

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Aplicação de Levantamento Geofísico para Caracterização do Substrato do Aterro Controlado de Pedro do Rio-RJ

Caio Duque Estrada Amendola

ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, caio.amendola@altageotecnia.com

Conrado Oliveira Carestiatto de Carvalho

ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, conrado.carvalho@altageotecnia.com

Álvaro de Freitas Viana

ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, alvaro.viana@altageotecnia.com

Marco Antonio Martins Cantisano

GeoPhysical Consulting Services, Belo Horizonte, Brasil, marco@geophysicalcs.com.br

Rodrigo Alves Ortega

GeoPhysical Consulting Services, Belo Horizonte, Brasil, ortega@geophysicalcs.com.br

RESUMO: O presente trabalho está relacionado à aplicação de levantamento geofísico para caracterização do substrato do Aterro Controlado de Pedro do Rio (ACPR), localizado no distrito de Pedro do Rio, Município de Petrópolis, pertencente à Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. Definiu-se como base central para o trabalho a delimitação do maciço de resíduos, apresentando as interfaces do aterro com a superfície original do terreno, bolsões de chorume, além de pontos de fratura/falha locais. Para realização do levantamento geofísico foi adotado o método conhecido como Eletorresistividade. Com auxílio do software RES2DINV, foram elaborados cinco perfis bidimensionais para facilitar a interpretação dos resultados, exibindo-os de forma gráfica. Na análise das seções geofísicas foram consideradas Zonas de Baixa Resistividade (ZBR), associadas ao material do aterro, aquelas cujos valores se encontram abaixo de 20ohm.m, e associadas a presença de chorume aquelas com baixíssima resistividade, abaixo de 2ohm.m. As cinco seções de caminhamento elétrico, totalizando 1.713m, permitiram a verificação da resistividade em profundidades de até 30m. Ao final do estudo, a partir da interpretação dos resultados dos cinco caminhamentos elétricos realizados, foi possível identificar diversas zonas anômalas de baixas resistividades elétricas e seus focos principais, inferir a base do aterro, além de pontos de fratura/falha na base rochosa subjacente ao longo das seções.

PALAVRAS-CHAVE: Levantamento Geofísico, Aterro de Resíduos, Eletorresistividade, Caminhamento Elétrico.

ABSTRACT: This article is related to the application of geophysical survey to characterize the substrate of the Pedro do Rio Controlled Landfill, located in the Pedro do Rio District, City of Petropolis, State of Rio de Janeiro. The delimitation of the waste mass was defined as the central basis for this work, also presenting the landfill's interfaces with the original ground surface, "leachate pockets", in addition to local fracture/failure points. The method known as Electroresistivity was used for conducting the geophysical survey. By using the software RES2DINV, five two-dimensional profiles were created to facilitate the interpretation of the results, displaying them graphically. In the analysis of the geophysical sections, it was considered low resistivity zones, with values below 20ohm.m related to waste landfill material, and very low resistivity, values below 2ohm.m, associated with the presence of leachate. The five cable sections, totaling 1.713m, allowed the verification of resistivity at depths up to 30m. At the end of the study, based on the interpretation of the five cable sections results, it was possible to identify several anomalous zones of low resistivity and their focuses, as well as to infer the landfill base and probable failure points in the underlying rocky base.

KEYWORDS: Geophysical Survey, Waste Landfill, Electroresistivity, Cable Sections.



1 Introdução

O crescente aumento populacional em áreas urbanas e o consequente aumento da geração de resíduos sólidos vêm gerando diversos problemas relacionados a sua destinação e, como resultado, relacionados à contaminação de solos e águas subterrâneas.

Antes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela lei nº 12.305 de 2010 (BRASIL, 2010), a principal forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos eram lixões. Entretanto, existem técnicas de engenharia capazes de aperfeiçoar os métodos de disposição em lixões, transformando-os em aterros controlados. Para isso, são instalados sistemas de captação de líquidos percolados e gases, sistemas de drenagem pluvial, instrumentação geoambiental, além da realização de planos de avanço que visam melhorar a estabilidade do maciço.

No entanto, mesmo com a transformação de lixões em aterros controlados, muitas vezes, informações acerca da implantação inicial do empreendimento permanecem desconhecidas. Uma forma de se determinar a base de implantação do aterro é através de levantamentos geofísicos que, com base na diferença de resistividade dos materiais, pode-se inferir a delimitação das camadas de resíduo.

Nos últimos anos, os levantamentos geofísicos têm sido muito utilizados em estudos geoambientais de áreas de deposição de resíduos sólidos, principalmente onde há suspeita de contaminação provocada pelo percolado (LAUREANO, 2007; IAMONDI, 2009; CAVALCANTI, 2013).

Dentre os diversos métodos utilizados no estudo de áreas contaminadas, muitos autores vêm ratificando a eficácia de métodos indiretos de investigação, principalmente a adoção de métodos elétricos e eletromagnéticos. Relatos expostos em Reynolds (1997) exemplificam os métodos supracitados como os principais para mapear plumas de contaminação.

Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo a delimitação do maciço de resíduos do Aterro Controlado de Pedro do Rio (ACPR), apresentando as interfaces do aterro com a superfície original do terreno, identificação de bolsões de chorume e pontos de fratura/falha locais. Para realização do levantamento geofísico foi adotado o método conhecido como Eletorresistividade, com a técnica de aquisição de dados por caminhamento elétrico (CE). Tais informações foram utilizadas para subsidiar o Projeto de Encerramento do referido empreendimento.

2 Características gerais da área em estudo

O empreendimento está localizado no distrito de Pedro do Rio, Município de Petrópolis, pertencente à Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, sendo acessado pelo km 49,5 da Rodovia BR-040, a qual promove a ligação entre a capital do estado e a cidade de Brasília-DF (Figura 1). Observa-se que a rodovia BR-040 e o curso do Rio Piabanha situam-se a, aproximadamente, 115m a leste, enquanto a área residencial mais próxima está a cerca de 150m, no mesmo sentido.

No contexto histórico, inicialmente, o local onde hoje está inserido o ACPR foi uma pedreira empregada como fonte de material para a duplicação da rodovia BR-040. A partir de 1997, os resíduos gerados no Município de Petrópolis começaram a ser depositados no local, em forma de lixão, ou seja, sem controle dos gases e líquidos percolados, bem como requisitos de segurança e controles operacionais. Em 2001 foram realizadas as primeiras intervenções na área, possibilitando a sua reclassificação para aterro controlado.

Em 2006 foram executadas obras para a melhoria das condições de drenagem de águas pluviais, com a instalação de canaletas de seção tipo meia-cana na crista dos taludes e a construção de um canal aberto a montante do maciço, entre os resíduos e o terreno natural, tendo em vista o grande volume de águas pluviais direcionado para o empreendimento. Além disso, foram instalados piezômetros nas cotas intermediárias e plantadas gramíneas nas faces dos taludes.

A disposição de resíduos seguiu normalmente até 2015, quando a licença do aterro foi revogada pelo órgão ambiental estadual. Em 2016 foi concedida uma nova licença para disposição de resíduos no ACPR. Nesta ocasião, ocorreu a instalação da manta de impermeabilização e execução da drenagem de fundo de percolados, a jusante do maciço existente. Ademais, a frente de disposição concentrou-se majoritariamente nas cotas intermediárias e inferiores do maciço até o fim de 2017, quando foi finalizado o último plano de avanço, o qual consistiu no retaludamento da face nordeste do maciço. Desde então, o aterro encontra-se encerrado.

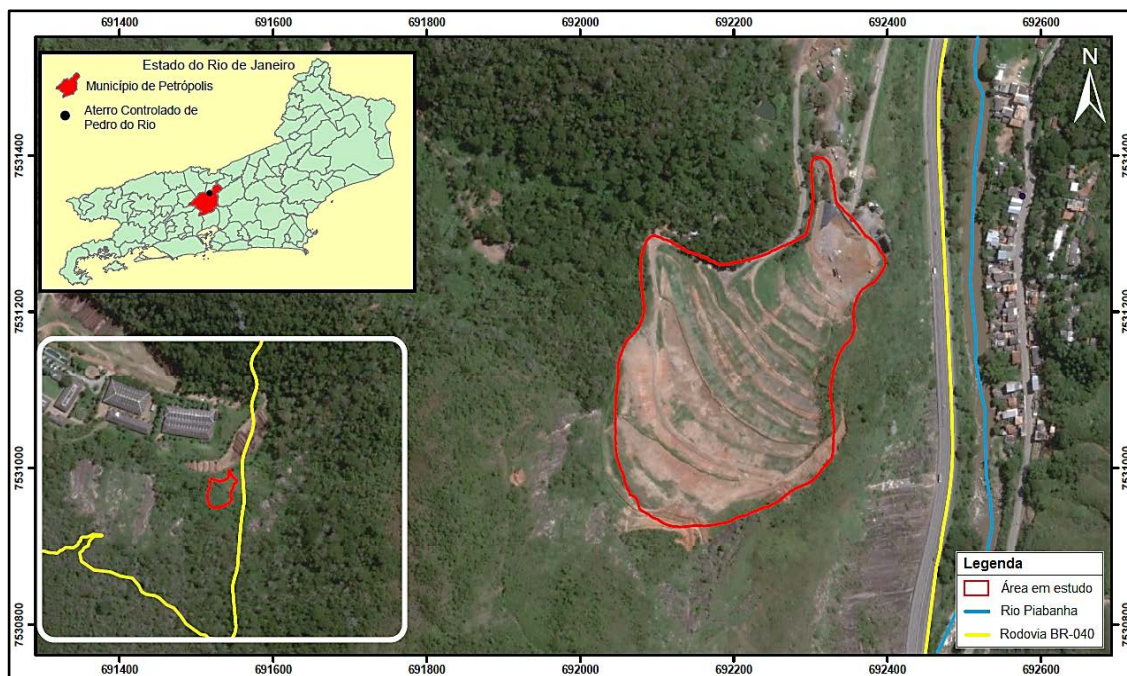


Figura 1. Mapa de localização da área em estudo (Fonte: Modificado de Google Earth, 2016).

Segundo o mapeamento geológico regional desenvolvido pelo CPRM (2012), o substrato do ACPR é composto predominantemente por rochas do Complexo Rio Negro, destacando-se a proximidade com o contato da Suíte Serra dos Órgãos. Também são apresentadas estruturas importantes, tais como: falhas, fraturas e zonas de cisalhamento. Embora nenhuma esteja mapeada dentro dos limites da ACPR, suas presenças na região, observadas em um raio de até 250m de entorno, sugere que estruturas menores podem estar presentes em seu substrato.

Também de acordo com CPRM (2012), o Complexo Rio Negro é uma unidade que apresenta relevante variação textural e composicional, sendo formada primordialmente por ortognaisses e anfibolitos. A Suíte Serra dos Órgãos, por sua vez, compreende um extenso corpo de dimensões quilométricas que aflora, principalmente, na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. Essa suíte é intrusiva nos ortognaisses do Complexo Rio Negro e em leucognaisses da Suíte Cordeiro. A unidade inclui granitos, granodioritos, dioritos e ortognaisses com biotita e/ou hornblenda, de granulação grossa e estrutura equigranular a levemente porfírica, geralmente com uma foliação incipiente e descontínua.

3 Materiais e Métodos

Para realização do levantamento geofísico foi adotado o método conhecido como Eletroresistividade (ER). Este, por sua vez, é baseado no estudo do potencial elétrico de campos naturais e/ou antropológicos. A partir da medição da resistividade na superfície, é possível determinar a existência de corpos minerais e reconhecer estruturas geológicas (TELFORD et al, 1990).

A resistividade elétrica é uma propriedade fundamental de cada material litológico. No entanto, um mesmo corpo pode apresentar uma gama de valores, uma vez que diversos fatores alteram a resistividade de um material. Os principais fatores que afetam a resistividade elétrica nos materiais geológicos próximos à superfície são: conteúdo de água, porosidade, salinidade e a composição mineralógica. Destaca-se como os mais relevantes, a quantidade de líquido contida e a sua salinidade (MCNEILL, 1980).

Segundo Gallas et al. (2005), a eletroresistividade é um método geofísico, pertencente ao grupo dos métodos geoelétricos, que usa uma fonte artificial de corrente elétrica, a qual é introduzida nas camadas da subsuperfície do solo por meio de eletrodos fixados na superfície do solo.

Dentro da metodologia de eletroresistividade há diversas técnicas de aquisição de dados, as quais podem ser agrupadas em duas categorias: sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico (CE). A primeira é utilizada para determinar a variação da resistividade ao longo da profundidade em um determinado

ponto, enquanto o último é utilizado para um estudo da variação lateral da resistividade em profundidades aproximadamente constantes. Ressalta-se o elevado grau de versatilidade do método, em função das possíveis configurações de arranjos dos eletrodos (i.e. Werner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo, dentre outros).

A partir das definições estabelecidas, o método de caminhamento elétrico foi escolhido para o presente levantamento, com o arranjo adotado sendo do tipo Wenner. Os trabalhos de campo no Aterro Controlado de Pedro do Rio foram executados entre os dias 13 e 16 de agosto de 2019. Durante a aquisição de caminhamento elétrico foi utilizado o equipamento Terrameter SAS 4000 com seletor de eletrodos ES 10-64e de 4 canais, ambos de fabricação da ABEM Instruments, bem como 2 cabos com 32 *take-outs* cada e espaçamento entre eles de três metros. Este conjunto constitui um sistema de multieletródos automatizado.

No processamento das seções de caminhamento elétrico, visando obter as resistividades elétricas verdadeiras a partir das seções de resistividades aparentes, foi utilizada a inversão Jacobiana recursiva, com filtragens e remoção de resistividades espúrias, objetivando a estabilização do erro na menor faixa possível. Estas inversões Jacobianas apresentaram boa convergência.

Objetivando uma delimitação do maciço de resíduos do aterro, foram estabelecidos cinco alinhamentos para auxiliar na execução do caminhamento elétrico, totalizando 1.713m de comprimento. Três seções se iniciaram no terço superior e seguiram em direção ao pé do aterro, finalizando no terço inferior (CE-01, CE-02 e CE-03). As demais seções, se contiveram nos terços superior e médio (CE-04 e CE-05).

A Figura 2 ilustra a locação das seções de caminhamento elétrico, ao passo que a Tabela 1 apresenta o comprimento total e as coordenadas e cotas (iniciais e finais) de cada uma delas.

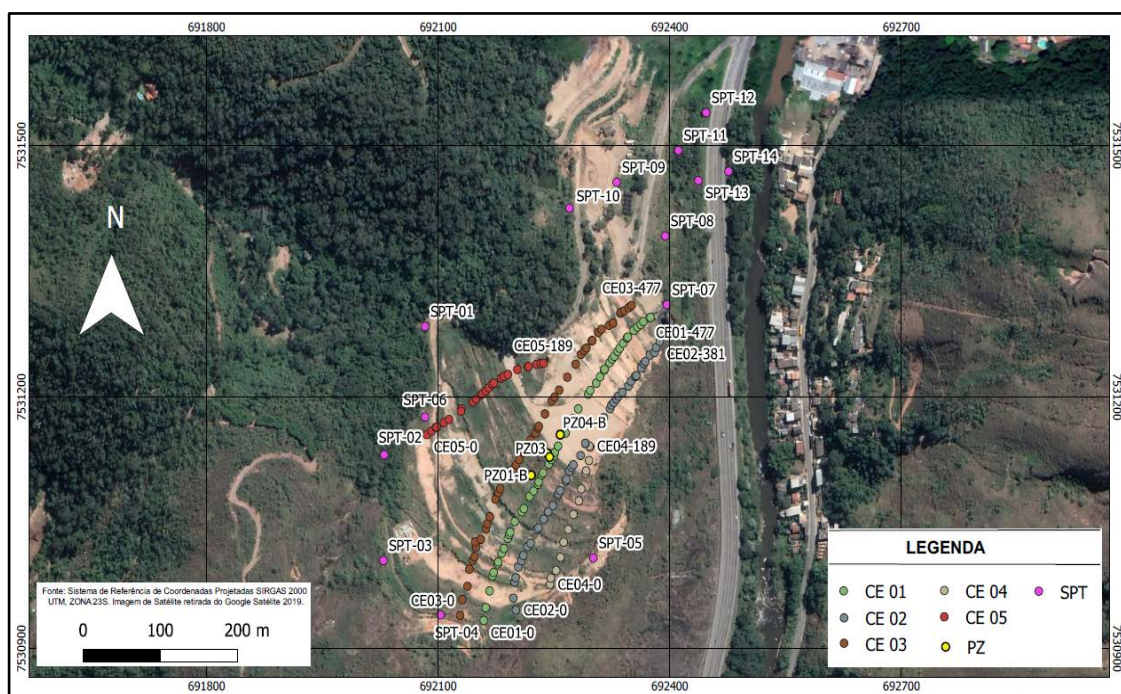


Figura 2. Mapa de localização das seções de caminhamento elétrico.

Tabela 1. Coordenadas e cotas das seções dos caminhamentos elétricos.

Seção	Comp. (m)	Coordenadas UTM - Início			Coordenadas UTM - Final		
		N (m)	E (m)	Cota (m)	N (m)	E (m)	Cota (m)
CE-01	477	7.530.933,45	692.158,86	744,63	7.531.294,83	692.374,97	669,06
CE-02	381	7.530.945,89	692.200,55	743,82	7.531.265,97	692.386,90	672,64
CE-03	477	7.530.939,25	692.128,23	745,09	7.531.309,17	692.350,54	673,30
CE-04	189	7.530.976,46	692.244,82	743,85	7.531.141,40	692.295,81	707,32
CE-05	189	7.531.155,19	692.085,25	735,03	7.531.240,26	692.236,23	696,35

Na análise das seções geofísicas foram consideradas Zonas de Baixa Resistividade (ZBR), associadas ao material do aterro, aquelas cujos valores se encontram abaixo de 20ohm.m, e associadas a presença de chorume aquelas com baixíssima resistividade, abaixo de 2ohm.m.

Como não há informação acerca da base do aterro, foram utilizados como critérios para a sua delimitação: a conformação do terreno (disposição em valas) e valores de resistividade associados a presença de chorume. É válido acrescentar que as seções de caminhamento elétrico não interceptaram as sondagens existentes, não sendo possível usá-las na delimitação do fundo.

Estudos comprovam que o chorume é um líquido caracterizado pela alta concentração de sais dissolvidos, cuja interação com o meio geológico resulta em alteração da capacidade resistiva do material. A presença de chorume aumenta o conteúdo iônico nestes locais, que facilita a propagação da corrente elétrica, resultado em zonas menos resistivas. Normalmente, os resultados sugerem uma redução da resistividade por percolação de chorume produzido em valas recentes, e aumento progressivo da resistividade em valas mais antigas.

4 Apresentação dos Resultados e Discussões

Com auxílio do software RES2DINV foram elaborados cinco perfis bidimensionais para facilitar a interpretação dos resultados, exibindo-os de forma gráfica. As seções do caminhamento elétrico permitiram a verificação da resistividade em profundidades de até 30m.

Na seção CE01 (Figura 3), verifica-se uma região relativamente mais superficial que apresenta uma maior variação nos valores de resistividade. No interior desta camada são observadas regiões de baixíssima resistividade, possivelmente associadas a camada de resíduos saturada em água e/ou chorume. Nesta seção, a espessura máxima de camada de aterro é de cerca de 25m.

Ainda, sob o platô intermediário, observa-se que uma destas regiões de menor resistividade se apresenta com prolongamento até a base da seção, indicando possivelmente que, neste ponto, o chorume está atravessando a base do aterro e migrando para camadas mais profundas em subsuperfície. Esta percolação pode estar ocorrendo devido à presença de alguma falha ou fratura na rocha. Observa-se também uma situação semelhante abaixo das cotas superiores do aterro. No entanto, visto que lateralmente não se observa uma grande variação dos valores de resistividade, indicando que esta região não se encontra dentre as camadas de disposição de resíduo. Possivelmente, nesta região existe uma zona de percolação de água subsuperficial.

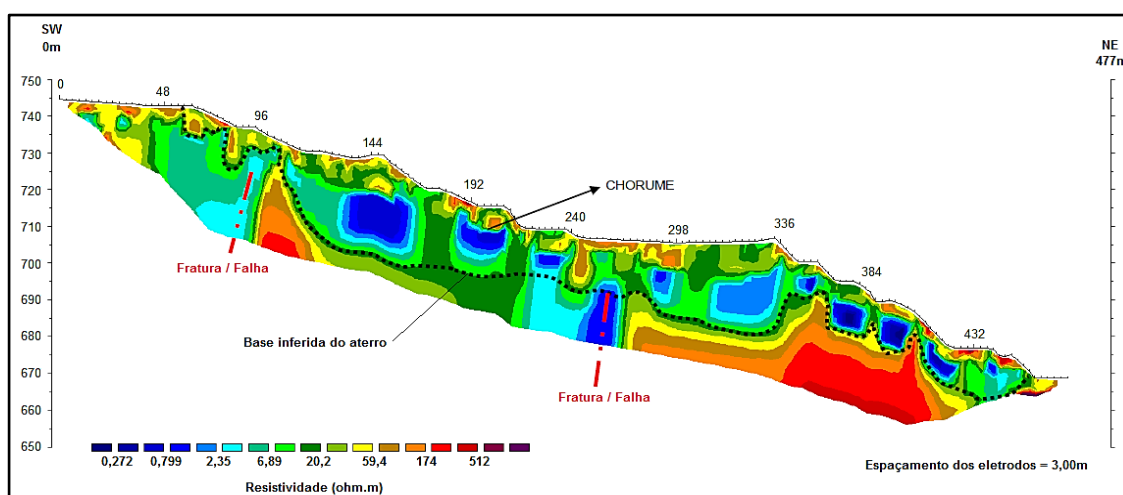


Figura 3. Seção de caminhamento elétrico CE-01.

Assim como na seção CE-01, as demais seções apresentam uma camada superficial com maior variabilidade da resistividade, associada à disposição de resíduos sólidos. Todas as seções apresentaram zonas de baixíssima resistividade que ultrapassam a base inferida do aterro. Este fato pode estar relacionado a existência de falhas ou fraturas que facilitam a percolação do lixiviado para camadas inferiores (Figuras 4 a 7).

Tendo em vista a variabilidade de materiais dispostos em um aterro controlado e a não uniformidade da compactação das camadas de disposição, observa-se uma maior variabilidade no intervalo dos valores de

resistividade quando a corrente elétrica aplicada passa pelo maciço de resíduos. Em contrapartida, na região do terreno natural, observa-se uma maior uniformidade nos valores de resistividade aparente.

As seções CE-01 e CE-03 apresentaram a maior espessura de resíduos. Por outro lado, a camada de resíduos menos espessa está na seção CE04, com cerca de 15m.

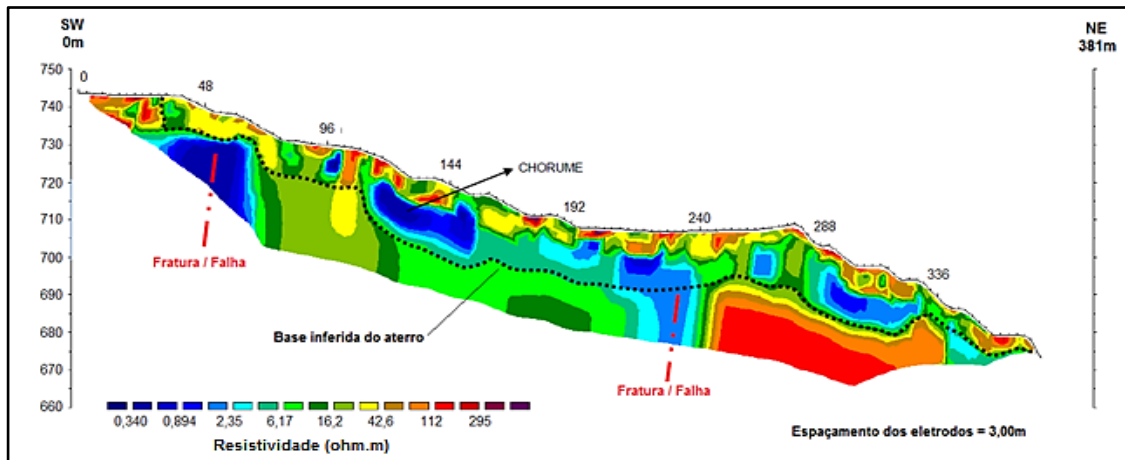


Figura 4. Seção de caminhamento elétrico CE-02.

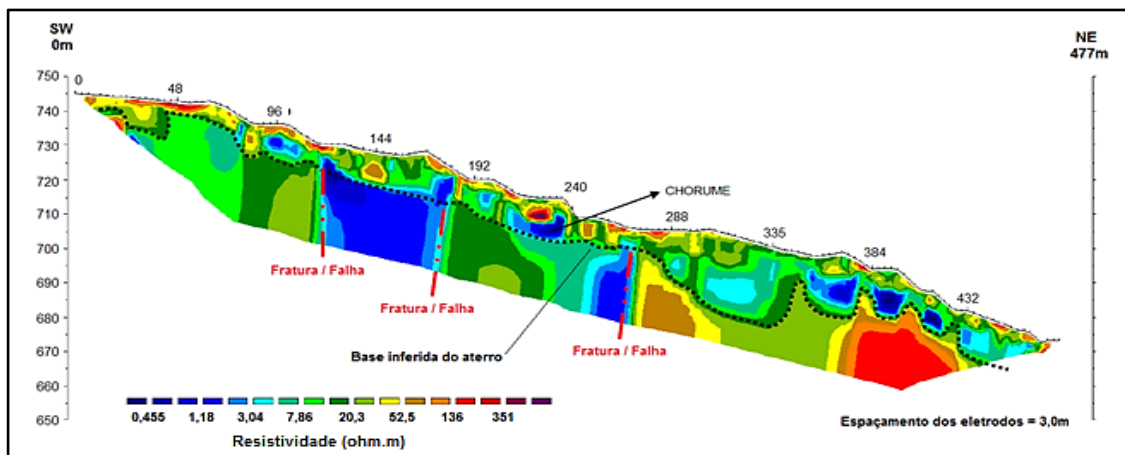


Figura 5. Seção de caminhamento elétrico CE-03.

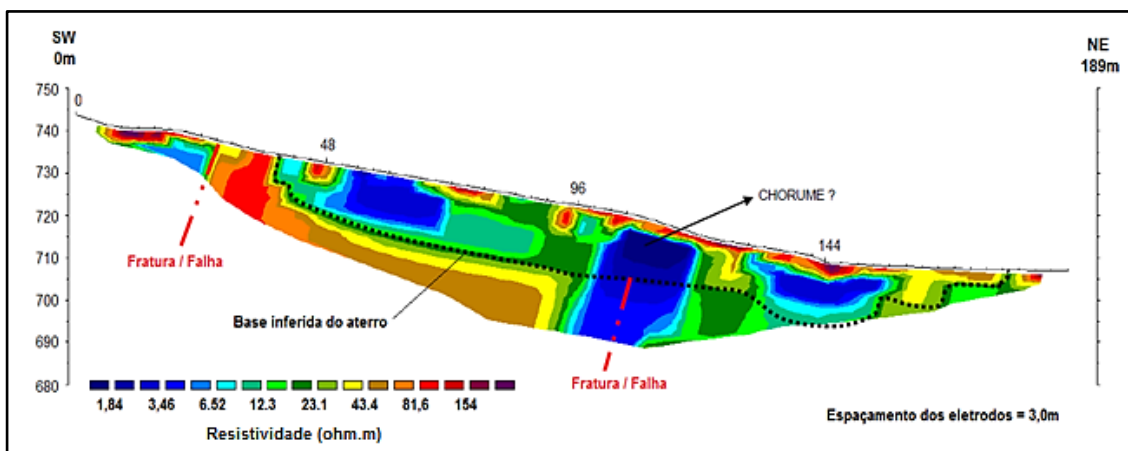


Figura 6. Seção de caminhamento elétrico CE-04.

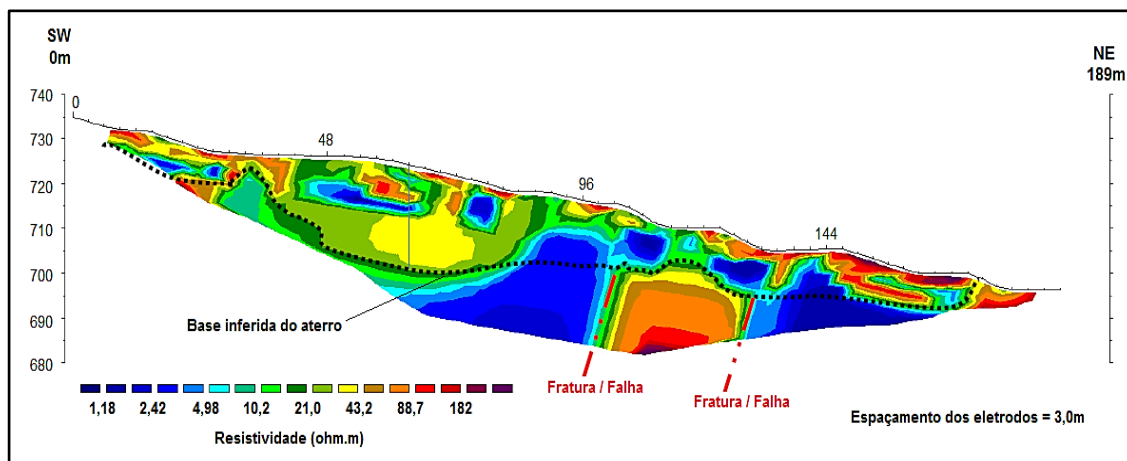


Figura 7. Seção de caminhamento elétrico CE-05.

De posse das seções e de forma a aprofundar a análise das feições observadas, foi efetuado uma inversão 3D das seções de eletrorresistividade, de forma a se gerar um modelo pseudo-3D de subsuperfície para análise tridimensional, como mostrado na Figura 8. Vale ressaltar que o ideal seria utilizar dados obtidos em uma aquisição de dados em 3D ou em uma malha regular. No entanto, devido as características da área, o modelo foi estendido a partir das seções 2D.

A partir da análise da distribuição dos valores de resistividade, observa-se que áreas de baixíssima resistividade, menos do que 2ohm.m, apresentam continuidade lateral, constituindo zonas preferenciais de migração de chorume. Em função destas regiões se estenderem para a base das seções, pode-se inferir que estas zonas tenham ultrapassado a base do aterro.

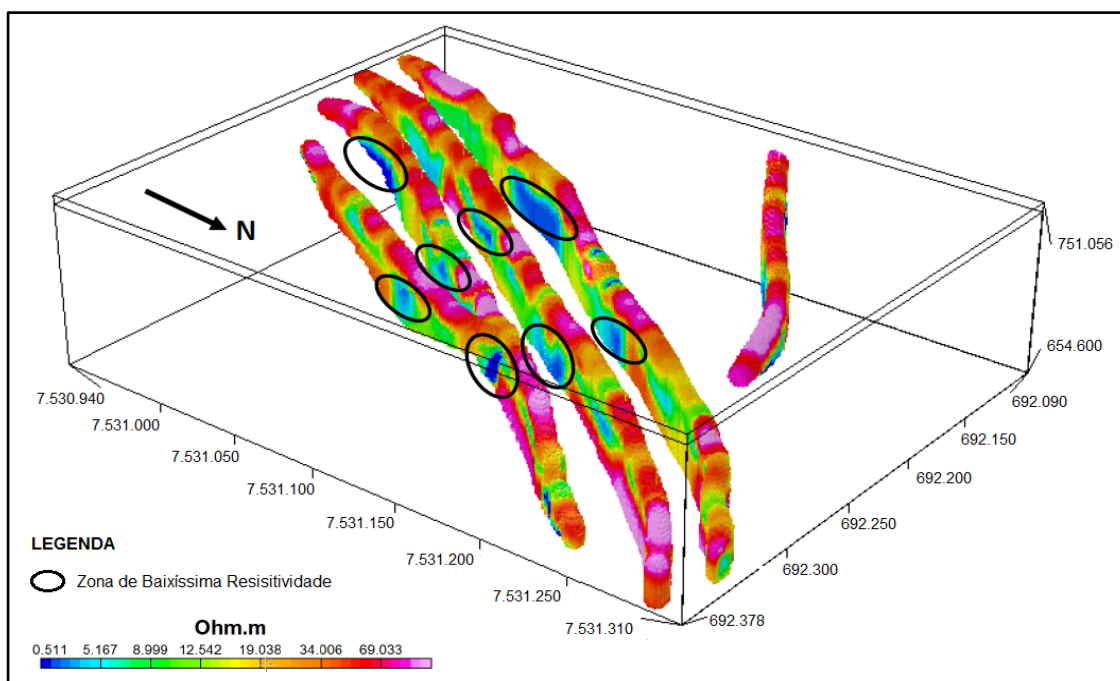


Figura 8. Modelo pseudo-3D de subsuperfície para análise tridimensional.

5 Considerações Finais

O método geofísico de eletrorresistividade apresentou bons resultados para o trabalho em questão, permitindo a delimitação de zonas possivelmente mais saturadas com água e/ou chorume, bem como, a delimitação da possível base do ACPR e pontos de fratura/falha na base rochosa subjacente.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Nas seções de caminhamento elétrico constata-se zonas de baixa resistividade, com valores de resistividade abaixo de 20ohm.m, relacionados ao material do aterro, além de zonas de baixíssima resistividade, menores que 2ohm.m, indicativas de zonas saturadas.

Tendo em vista a variabilidade de materiais dispostos em um aterro controlado e a não uniformidade da compactação das camadas de disposição, verifica-se uma maior variabilidade no intervalo dos valores de resistividade quando a corrente elétrica aplicada passa pelo maciço de resíduos. Por outro lado, na região do terreno natural, há uma maior uniformidade nos valores de resistividade aparente.

A espessura do aterro varia de aproximadamente 15 (quinze) metros na porção oeste, seção CE-04, até 25 (vinte e cinco) metros na parte central, seções CE-01 e CE-03.

Em vista dos resultados obtidos, dado que as sondagens existentes estavam localizadas na periferia do maciço, não interceptando os caminhamentos elétricos, recomenda-se que sejam realizadas sondagens adicionais com o intuito de calibrar e auxiliar na interpretação geofísica, para posterior validação e ajuste da profundidade do aterro mapeado nas seções geofísicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa GeoPhysical Consulting Services que, gentilmente, forneceu o relatório de levantamento geofísico de eletrorresistividade e autorizou a publicação dos resultados, e igualmente à ALTA Geotecnia Ambiental, responsável técnica pelo Diagnóstico Geoambiental e Projeto Executivo de Encerramento do empreendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brasil (2010). *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências*. Brasília: Diário Oficial da União.
- Cavalcanti, M. M. (2013) *Aplicação de métodos geoeletricos no delineamento da pluma de contaminação nos limites do Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília – DF*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 111p.
- Gallas, J. D. F.; Taioli, F.; Silva, S. M. C. P. (2005) Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(1), p.51-59.
- Iamondi, G. V. (2009) *Geofísica aplicada no diagnóstico preliminar do antigo lixão do município de Rio Claro-SP*. Trabalho de Conclusão (Engenharia Ambiental), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 66 p.
- Laureano, A. T. (2007) *Estudos geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá-MT*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso. 149 p.
- McNeill, J. D. (1980) Technical Note TN-5: Electrical conductivity of soils and rocks. *Geonics Limited*. Ontario. 22 p.
- Reynolds, J. M. (1997) *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons, Chichester, England. 795 p.
- Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2012). *Geologia e recursos minerais da folha Três Rios SF.23-Z-B-I. Escala 1:100.000*. Programa Geologia do Brasil, Belo Horizonte.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, E. E. (1990) *Applied geophysics*, 2nd ed, Cambridge University Press, Cambridge, England. 760 p.