que deve ser informado (pelo operador do equipamento) ao módulo Rx, e os módulos são sincronizados pelo formato de onda de corrente. Os eletrodos de potencial são conectados ao módulo Rx e detectam os valores de resistividade e cargabilidade aparentes em cada ponto.

Além dos resistímetros, foram utilizados vários equipamentos auxiliares, como baterias 12 V, eletrodos metálicos para injeção de corrente, eletrodos não polarizáveis para medição de potencial, cabos de conexão aos eletrodos, de injeção de corrente e de medição de potencial, solução de sulfato de cobre para os eletrodos de potencial, trenas e marretas para a montagem da linha de aquisição.

A solução saturada de Cu/CuSO_4 é colocada dentro dos eletrodos porosos, que são constituídos por um tubo de PVC com uma haste interna em forma de espiral, feita de cobre (figura 5.3). A haste do eletrodo fica então imersa em solução saturada de seu próprio sal, e a base de cerâmica do eletrodo permite que esta solução vazze lentamente, estabelecendo uma resistividade de contato com o solo, minimizando a poluição dos dados por ruídos de polarização de eletrodo.



Figura 5.1 Syscal R2, Elrec Pro e conversor de voltagem e bateria 12 V utilizados na aquisição com a técnica de caminhamento elétrico.



Figura 5.2 Aplicação das técnicas CE e IP em uma das linhas da célula experimental.

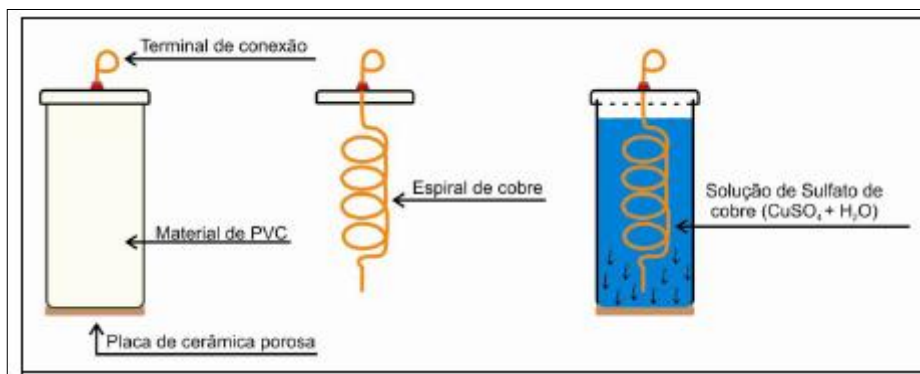


Figura 5.3 Esquema dos eletrodos não polarizáveis, com solução de sulfato de cobre (CuSO_4), utilizados no caminhamento elétrico (Camargo, 2014).

Na aquisição dos dados eletromagnéticos o equipamento utilizado foi o EM-34, da Geonics, com espaçamento entre bobinas de 10 e 20 metros. A figura 5.4 mostra este equipamento.



Figura 5.4 Equipamento EM 34, composto por bobina transmissora, bobina receptora, módulo de controle e transmissão de corrente e módulo de leitura.

5.2 Trabalhos Realizados em Campo

No primeiro semestre de 2013 foi realizado campo no aterro Delta A em Campinas para execução de campanha geofísica na célula experimental. Foram usadas a técnica de CE-IP. No segundo semestre de 2013 foi realizada uma segunda etapa de campo no aterro Delta A, sendo utilizadas as técnicas de CE-IP e o método EM-34. E finalizando, no segundo semestre de 2014 foi realizada a terceira etapa de coleta de dados no aterro Delta A em Campinas, sendo utilizado o

método EM-34 com os cabos de 10 e 20 m com o objetivo de estender em profundidade a área investigada. Na Figura 5.5 é mostrada a distribuição das linhas de investigação na célula experimental.

Foram aplicadas as técnicas de caminhamento elétrico (CE), método da polarização induzida (IP) e o método eletromagnético (EM-34) distribuídos em 6 linhas (Figura 5.5), com extensão de 100 m e espaçamento de 12 m entre as linhas. Para os métodos de CE e IP foi utilizado o arranjo dipolo-dipolo com espaçamento entre eletrodos de 4 m (linha C1 e linha C2) e 5 m demais linhas, com isso obtendo 9 níveis de investigação. Para o método EM-34 foi utilizado espaçamento de 5 m entre as medidas com cabos de 10 e 20 m obtendo assim as profundidades de 7,5, 15 e 30 m. E para finalizar, foram confeccionados 6 modelos sintéticos utilizando o *software* RESIXIP2DI com o objetivo de simular determinados eventos e compará-los com os resultados reais obtidos com os dados coletados em campo.

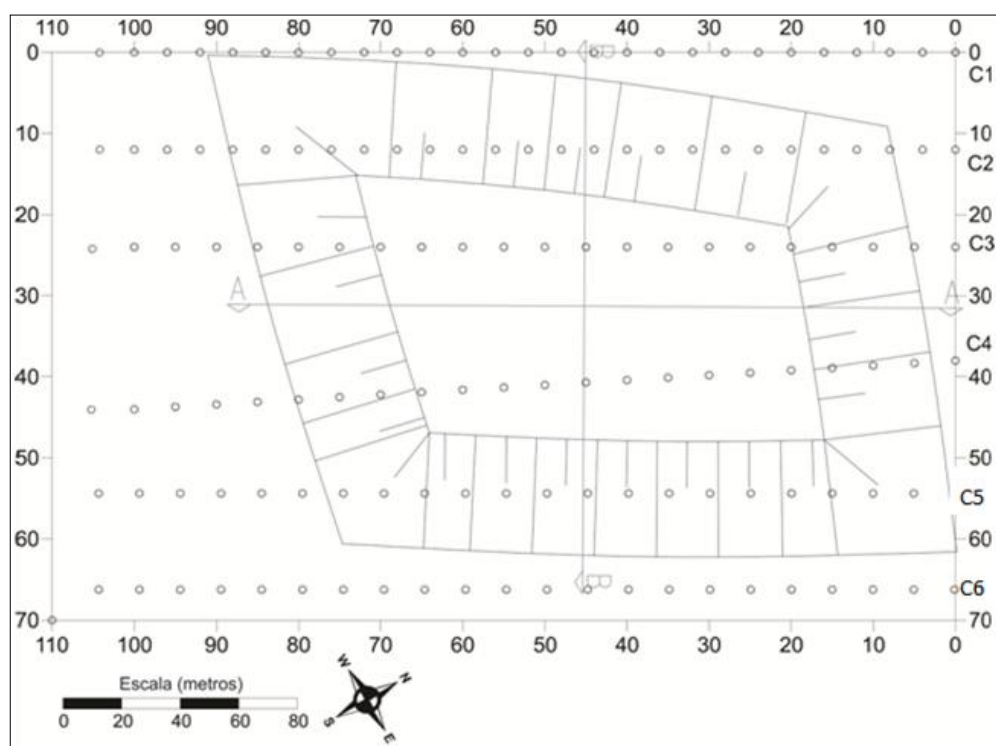


Figura 5.5 Distribuição das linhas de investigação de CE, IP e EM-34 na célula experimental.

CAPITULO 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados em seções de cada método: CE, IP e EM para cada linha realizada (Figura 5.5), para maior detalhe foi adicionada a topografia nas seções.

6.1. Caminhamento Elétrico (CE)

Os dados coletados de CE em campo foram processados e filtrados utilizando *software* RES2DINV, o qual forneceu as seções de resistividade modelada. Na linha 1, executada na borda externa NW da célula experimental e diretamente sobre o aterro, temos valores com baixa resistividade que variam pouco (< 25 ohm.m), devido ao posicionamento diretamente sobre os resíduos (Figura 6.1). Próximo à superfície temos uma faixa com resistividade levemente mais alta (~ 37 ohm.m), que corresponde à cobertura de solo.

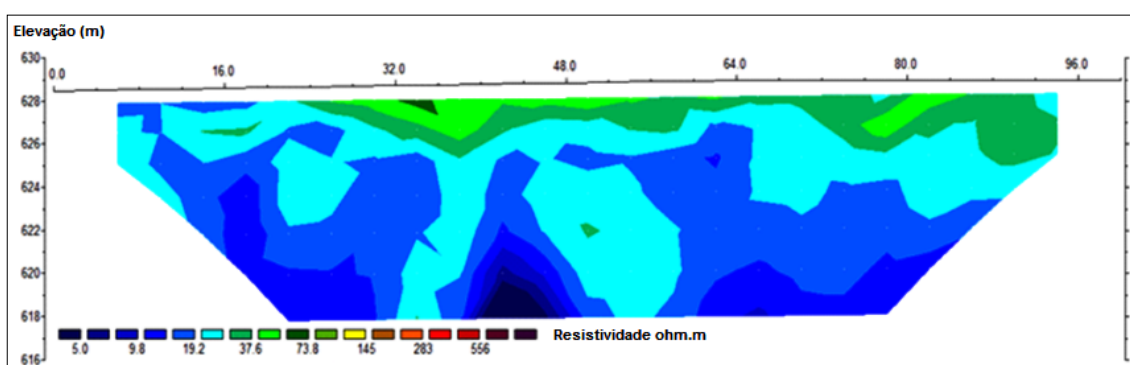


Figura 6.1 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 1 – C1 (Fora da célula).

A Linha 2 foi realizada na borda da célula e é apresentada na Figura 6.2. A linha tracejada indica a interface entre os resíduos e a geomembrana. Nesta linha temos valores de resistividade em uma faixa de 10 a 75 ohm.m que corresponde aos resíduos sólidos urbanos (RSU) e observa-se também a camada de cobertura de solo em algumas áreas. Abaixo do corpo de resíduos, onde se encontra a geomembrana, há valores altos de resistividade (que chegam a ser > 500 ohm.m). A geomembrana é um corpo isolante, sendo assim, não há penetração de corrente elétrica abaixo dela, e como resultado (devido ao conceito de resistividade aparente) temos uma camada altamente resistiva que não corresponde à geometria e resistividade real da célula experimental.

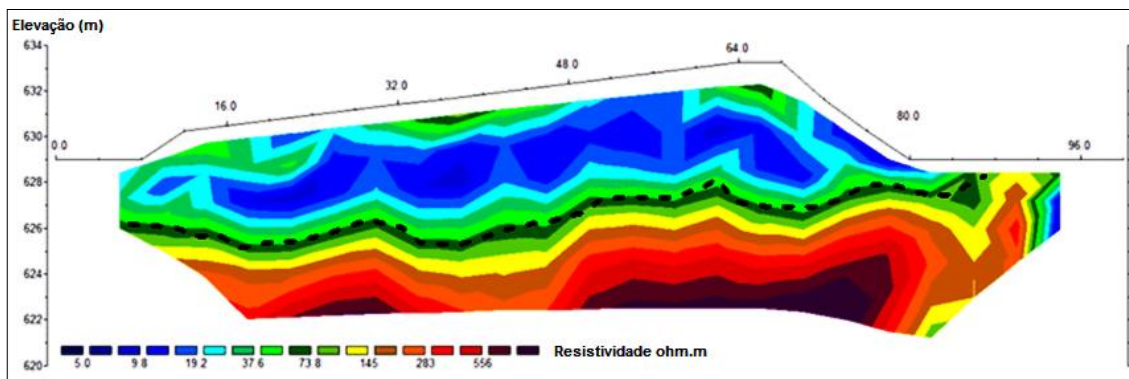


Figura 6.2 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 2 – C2.

Nas figuras 6.3 e 6.4 observamos os resultados das linhas 3 e 4, e podemos notar um nível aproximadamente constante com resistividades menores que 70 ohm.m que indica o nível de chorume dentro do corpo de resíduos. Algumas regiões de resistividade menor que 10 ohm.m (em azul escuro) podem corresponder a um acúmulo de chorume.

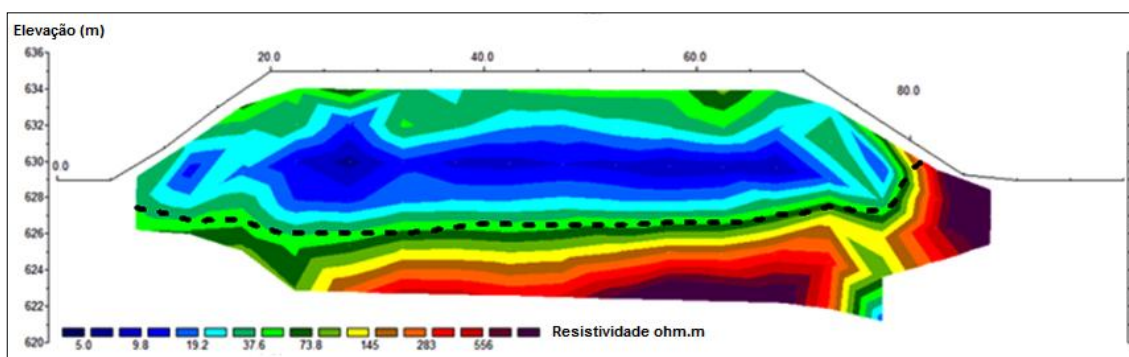


Figura 6.3 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 3 – C3.

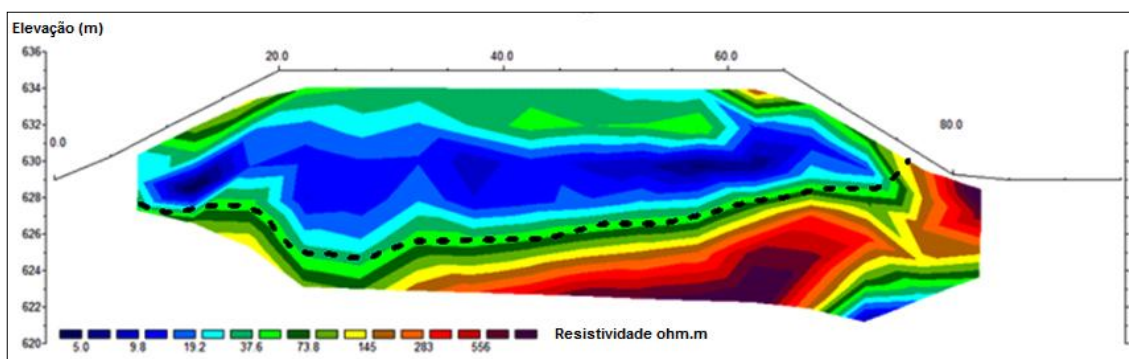


Figura 6.4 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 4 – C4.

Na Figura 6.5 temos resultado semelhante às linhas anteriores com valores < 70 ohm.m correspondendo ao acúmulo de chorume acima da geomembrana, podemos ver também áreas onde o acúmulo de chorume representou valores variando de 5 a 10 ohm.m, a interface entre a célula e a geomembrana é mais uma

vez marcada por valores distintos de resistividade, sendo que abaixo da camada impermeabilizante os valores são muito altos >145 ohm.m chegando a > 500 ohm.m.

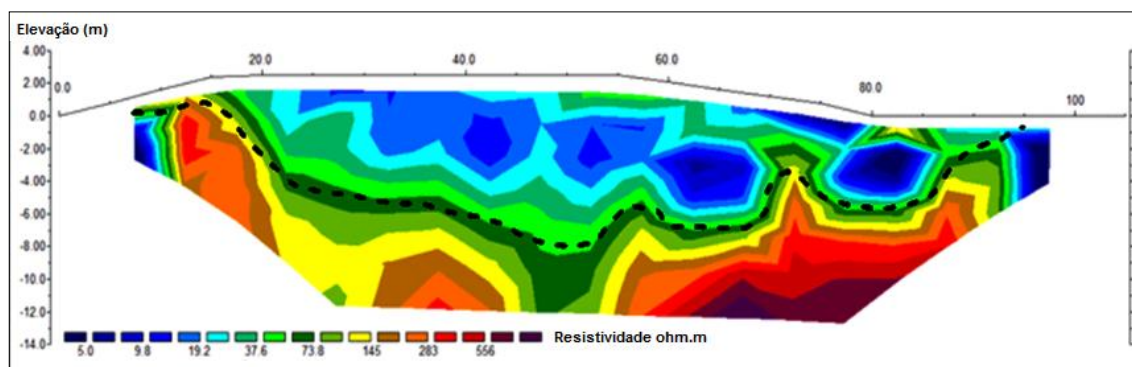


Figura 6.5 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 5 – C5.

A linha 6 foi executada na borda externa SE da célula experimental e assim como a linha 1 fora dos limites da geomembrana. Os valores de resistividade variam pouco (10 a 40 ohm.m), apresentando também zonas de baixa resistividade (< 10 ohm.m), o que pode indicar o acúmulo de chorume.

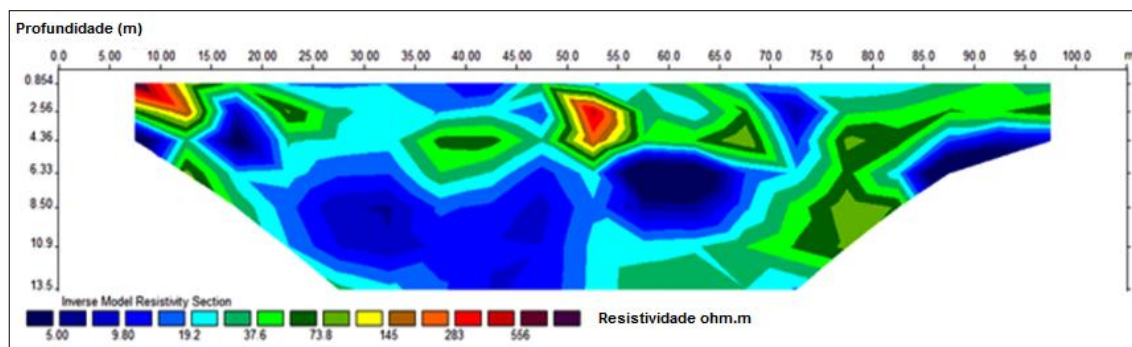


Figura 6.6 Perfil 2D de resistividade modelada (ohm.m) correspondente à linha 6 – C6.

6.2. Polarização Induzida (IP)

Os ensaios de polarização induzida (IP) foram realizados juntamente com o caminhamento elétrico (CE). Foram utilizados eletrodos porosos na coleta dos dados devido ao fato de serem impolarizáveis. Os resultados de cargabilidade nas linhas 1, 2, 3, 4, 5 e 6 refletem materiais polarizáveis dentro dos resíduos com valores acima de 15 mV/V, entretanto estes valores não delimitam de forma clara o corpo de resíduos e a geomembrana. Os dados foram processados e filtrados utilizando software RES2DINV, o qual forneceu as seções de cargabilidade individualizadas abaixo, nas figuras 6.7 até 6.12.

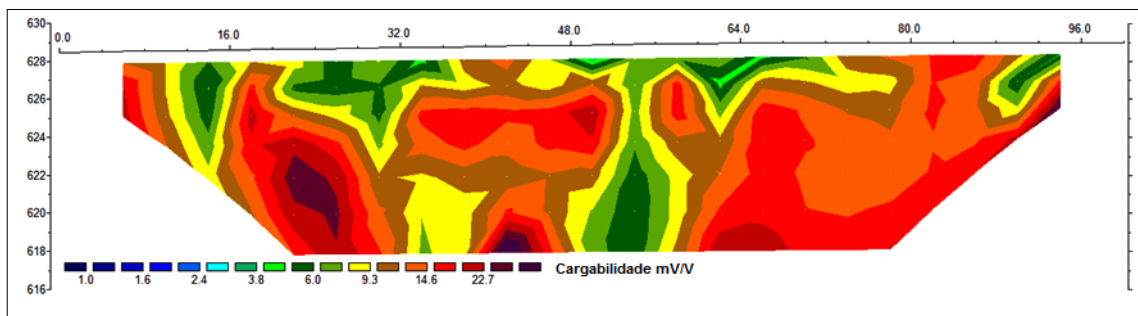


Figura 6.7 Seção de cargabilidade (mV/V) para linha 1.

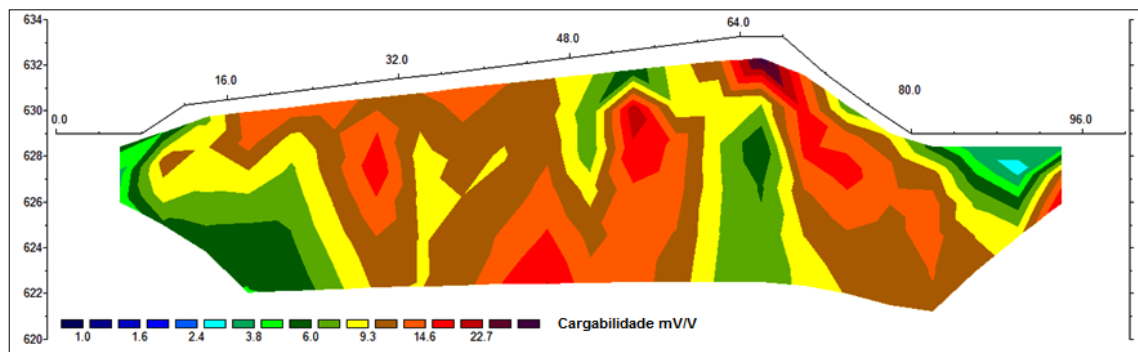


Figura 6.8 Seção de cargabilidade (mV/V) para linha 2.

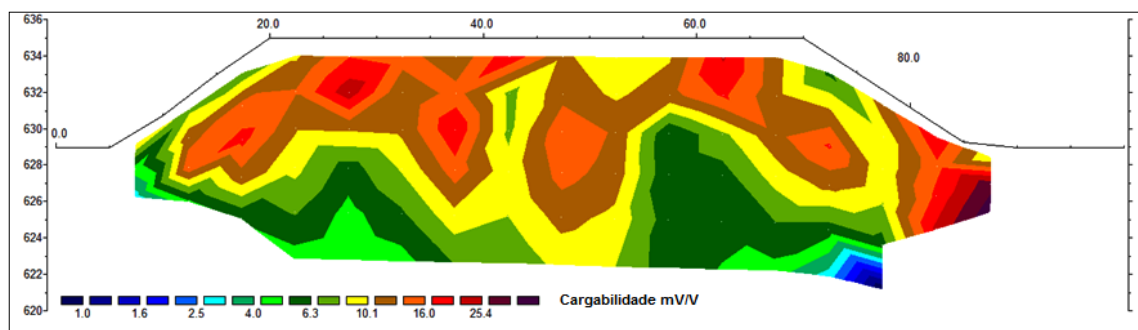


Figura 6.9 Seção de cargabilidade (mV/V) para linha 3.

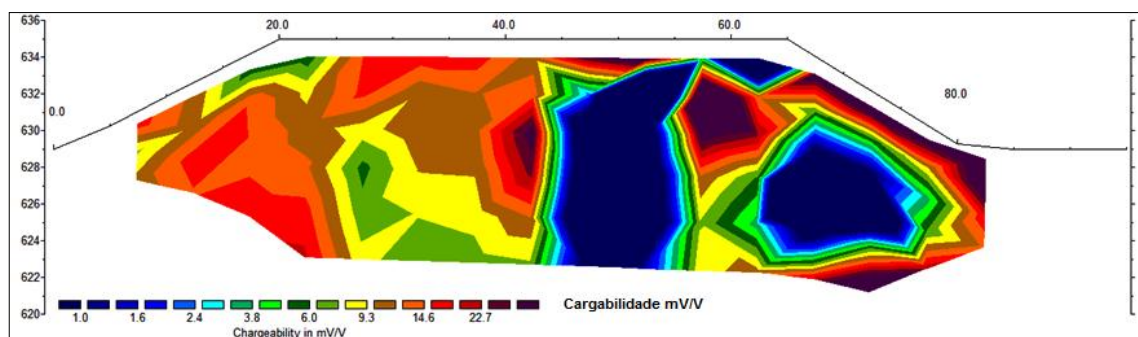


Figura 6.10 Seção de cargabilidade (mV/V) para linha 4.

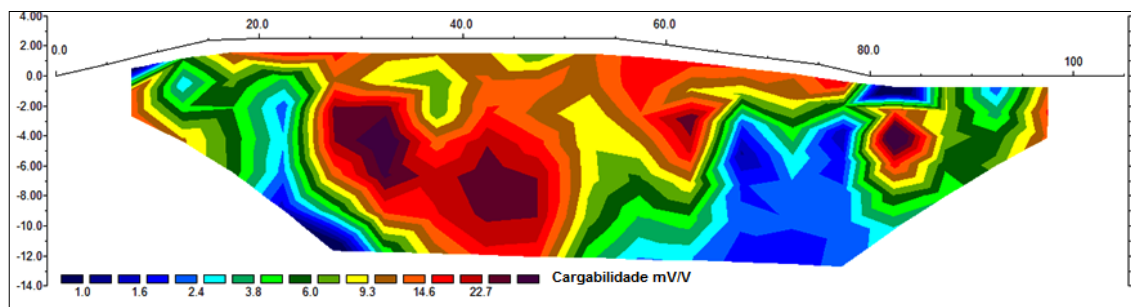


Figura 6.11 Seção de cargaabilidade (mV/V) para linha 5.

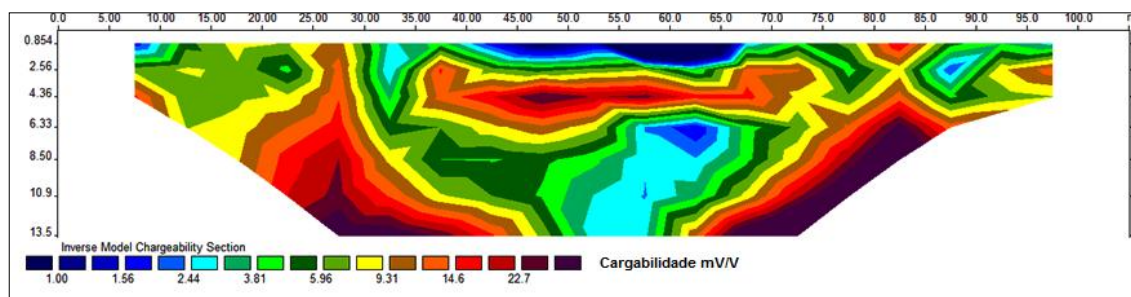


Figura 6.12 Seção de cargaabilidade (mV/V) para linha 6.

6.3. Método Eletromagnético (EM-34)

O método EM foi realizado nas mesmas linhas do caminhamento elétrico, foram distribuídas 6 linhas sob a célula experimental com espaçamento de 5 m entre as medidas e 12 m entre as linhas. Os cabos utilizados foram de 10 e 20 m, que nos fornecem uma amplitude de investigação de 7,5, 15 e 30 m de profundidade teórica, todas as linhas têm 90 m de extensão, exceto a EM06 que possui 80 m. Os dados coletados foram processados e filtrados em laboratório, submetidos à inversão no *software* EM34-2D e apresentados em forma de seções de condutividade pelo SURFER 9.0.

Os resultados obtidos com a aplicação do método EM na célula experimental permitem investigar os valores de condutividade elétrica (mS/m) além da geomembrana (barreira resistiva), entretanto, o resultado obtido não condiz com a realidade, pois a camada resistiva que observamos nas seções com condutividades variando de 20 a 50 mS/m (de cor vermelha nas Figuras 6.13 a 6.18) é muito mais espessa que a geomembrana instalada na célula experimental.

Em todas as seções observamos valores de condutividade elétrica (mS/m) variando de 20 a 180 mS/m, com valores mais elevados de condutividade apresentados nas extremidades dos perfis, variando de 150 a 200 mS/m (cor azul a azul escuro nas seções de condutividade, Figuras 6.14 a 6.19) e em profundidade

de ~ 25 m. E faixas com baixa condutividade variando de 20 a 50 mS/m, em profundidades que variam em torno de 10 a 25 m, se estendendo por todo o restante da linha de investigação. Esta anomalia de alta resistividade ou baixa condutividade pode ser o resultado da influência da geomembrana instalada, a qual possui alto valor de resistividade gerando assim uma discrepância na apresentação dos resultados.

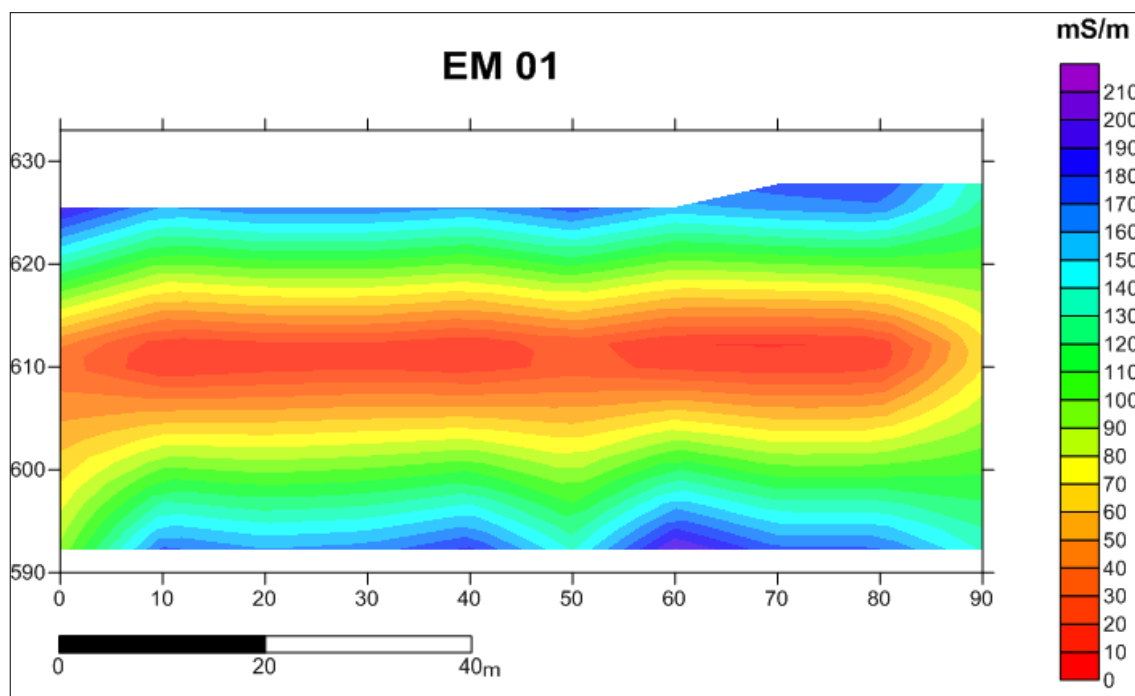


Figura 6.13 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 01.

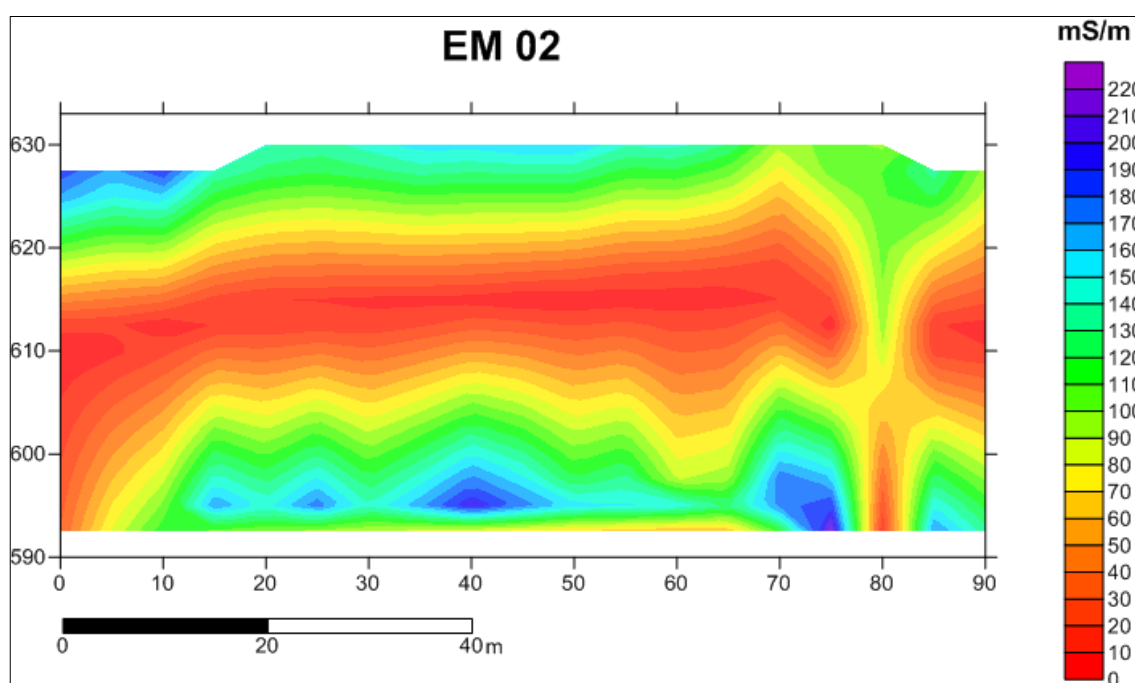


Figura 6.14 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 02.

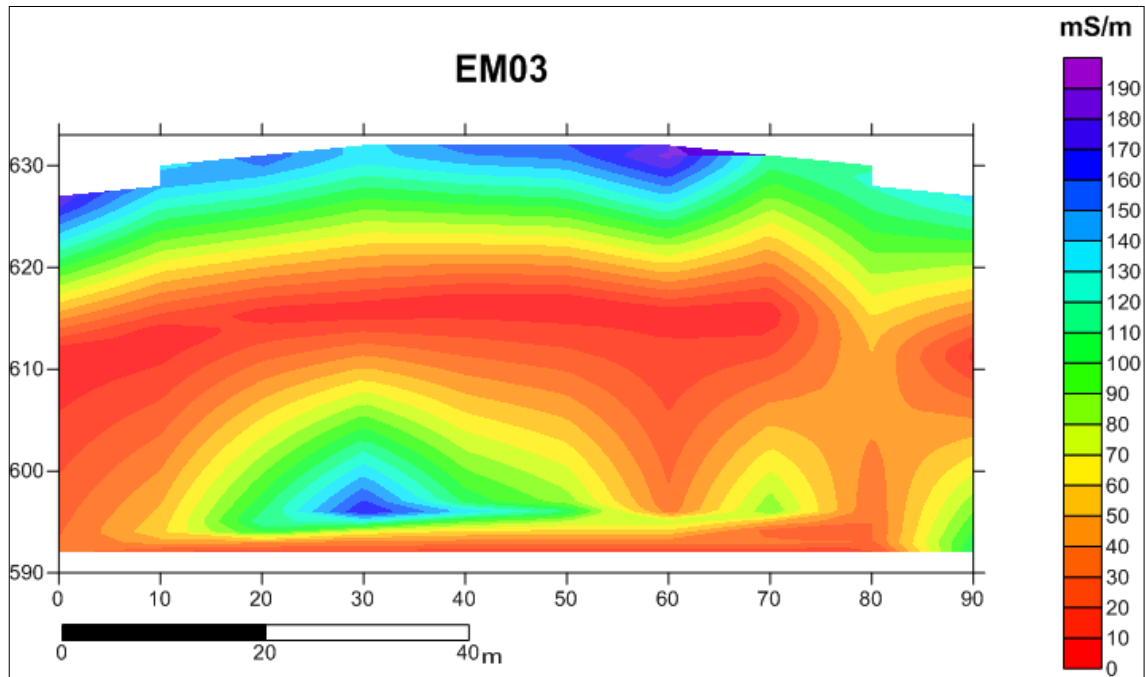


Figura 6.15 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 03.

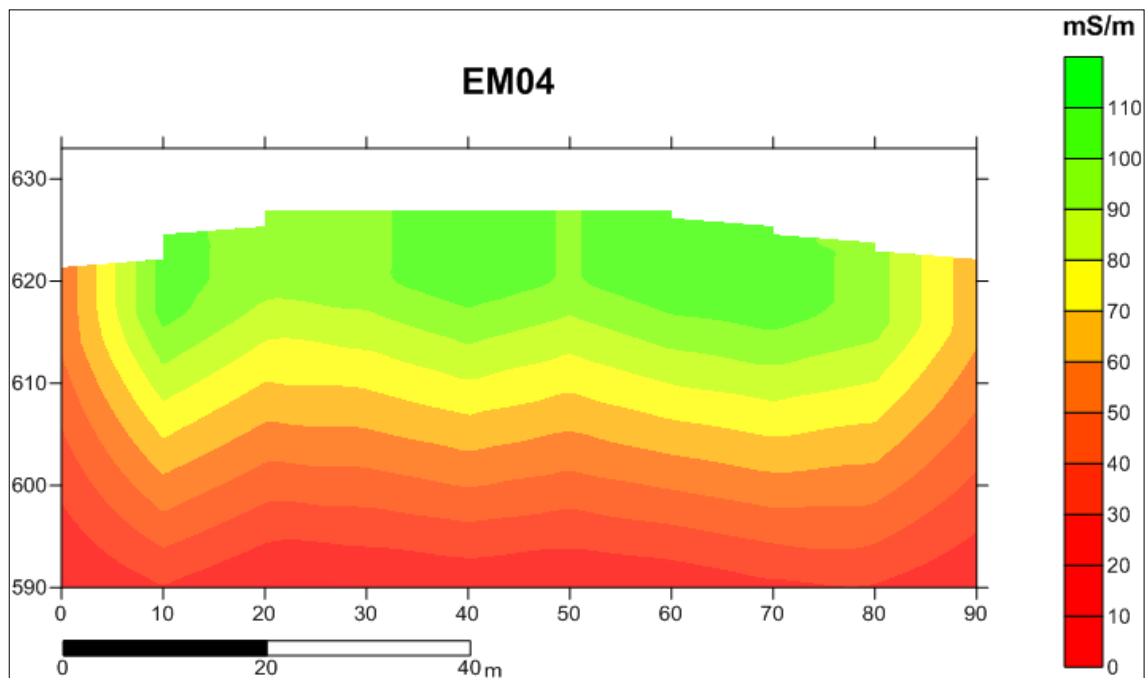


Figura 6.16 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 04.

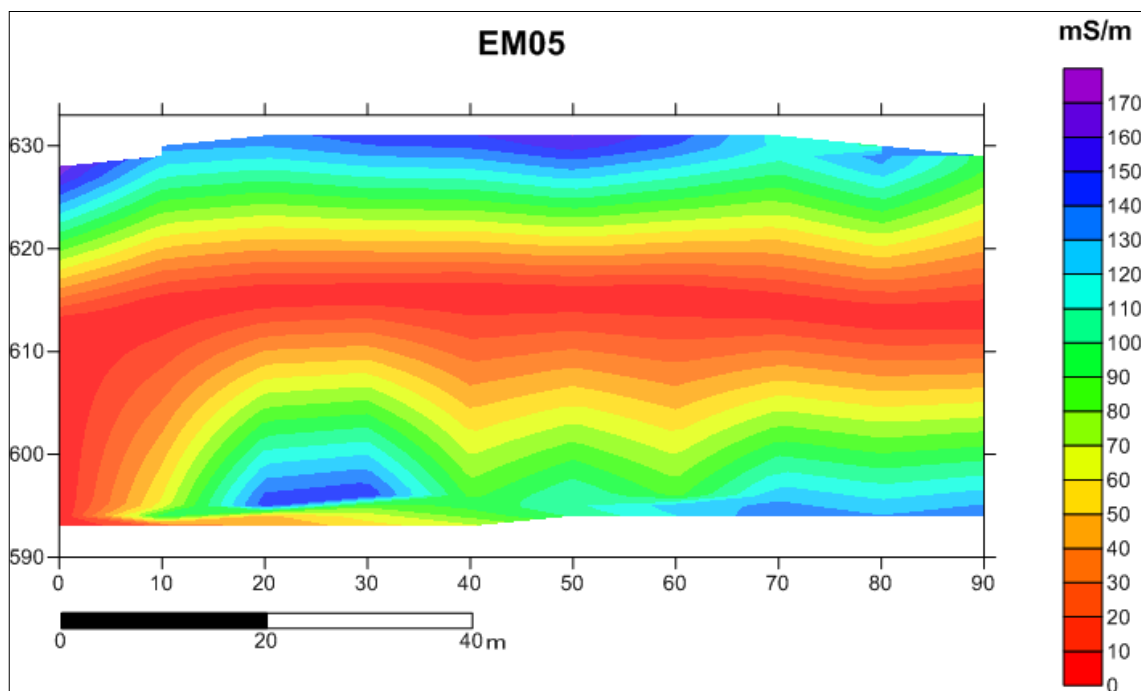


Figura 6.17 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 05.

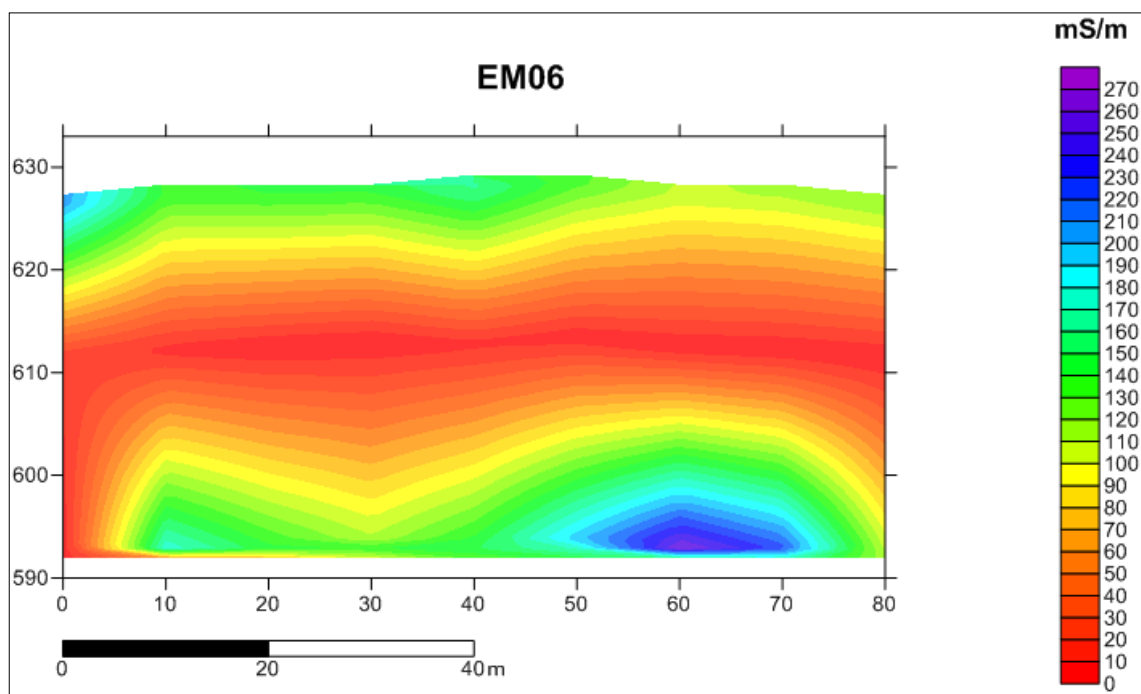


Figura 6.18 Seção de condutividade elétrica (mS/m) para linha 06.

6.4. Resultados da Modelagem

Em paralelo aos resultados geoeletricos reais obtidos em campo foram confeccionados 6 modelos sintéticos de comportamento da célula experimental, simulando determinadas situações. Para isso fez-se uso do software RESIXIP2DI o qual permite este tipo de interação. Os modelos sintéticos obtidos foram

comparados aos modelos reais, permitindo assim uma interpretação assertiva quanto à situação mais provável de ser encontrada em campo. Os resultados encontram-se descritos abaixo.

Na Figura 6.19 temos o primeiro modelo confeccionado, o da célula experimental sem a instalação da geomembrana. Neste modelo podemos observar que são definidos dois valores de resistividade, sendo 5 ohm.m dentro da célula e 25 ohm.m em profundidade. Foi gerada uma seção de resistividade no RES2DINV com estes valores, representada abaixo. No entanto, este modelo se refere a uma situação homogênea e não representa a realidade encontrada no local da pesquisa.

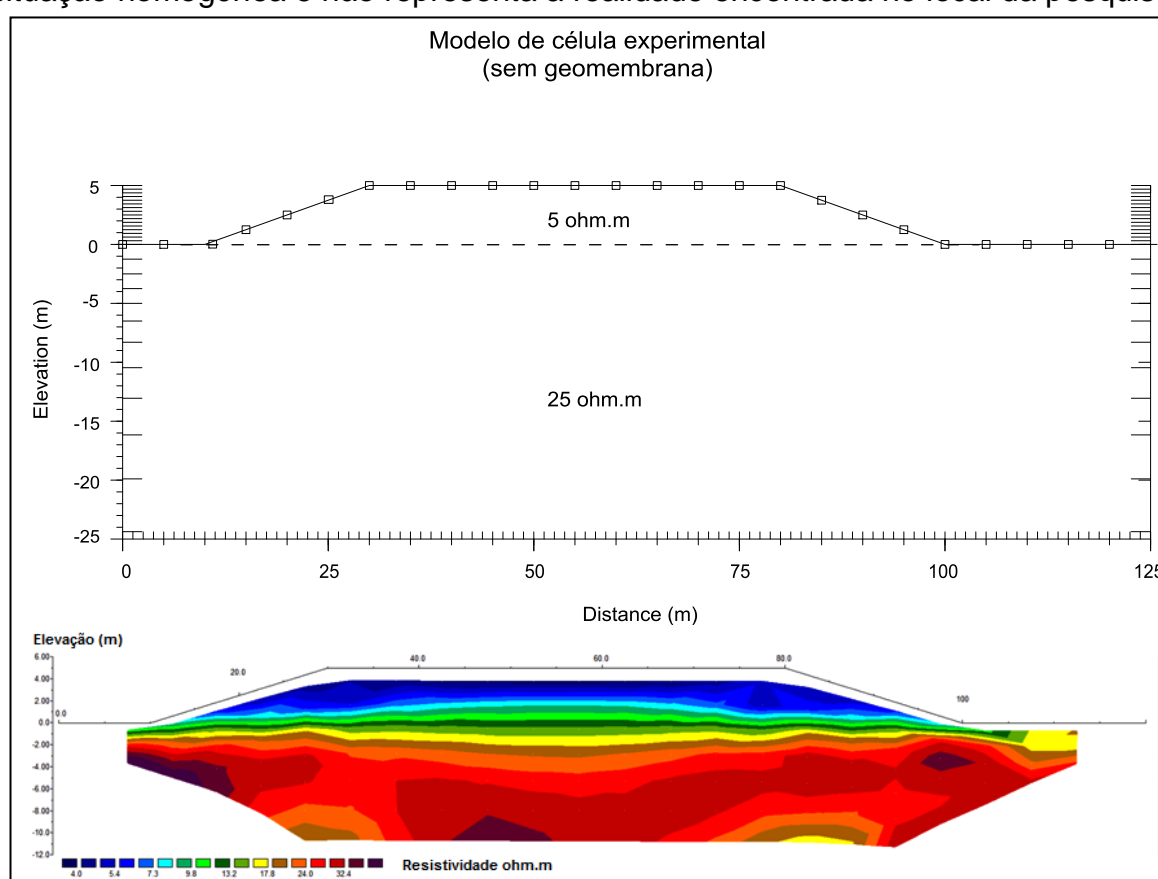


Figura 6.19 Modelo de célula experimental sem a aplicação de geomembrana de PEAD.

Na Figura 6.20 temos o modelo da célula experimental com a instalação da geomembrana, neste modelo podemos observar que são definidos três valores de resistividade, sendo 5 ohm.m dentro da célula, 25 ohm.m em profundidade e 100.000 ohm.m para geomembrana. Foi gerada uma seção de resistividade no RES2DINV com estes valores. Comparando este modelo com os resultados adquiridos em campo de CE podemos dizer que este modelo está próximo do encontrado no local da pesquisa.

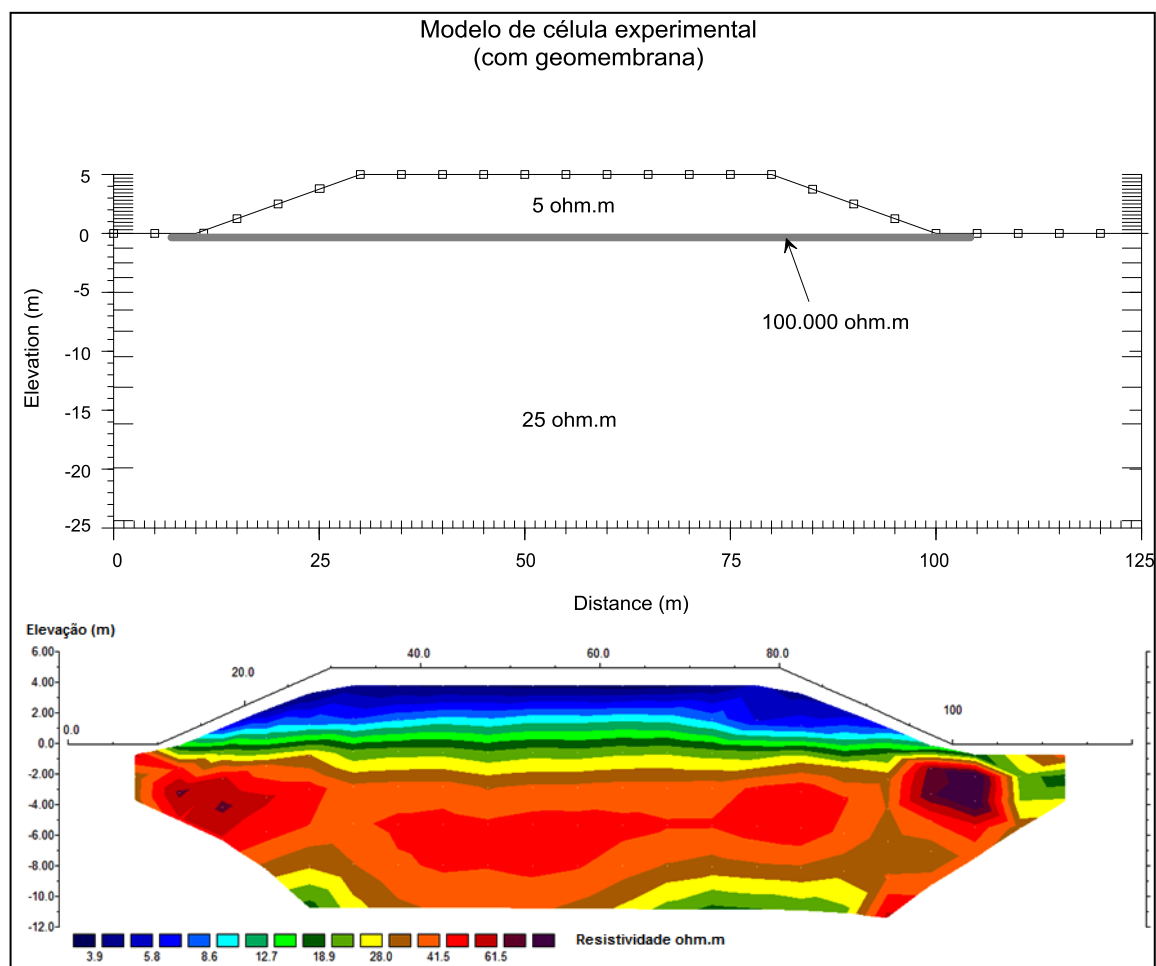


Figura 6.20 Modelo de célula experimental com a aplicação de geomembrana de PEAD.

Na Figura 6.21 temos o modelo da célula experimental com a instalação da geomembrana e com níveis de chorume dentro da célula, neste modelo podemos observar que são definidos quatro valores de resistividade, sendo 1,5 e 25 ohm.m dentro da célula, 25 ohm.m em profundidade e 100.000 ohm.m para geomembrana. Foi gerada uma seção de resistividade no RES2DINV com estes valores.

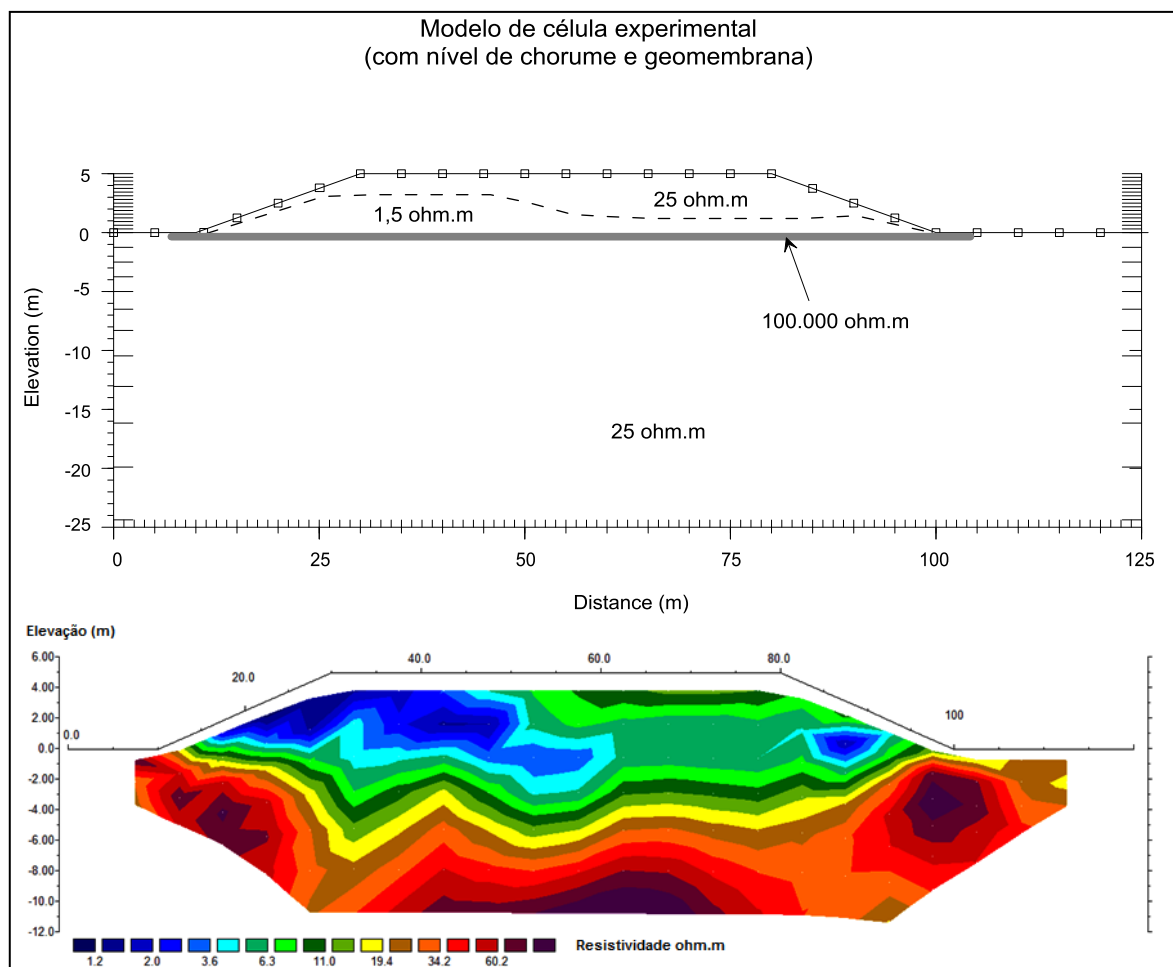


Figura 6.21 Modelo de célula experimental com a aplicação de geomembrana de PEAD, com níveis de chorume.

Na Figura 6.22 temos o modelo da célula experimental com a instalação da geomembrana e com furo de 3 m de diâmetro no centro. Neste modelo o objetivo foi verificar como se comportariam os valores de resistividade com um eventual furo da geomembrana e o seu resultado em seção de resistividade. Podemos observar que são definidos três valores de resistividade, sendo 5 ohm.m dentro da célula, 25 ohm.m em profundidade e 100.000 ohm.m para geomembrana. Estes valores geraram uma seção no RES2DINV.

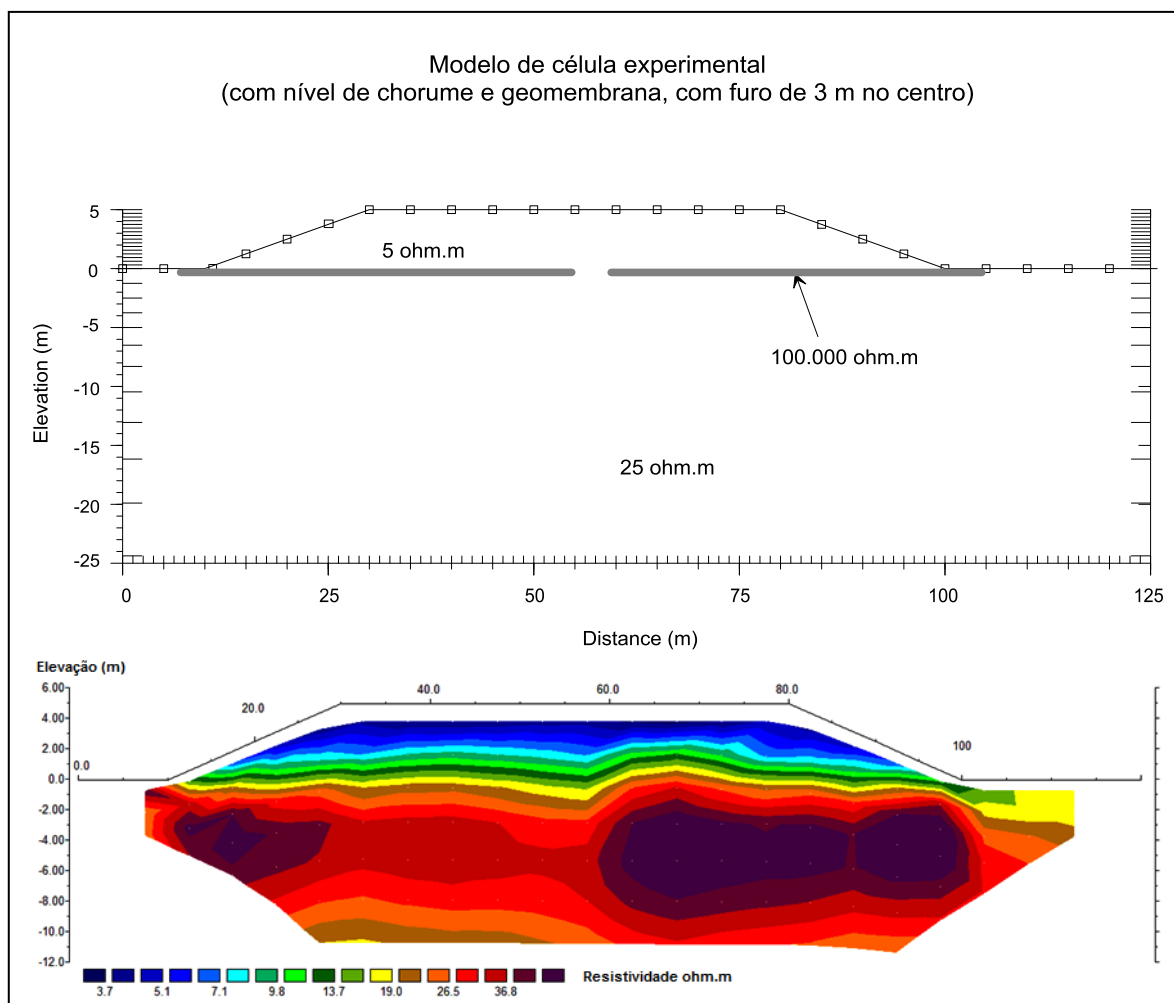


Figura 6.22 Modelo de célula experimental com a aplicação de geomembrana de PEAD, com furo de 3m no centro.

Na Figura 6.23 temos o modelo da célula experimental com a instalação da geomembrana e com furo de 3 m de diâmetro no centro e vazamento do chorume. Neste modelo o objetivo foi verificar como se comportariam os valores de resistividade com um eventual furo da geomembrana e o vazamento do chorume abaixo dos limites da célula experimental. Podemos observar que são definidos três valores de resistividade, sendo 5 ohm.m dentro da célula para o vazamento do chorume, 25 ohm.m em profundidade e 100.000 ohm.m para geomembrana.

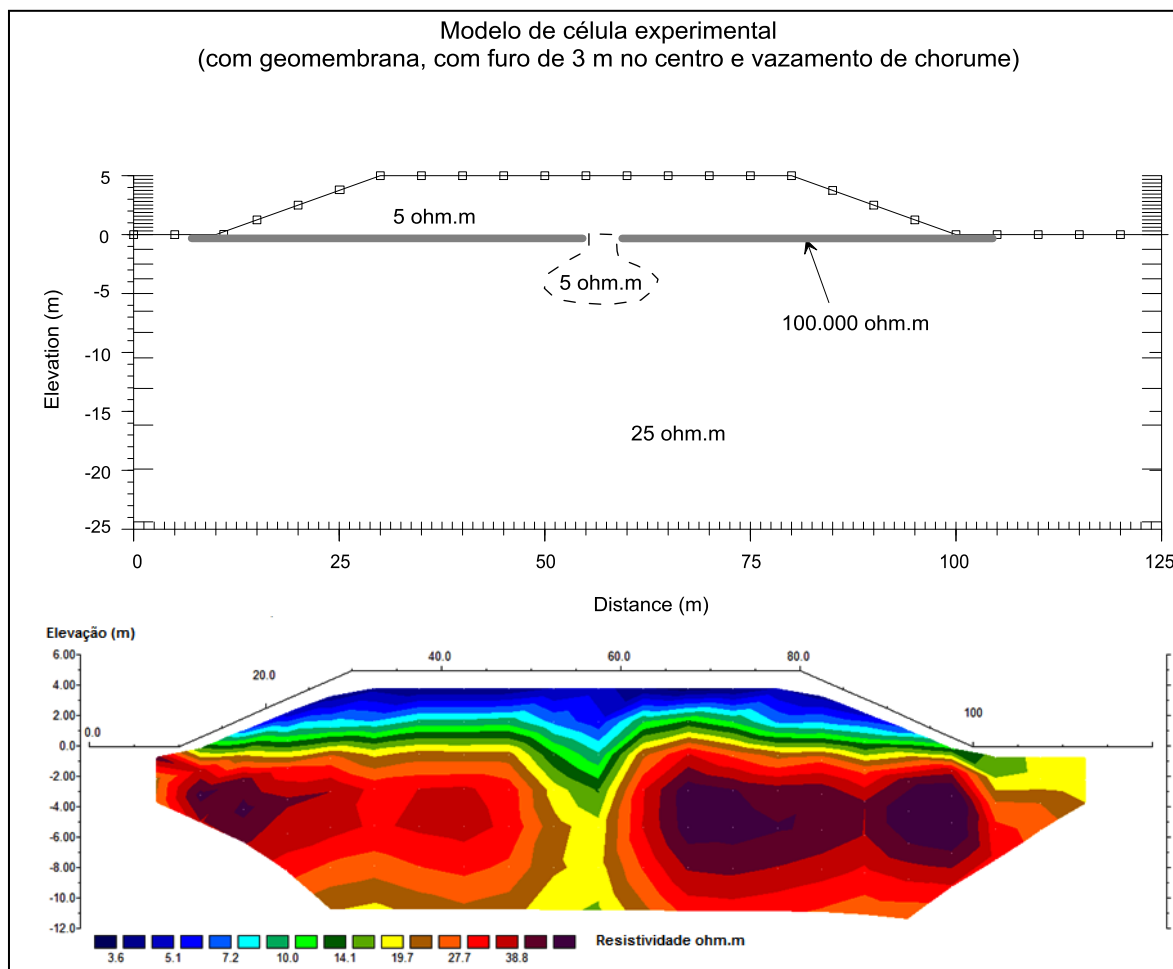


Figura 6.23 Modelo de célula experimental com a aplicação de geomembrana de PEAD, com furo de 3m no centro e vazamento de chorume.

Na Figura 6.24 temos o modelo da célula experimental com a instalação da geomembrana, com níveis de chorume dentro da célula, com furo de 1 m de diâmetro no centro e vazamento do chorume. Neste modelo o objetivo foi verificar como se comportariam os valores de resistividade caso ocorresse rompimento da geomembrana e vazamento do chorume abaixo dos limites da célula experimental. No entanto, esse modelo foi idealizado com o furo de diâmetro menor e uma pluma de contaminação maior, com o objetivo de representar da melhor forma um real vazamento de chorume. Podemos observar que são definidos quatro valores de resistividade, sendo 5 ohm.m dentro da célula e para o vazamento do chorume, 25 ohm.m sendo outro nível de chorume dentro da célula, 35 ohm.m em profundidade e 100.000 ohm.m para geomembrana. Nas figuras 6.24 e 6.25 podemos verificar o comportamento da seção de resistividade ao vazamento de chorume e como estaria representado caso ocorresse na área de pesquisa.

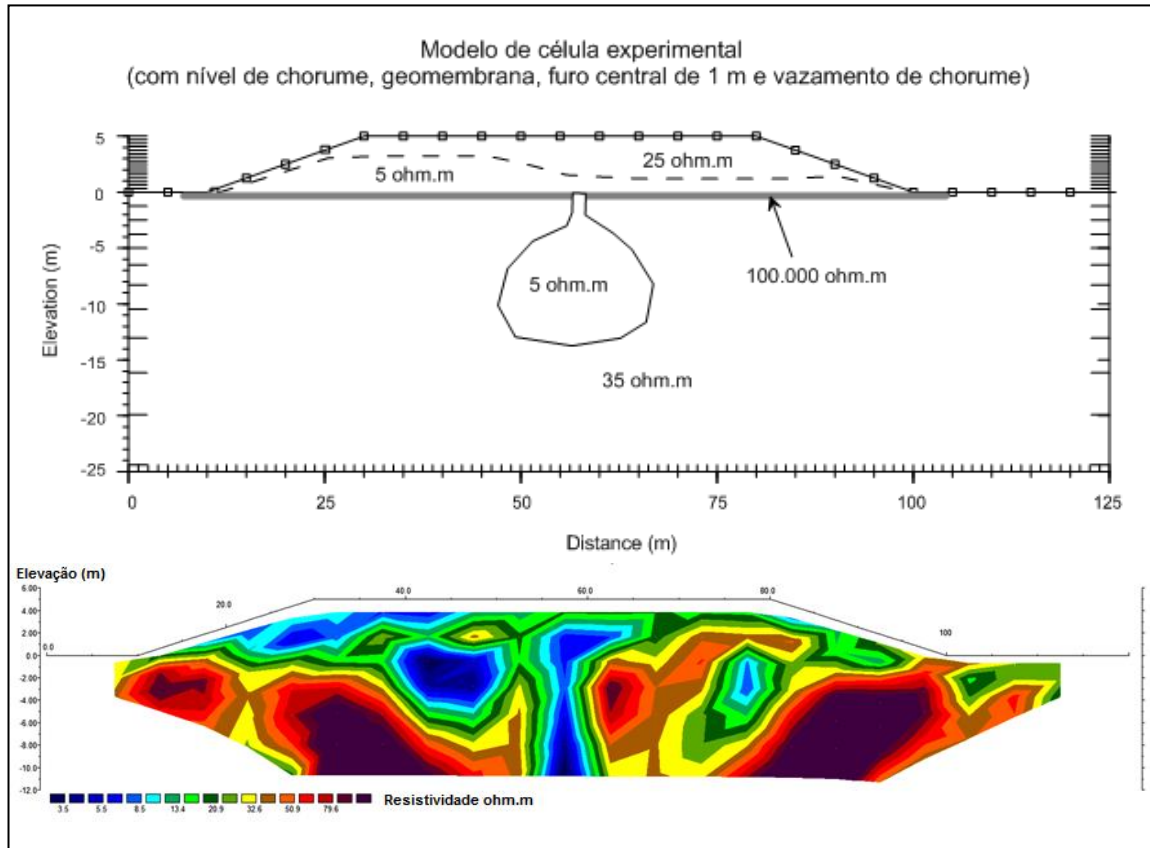


Figura 6.24 Modelo de célula experimental com a aplicação de geomembrana de PEAD, com furo de 1 m no centro e vazamento de chorume.

CAPITULO 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos validam a utilização de métodos geofísicos na caracterização e no mapeamento de contaminações em aplicações ambientais. Os métodos de ER, IP e EM utilizados e suas respectivas técnicas de CE e EM-34, fornecem informações distintas e que auxiliam na interpretação dos resultados e nas tomadas de decisões.

Com os resultados apresentados podemos afirmar que o método que melhor forneceu informações sobre a célula experimental foi o de eletrorresistividade com a técnica de CE, pois identificou a camada resistiva (geomembrana) e nos permitiu comparar os dados com as simulações feitas em laboratório. No entanto, o método fica limitado pela camada resistiva, não sendo possível verificar a resistividade real abaixo da geomembrana, devido ao seu efeito isolante. Das simulações obtidas através da modelagem matemática, a que mais correspondeu com os dados reais de campo foi a com níveis de chorume e aplicação da geomembrana (Figura 6.22), seu perfil de resistividade é muito próximo ao encontrado nas Figuras 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 dos perfis de resistividade. Algumas faixas localizadas de resistividade muito baixa sugerem zonas de concentração de chorume, confirmando o que indicavam os poços de monitoramento da célula.

Para uma melhor resolução dos dados de CE se faz necessário diminuir a distância entre os eletrodos, aumentando assim a acurácia do levantamento. Já com o método EM podemos afirmar que a anomalia encontrada nos perfis não é representativa para o objetivo da pesquisa, que é confeccionar um modelo geoeletrico para a célula experimental, pois a mesma extrapola os limites da geomembrana, afetando assim a precisão do resultado. E com o método de IP não foi possível verificar informações assertivas quanto à posição da geomembrana, nem qualquer delimitação de padrões de cargabilidade, servindo apenas para comparação com os resultados do CE e EM.

REFERÊNCIAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2012) - Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo.

ABU-ZEID, N.; BIANCHINI, G.; SANTARATO, G.; VACCARO, C. (2004) - Geochemical characterization and geophysical mapping of Landfill leachates: the Marozzo canal case study (NE Italy) - *Environmental Geology*.

ATEKWANA E.A.; SAUCK W.A.; WERKEMA D.D. (2000) - Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics* 44:167–180.

BENATTI, J. C. B.; PAIXÃO FILHO, J. L.; GABRIELI, G.; LEME, M. A. G.; ELAIUY, M. L. C.; TEIXEIRA, E. N.; PEREIRA, S. Y.; MIGUEL, M. G. (2013); *Parceria para Implantação de uma Célula Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos de Grandes Dimensões, 01/2013, III Conferência Internacional de Gestão de Resíduos na América Latina, 2013, Vol. 1, pp.1-10, São Paulo, SP, Brasil.*

BORGES, W. R. (2007) *Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG-USP*

BOSCOV, M. E. G. ; BENVENUTO, C. (2012). *Aterros de inertes e não-inertes em São Paulo. Solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba. 1ed.São Paulo. : D'Livros.p. 369-386.*

BRAGA, A .C.O. (1997) - Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – formações Rio Claro e Corumbataí, no Município de Rio Claro – SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Rio Claro - SP, 173 p.

BRAGA, A. C. O. (1999) - Métodos de prospecção em hidrogeologia. Apostila interna do Curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

BURAK, D. (1992) - Modelagem Matemática: ações e interações no processo de ensino-aprendizagem. Campinas: FE/UNICAMP. (Tese de Doutorado)

CAMARGO, C.F. (2014) - Caracterização geoeletrica de arenitos asfalticos da formação pirambóia, Bacia do Paraná, SP. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG-USP.

CETESB - Companhia de tecnologia de saneamento ambiental. (2001) - Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. GTZ.2 ed. São Paulo. 389 p.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. (2008) – Procedimento de identificação de passives ambientais causados por áreas de disposição de residuos sólidos de origem urbana. São Paulo, 8p. Não publicado.

EDWARDS, L.S. (1977) - A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42, 1020-1036.

ELIS, V.R. (1998) Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 264p.

FACHIN, S. J. S. (2007) Ensaio geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG-USP, 140p.

FINK, J. B.; McALISTER, E. O.; STERNBERG, B. K.; WIEDUWILT, W. G.; WARD, S. H. (1990) - Induced polarization applications and case histories. Tulsa: SEG, 417 p.

FRID, V.; LISKEVICH, G.; DOUDKINSKI, D.; KOROSTISHEVSKY, N. (2008) - Evaluation of landfill disposal boundary by means of electrical resistivity imaging. *Environmental Geology* 53:1503-1508.

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal (2001) - Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 200p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010) - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2008. Rio de Janeiro.

INMAN, J.R. (1975). Resistivity Inversion with Ridge Regression. *Geophysics* 40, p. 798-817.

INTERPEX (1996). RESIXIP2DI v. 3.0. DC resistivity and induced polarization data interpretation software. USA. Manual.

IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica do estado de São Paulo (1995) – Lixo municipal. Manual de Gerenciamento integrado. IPT, São Paulo SP, 278p.

JOHANSSON, B.; JONES, S.; DAHLIN, T.; FLYHAMMAR, P. (2007) - Comparisons of 2d- and 3d-inverted resistivity data as well as of resistivity- and ip-surveys on a landfill. European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Istanbul, Turkey.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. (2009) – Geofísica de exploração. Oficina de textos. São Paulo-SP.

LAGO, A.L.; ELIS, V.R.; GIACHETI, H.L. (2006) - Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo , v. 24, n. 3.

LAUREANO, A.T.; SHIRAIWA, S. (2008) - Ensaio geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá-MT. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo , v. 26, n. 2.

LOKE, M.H.; BARKER, R.D. (1996a) Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, pp 131-152.

LOKE, M.H.; BARKER, R.D. (1996b) Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, pp 499-523.

LOKE, M.H. (2000) Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2D and 3D surveys. Report Geotomo LLC, Penang, Malaysia. 67p.

LOKE, M.H. (1999). *Electrical Imaging Surveys for Environment and Engineering Studies: A practical guide to 2D and 3D surveys*. Malaysia.

McNEIL, J.D. (1980) Electrical conductivity of soils and rock. Geonics Ltda., Ontario, Canada, Technical note Tn – 5.

MEJU, M. A. (2000) - Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics*.

MINOZZO, M. (2009) métodos geofísicos aplicados na avaliação ambiental em uma indústria química na cidade de São Paulo – SP. Dissertação de mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG-USP. 114p.

MONTEIRO SANTOS, F.A., (2004). 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data. *Journal of Applied Geophysics*, 56, 123-134.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O. (2009) - Anomalias de cargabilidade em aterro de resíduos sólidos domiciliares. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo.

OLIVEIRA, S.; PASQUAL, A. (2004). Avaliação de parâmetros indicadores de poluição por efluente líquido de aterro sanitário. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 9, n. 3, p. 240-249.

OLIVEIRA, M.T.; MOREIRA, C.A.; MENEZES, A.M.C. (2011) - Aplicação do método de Polarização Induzida em área de disposição de resíduos sólidos no município de Caçapava do Sul - RS. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo, v. 29, n. 2.

ORELLANA, E. (1972) – *Prospeccion geoelectrica em corriente continua*. Madrid: Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips, 523p.

PERROTA, M.M.; SALVADOR, E.D.; LOPES, R.C.; D'AGOSTINO, L.Z.; PERUFFO, N.; GOMES, S.D.; SACHS, L.L.B.; MEIRA, V.T.; GARCIA, M.G.M.; LACERDA FILHO, J.V. (2005) - Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000. Programa Geologia do Brasil - PGB, CPRM, São Paulo. CDROM.

POSSAMAI, F. P.; VIANA, E.; SCHULZ, H. E.; COSTA, M. M.; CASAGRANDE, E. (2007) - Lixões inativos na região carbonífera de Santa Catarina: análise dos riscos à saúde pública e ao meio ambiente, Ciência e Saúde Coletiva.

RIJO, L. (1977). Prospecção geofísica nas regiões de Ponta de Pedra e Soure na Ilha de Marajó. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977, Campina Grande. Campina Grande: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Nordeste, p. 58-59

SANTOS, L.M.D.G. (2011) - Caracterização de dimensão e composição geoquímica de pluma de contaminação no Aterro Sanitário Municipal Delta A em Campinas (SP). Trabalho de Conclusão de Curso, Campinas – SP, Instituto de Geociências – UNICAMP, 79p.

SAUCK, W.A. (2000) - A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics* 44:151–165.

SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A.; NASH, M.S. (1998) – High conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. *Journal of Environmental Engineering and Geophysics* 2(3):203–212.

SILVA, E.M.A. (2004) Aplicação de Resistividade e Polarização Induzida na investigação de objetos enterrados em Sítio Controlado do IAG/USP. Dissertação de mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG-USP.

SILVA, E.M.A. (2005) Aplicação de resistividade e polarização induzida na investigação de objetos enterrados em sítio controlado do IAG/USP. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo, v. 23, n. 1, Mar.

SMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente (2005) – Procedimentos para Implantação de Aterro Sanitário em Valas. São Paulo, 33p.

STANTON G.P.; SCHRADER T.P. (2001) - Surface geophysical investigation of a chemical waste landfill in Northwestern Arkansas. In: EL Kuniandy (ed) Presented in 2001 U.S. geological survey karst interest group proceedings. *Water-Resources Investigations Report* 01-4011, pp 107–115.

SOUPIOS, P.; PAPADOPOULOS, I.; KOULI, M.; GEORGAKI, I.; VALLIANATOS, F.; KOKKINO, E. (2007) - Investigation of waste disposal areas using electrical methods: a case study from Chania, Crete, Greece. *Environmental Geology* 51: 1249-1261.

SOUZA FILHO, E. E. (1986). Mapeamento Faciológico do Subgrupo Itararéna Quadricula de Campinas (SP) – Dissertação de Mestrado- Instituto de Geociências – USP- SP.

STEVANATO, R.; FONSECA FERREIRA, F.J.; WOSNIAK, R.; SIMIONI, M.T.S. (2004) - Mapeamento de pluma de contaminação no aterro sanitário de Coronel Vivida-PR. I Simpósio Regional da Sociedade Brasileira de Geofísica. São Paulo.

SUMNER, J.S. (1976) - Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 277p.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. (1990) - Applied Geophysics (Second Edition ed.) Nova York: Cambridge University Press, 770p.

UNEP-EEA. (2007) - The Road from landfilling to recycling: common destination different routes.

USTRA, A.T. (2008). Utilização dos métodos eletroresistividade e polarização induzida com aquisição de dados 3D para caracterização geoambiental de uma área à jusante do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru – SP. Tese de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. São Paulo – SP. 205 p.

VOGT, C. A. (2002) - Modelos e modelagens. ComCiência, Campinas, v. 29.

WITHERLY, K.E. & VYSELAAR, J. (1990) – A geophysical case history of the Poplar Lake Copper-Molybdenum Deposit, Houston Area, British Columbia. *Induced Polarization. Application and Case Histories (Investigations in Geophysics n. 4)*, Society of Exploration Geophysics, pp. 304-324.