

**GEOFÍSICA APLICADA À CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA E ESTRUTURAL DE ATERRO E FUNDAÇÃO DE PILHA DE ESTÉRIL**

Daniel Gonçalves Costa Dias<sup>1</sup>; Wellison Martins Fonseca<sup>2</sup>; Fábio Soares Magalhães<sup>3</sup>; Renata Mattos Sampaio De Araujo Andrade<sup>4</sup>; Amanda de Sales Marotta da Silva<sup>5</sup>; Frank Marcos da Silva Pereira<sup>6</sup>

**Resumo** – A caracterização geológico-geotécnica e estrutural de qualquer estrutura geotécnica e sua fundação é comumente realizada a partir de aplicação de métodos diretos, tais como: mapeamento de superfície, furos de sondagem, coleta de amostras indeformadas e deformadas entre outros. Embora tais investigações sejam as melhores técnicas de se observar os materiais em subsuperfície, os métodos diretos são limitados, isto é, eles se constituem em informações pontuais e, por isso, a caracterização é realizada por meio de interpretação e extrapolação. Dentro desse contexto, a geofísica aplicada se torna ferramenta fundamental, pois, constitui-se de um método não destrutivo que abrange áreas relativamente grandes que, associada com as investigações diretas, proporciona uma interpretação mais fidedigna. O intuito desse trabalho é correlacionar as anomalias de eletrorresistividade com as investigações diretas, a fim de se obter uma completa caracterização geotécnica da estrutura investigada e de sua fundação. Para isso, foram confrontadas as seções geológico-geotécnicas elaboradas a partir dos furos de sondagem e mapeamento de superfície com as seções geofísicas. Essa correlação se mostrou muito aderente, corroborando, em grande parte, para o manutenção da interpretação outrora elaborada.

**Abstract** – The geological-geotechnical and structural characterization of any geotechnical structure and its foundation is commonly performed by applying direct methods, such as: surface mapping, drilling holes, collection of undeformed and deformed samples, among others. Although such investigations are the best techniques for observing subsurface materials, direct methods are limited, that is, they are specific to specific information and, therefore, the characterization is performed through interpretation and extrapolation. Within this context, applied geophysics becomes a fundamental tool, since it constitutes a non-destructive method that covers relatively large areas and associated with direct investigations, provides a more reliable interpretation. The objective of this work is to correlate the terrestrial electrical resistivity anomalies obtained from a survey with direct investigations to obtain a complete geotechnical characterization of the investigated structure and its foundation. To this end, the geological-geotechnical loads prepared from the drilling holes and surface mapping were compared with the geophysical loads. This demonstration proved to be very consistent, largely corroborating the maintenance of the previously prepared interpretation.

**Palavras-Chave** – Caracterização geológico-geotécnica, Geologia estrutural; eletrorresistividade; pilha de estéril; fundação.

---

<sup>1</sup> Geol, Especialista em Geotecnia, Walm BH Engenharia, (31) 99354-4192, daniel.dias@walmengenharia.com.br  
<sup>2</sup> Geol, Especialista em Geotecnia, Walm BH Engenharia, (31) 99589-9704, wellison.fonseca@walmengenharia.com.br  
<sup>3</sup> Geol, Dr, Walm BH Engenharia, (310 99423-0710), fabio.magalhaes@walmengenharia.com.br  
<sup>4</sup> Engenheira Geotécnica, M.Sc., Vale S.A, (31) 99574-9776 renata.mattos.sampaio@vale.com  
<sup>5</sup> Engenheira Geotécnica, Especialista em Geotecnia, LPC Latina, (31) 9992-2807, C0673892@vale.com  
<sup>6</sup> Engenheiro Geotécnico, M.Sc., Vale S.A, (31) 98637-4099, frank.pereira@vale.com

## 1. INTRODUÇÃO

Pilhas de estéril (PDE) são caracterizadas como estruturas de disposição de materiais oriundos das mais variadas procedências. Elas têm ganhado notoriedade nos últimos anos dada as suas dimensões, que chegam a modificar a morfologia local.

A caracterização geológico-geotécnica e estrutural de qualquer estrutura e sua fundação é comumente realizada a partir da aplicação de métodos diretos, tais como: mapeamento de superfície, furos de sondagem, entre outros. Embora tais investigações sejam as melhores técnicas para se observar os materiais em subsuperfície, os métodos diretos são limitados, isto é, eles se constituem em informações pontuais e, por isso, a caracterização é realizada por meio de interpretação e extrapolação. Dentro desse contexto, a geofísica aplicada se torna fundamental, pois, constitui-se de um método não destrutivo que pode abranger áreas relativamente grandes que, associada com as investigações diretas, proporciona uma interpretação mais consistente da caracterização geológico-geotécnica e estrutural.

## 2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA INVESTIGADA

A estrutura investigada consiste numa pilha de estéril de mineração localizada na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero (Qfer), mais especificamente na região do Sinclinal Gandarela. A Figura 1 mostra o mapa de localização da área.



Figura 1. Localização da área de estudo investigada.

## 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

### 3.1. Geologia Regional

A área de estudo está inserida na região nordeste do Sinclinal Gandarela, Quadrilátero Ferrífero (Qfer) – MG (Dorr *et al.*, 1957), uma das mais importantes províncias metalogenéticas brasileira, situada no extremo sul do Cráton São Francisco (Almeida, 1977). A estratigrafia da região do Quadrilátero Ferrífero compreende sete principais unidades litoestratigráficas (Endo *et al.*, 2020):

- Complexos Metamórficos, constituídos de gnaisses bandados ou não, migmatitos, granitóides anfíbolitos e corpos máficos/ultramáficos;
- Supergrupo Rio das Velhas, constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas, metavulcanoclásticas e por rochas metavulcânicas félsicas, máficas e ultramáficas;
- Supergrupo Minas, constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas;

- Supergrupo Estrada Real, constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas e por rochas metavulcânicas félsicas, máficas e ultramáficas;
- Grupo Barbacena, constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas e por rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas;
- Supergrupo Espinhaço, constituído majoritariamente por metarenitos e metaconglomerados;
- Unidades sedimentares, correspondentes às coberturas do Paleógeno ao Holoceno, constituídas por sedimentos terrígenos.

### 3.2. Caracterização geológica-geotécnica

A partir das campanhas de investigação diretas realizou-se o reconhecimento das características geológico-geotécnicas e estruturais tanto do aterro como da fundação sobre a qual se assenta a estrutura geotécnica investigada. Na Figura 2 é apresentada uma figura esquemática que mostra as principais características dos materiais identificados.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA	PERFIL DE ALT.¹	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA	REGISTRO FOTOGRÁFICO
Aterro de Pilha	Aterro	Textura composta por areia com porções variando para solos finos (argila e silte) de cor variegada (marrom claro e escuro, branco e ocre). A consistência varia de mole (NSPT < 2) a dura (NSPT >30). O coeficiente de permeabilidade possui valores média e mediana são de 4,58-03 cm/s e 3,88-02 cm/s, respectivamente.	
Coberturas Recentes	Colúvio	Textura arenosa com pequena presença de argila, ocorre também grânulos esféricos ferruginosos, sua coloração é marrom escura. A consistência deste material é predominantemente mole (NSPT 3 a 5). O coeficiente de permeabilidade obtido foi de 4,39x10-04 cm/s.	
Formação Gongo Soco	Sedimento Cenozoico	Textura areno-siltosa a silto-argilosa com pouca areia e presença de pedregulhos esparsos de manganês (concreções arredondadas). Plasticidade varia de nula a baixa. A consistência deste material é predominantemente muito rija (NSPT 20 a 30) a dura (NSPT > 30). O coeficiente de permeabilidade possui valores média e mediana são de 1,37E-02 cm/s e 1,37E-02 cm/s, respectivamente.	
Formação Gandarela	Xisto Manganífero	textura predominantemente silto-arenosa, a areno-siltosa. Subordinadamente, tem-se argila com areia fina de cor preta, manganésifera de plasticidade baixa. A coloração é variegada (ocre, cinza, marrom claro e escuro e branco). Resistência que varia de extremamente branda (R0) a muito branda inferir (R1-). O grau de alteração consiste em rocha completamente alterada (W5).	
Formação Gandarela	Solo Residual Jovem	Textura que varia de silte pouco argiloso a silte arenoso, micáceo com presença de manganês. Também apresenta estrutura reliquiar preservada. Plasticidade baixa e cor variegada (cinza escuro, preto, marrom e ocre). A consistência deste material se dispõe de forma variável. No geral, a consistência é rija (NSPT 11 a 19).	
Formação Gandarela	Rocha compacta	Rocha carbonática compacta de granulação fina constituída por calcita, dolomita, sulfeto, magnetita e clorita. O grau de resistência varia de resistente (R4) a muito resistente (R5). O grau de alteração, por sua vez, é de rocha levemente alterada (W2) a rocha sã (W1).	

Figura 2. Perfil estratigráfico esquemático dos materiais identificados a partir das investigações diretas

Por meio de mapeamento geológico-geotécnico e estrutural foram observadas, para além da distribuição dos materiais em superfície, algumas falhas nas formações Gongo Soco (Saadi *et al.*, 1992), Gandarela e Cauê dispostas no entorno da estrutura investigada. A maioria das falhas detectadas desenvolvem deslocamentos discretos, de centímetros a dezenas de metros, se aproveitando de anisotropias pré-existentes com movimentos normal, reverso e direcional (transcorrente). Estes planos de falhas foram observados predominantemente no depósito terciário e localmente nos xistos das Formações Gandarela e Cauê. Em suma, foram identificadas falhas normais, reversas e direcionais como estruturas notáveis desenvolvidas sobre os litotipos das unidades cenozoicas. Já no embasamento (Formação Gandarela), o falhamento ocorre em um padrão de *horsts and grabens* com orientação das calhas segundo NW-SE.

Em geral as falhas possuem superfícies lisas, estriadas e ligeiramente curvas. Como pode ser visto no estereograma abaixo (Figura 4) foram reconhecidas cinco famílias de falhas, F11 (279/70), F12 (234/62), F13 (172/60), F14 (77/78) e F15 (315/57) com orientação N-S, NW-SE e NE-SW e E-W, assim como observado para as famílias de fraturas Fr1 (28/84), Fr2 (312/87), Fr3 (278/88) e F4 (170/50). Em campo foram coletadas um total de 45 medidas de planos de falhas distribuídos ao longo dos litotipos citados acima. Em alguns pontos o plano das falhas apresenta-se subverticalizado, sendo essa condição interpretada como resultado do aproveitamento de fraturas subverticais em que o desconfinamento/abertura gera o abatimento relativo do maciço resultando na geometria de *horst and grabens* (Figura 3).

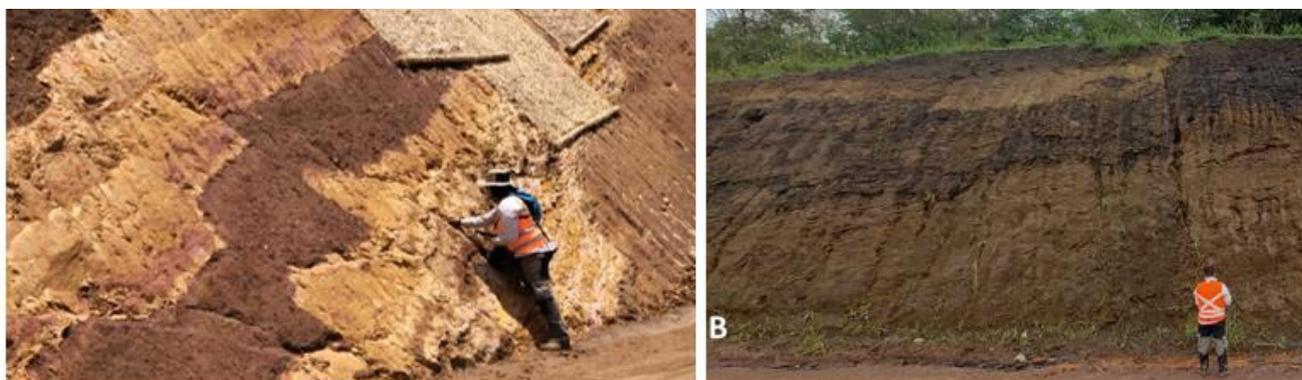


Figura 3. Falhas identificadas em mapeamento geológico-geotécnico e estrutural de superfície.

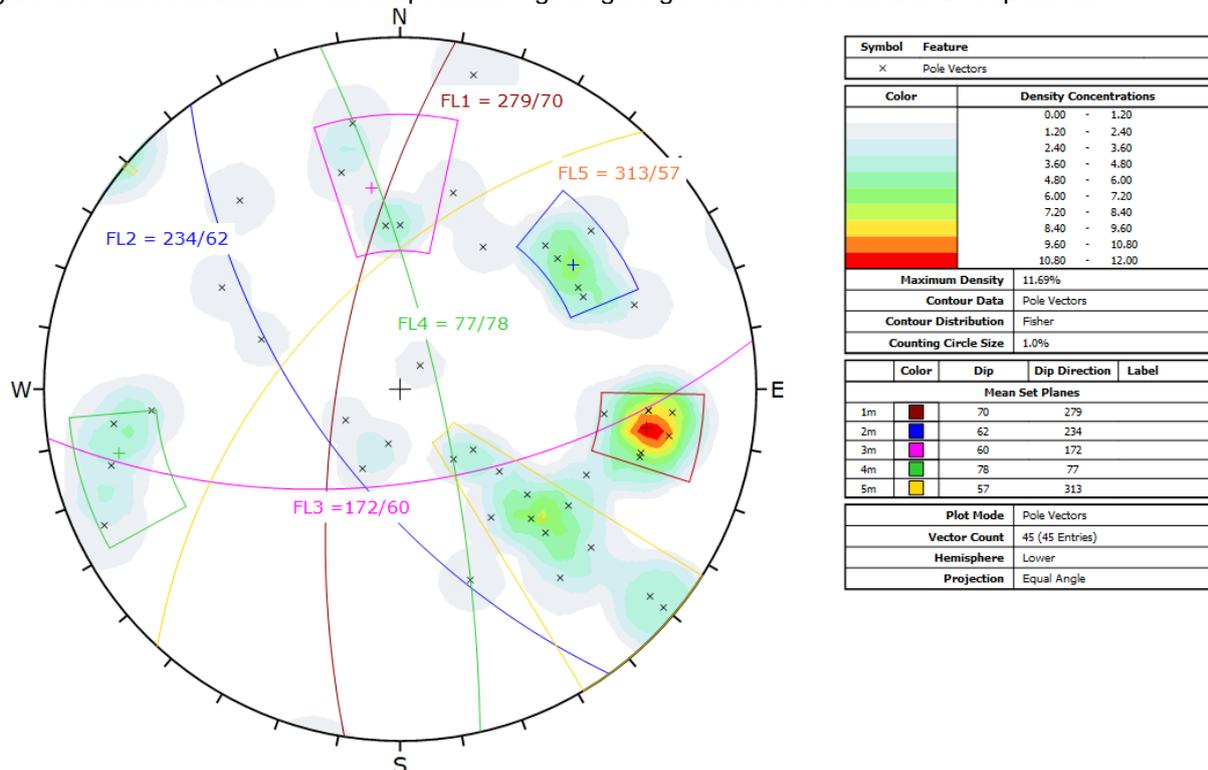


Figura 4. Estereograma de falhas com distribuição em cinco famílias, F11 (279/70), F12 (234/62), F13 (172/60), F14 (77/78) e F15 (315/57), demonstrando grande dispersão.

Ao se observar os testemunhos de alguns furos de sondagem mista, foi constatado grandes contrastes nas profundidades entre o topo rochoso de rocha carbonática manganésifera e seu solo de alteração, em regiões muito próximas linearmente. O furo SM-22-PDE testemunhou rocha sã a 25 m de profundidade, e no furo SM-24-PDE, distante 50 m do furo anterior, não houve interceptação do topo rochoso, tendo o furo se desenvolvido com 120 m de profundidade. Essa discrepância estratigráfica pode ser justificada pela presença de uma falha (normal e/ou reversa).

#### 4. LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

Segundo Souza e Gandolfo (2018), a geofísica é a ciência que estuda as estruturas e os materiais em sub-superfície, sendo eles delimitados a partir dos contrastes de suas propriedades físicas com o meio circundante. Para tal, é realizada medições na superfície do terreno ou na água, em furos de sondagens ou por meio de levantamentos aerotransportados. Os levantamentos geofísicos são considerados métodos de investigação indiretos e não-destrutivos. Conforme Souza e Gandolfo (2021), o método de eletrorresistividade constitui-se na injeção de uma corrente elétrica de intensidade conhecida no terreno, utilizando, para isto, dois eletrodos de emissão e posterior medição da diferença de potencial resultante da passagem desta corrente, por meio de outros dois eletrodos. Este método permite mapear anomalias de baixa resistividade elétrica que podem ser associadas as unidades geológico-geotécnicas em subsuperfície, ao nível d'água, indicar a posição do sistema de drenagem interna de uma barragem, entre outros.

O levantamento geofísico foi realizado buscando-se abranger toda a estrutura, sobretudo as regiões em que foram elaboradas seções geológicas geotécnicas. As metodologias do Imageamento Elétrico Bidimensional, também conhecido por Tomografia Elétrica 2D (Eletrorresistividade) com a finalidade de mapear anomalias geofísicas e, por fim, correlacioná-las com as investigações diretas. Ao todo, foram realizadas 53 linhas de caminhamento geoeletrico (Figura 5)

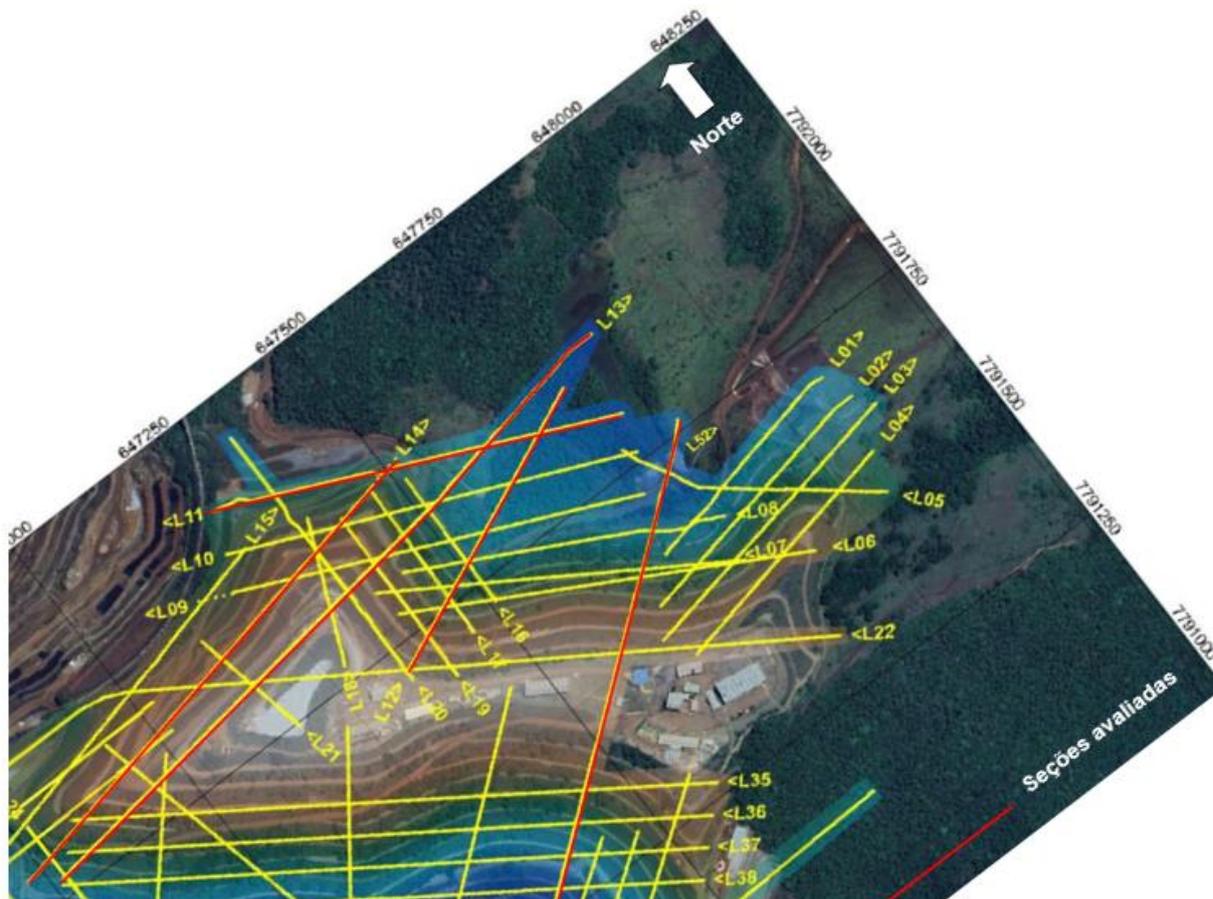


Figura 5. Localização das linhas geofísicas e seções geotécnicas.

A partir desse levantamento foram elaborados mapas, seções 2D e um modelo 3D integrado gerado pela integração das informações oriundas dos perfis geofísicos 2D.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de que o modelo geológico-geotécnico e estrutural, concebido a partir de análise de furos de sondagem mista e mapeamento de superfície se tornasse mais representativo, ele foi confrontado com os resultados do levantamento geofísico (método de eletrorresistividade) com o intuito de correlacionar as anomalias com as características geotécnicas dos materiais identificados.

### SEÇÃO C vs L52

A Seção geológico-geotécnica C foi elaborada a partir da interpretação dos testemunhos de seis furos de sondagem, sendo eles: SM-11-PDE, SM-12-PDE, SM-13PDE, SM-21-PDE, SM-36-PDE e SM-BSS-09.

Em síntese, têm-se do topo para a base: aterro de pilha, colúvio, sedimentos cenozoicos, solo residual jovem e a rocha carbonática compacta.

A partir da análise da seção geofísica de eletrorresistividade L52 pode-se agrupar as anomalias em três grupos principais, sendo elas denominadas baixa resistividade (250 a 600 Ohm.m), intermediária resistividade (600 a 3000 Ohm.m) e alta resistividade (> 3000 Ohm.m).

Anomalias de baixa resistividade (250 a 600 Ohm.m) são encontradas tanto no aterro como na fundação. Como o nível d'água se encontra próximo a fundação, essa anomalia no aterro pode ser associada a contraste entre as características geotécnicas do material, tais como: umidade, grau de compactação, porosidade, entre outras. Em contrapartida, na fundação, essa anomalia perpassa tanto nos solos saturados como nas rochas carbonáticas, exibindo, portanto, contrastes de resistividade que podem ser associados tanto a diferenças texturais como ao grau de saturação dos materiais, bem como das estruturas geológicas. Vale destacar que a assinatura de baixa resistividade entre os furos SM-11-PDE e SM-21-PDE, pode ser associada a existência de um baixo estrutural não interpretada nas seções geológico-geotécnicas.

Anomalias de intermediária resistividade (600 a 3000 Ohm.m) apresentaram abrangência por toda a seção e não tiveram boa relação geométrica com os contatos geológico-geotécnicos traçados. É importante notar que ocorrem, na região do aterro da pilha, anomalias de alta resistividade (>3000 Ohm.m) de forma localizada e superficial. Tais fenômenos podem estar relacionadas a diferença de porosidade entre as camadas (além da baixa umidade), uma vez que aterros tendem a ser menos adensados nas suas porções mais superficiais. O ensaio de  $N_{SPT}$  mostra que os primeiros 10 m do aterro apresentam, em média, valores abaixo de 15, enquanto em profundidades maiores, esse valor tende a ficar maior chegando ao máximo de 50.

Anomalias de alta resistividade (3000 a 7500 Ohm.m) tiveram ocorrências principalmente na região dos furos SM-11-PDE e SM-12-PDE. Ela é associada a rocha carbonática sã, identificada nos furos supracitados que possui grau de resistência variando entre R3 (medianamente resistente) a R5 (muito resistente) e grau de fraturamento F2 (pouco fraturada). Tais características geomecânicas tendem a restringir a passagem da corrente elétrica ocasionando, portanto, elevada resistividade.

Outro aspecto importante da anomalia de alta resistividade é a sua geometria, cujos limites estão dispostos de maneira subvertical, evidenciando ainda mais uma possível presença de falha, também identificada na linha 12 e nos furos de sondagem SM-03-PDE e SM-23-PDE.

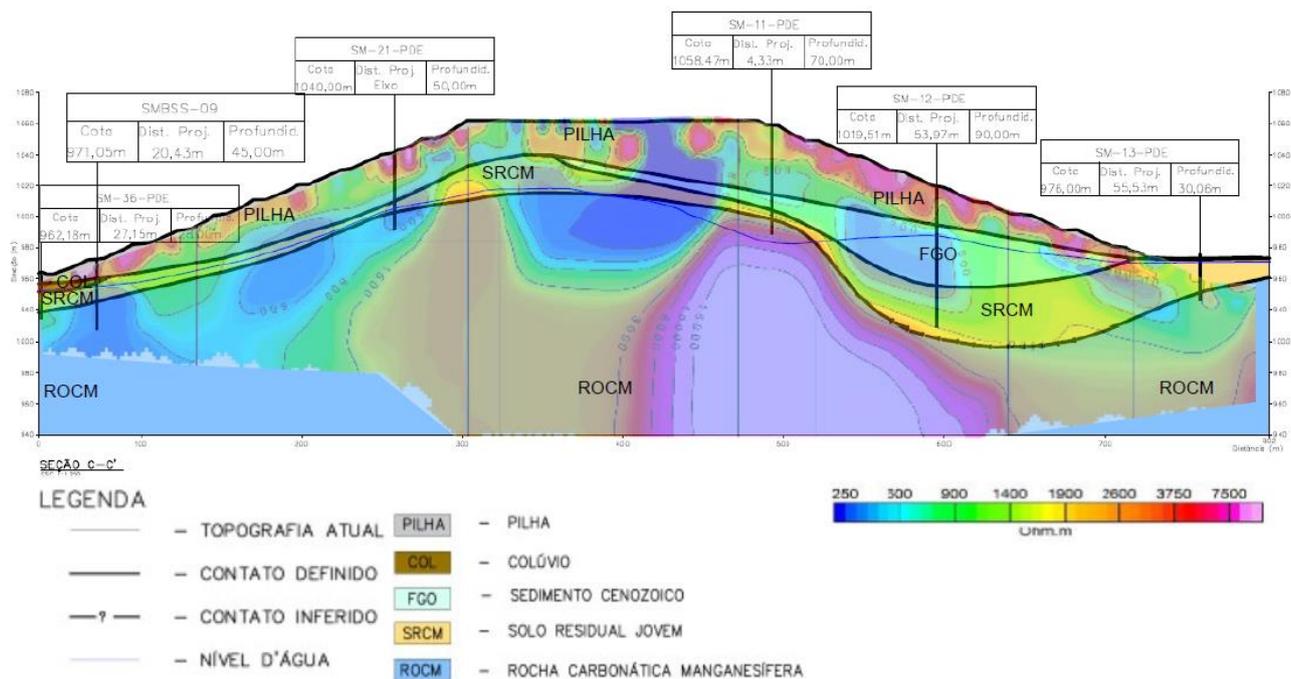


Figura 6. Seção geológico-geotécnica C-C' e linha geofísica 52.

### SEÇÃO D vs L12

A Seção geológico-geotécnica D foi elaborada a partir da interpretação dos testemunhos de cinco furos de sondagem, sendo eles: SM-01-PDE, SM-03-PDE, SM-22-PDE, SM-23-PDE e SM-24-PDE.

Em síntese, têm-se do topo para a base: aterro de pilha, sedimentos cenozoicos da Formação Gongo Soco, solo residual e a rocha carbonática compacta. O contato entre essas unidades foi interpretado como abrupto.

A partir da análise da seção geofísica de eletrorresistividade L12, pode-se agrupar as anomalias em três grupos principais, sendo elas denominadas baixíssima resistividade (250 a 600 Ohm.m), intermediária resistividade (600 a 3000 Ohm.m) e alta resistividade (> 3000 Ohm.m).

Anomalias de baixa resistividade (250 a 600 Ohm.m) estão dispostas na porção mais superficial, cuja localização está os furos SM-03-PDE e SM-22-PDE. Esta região é composta por dois materiais, o colúvio e o solo residual jovem que tem consistência de muito mole ( $N_{SPT} \leq 2$ ) a mole ( $N_{SPT}$  3 a 5). Além disso, o nível d'água medido nos furos evidencia que ele se encontra localizado no solo residual jovem. Por isso, tais anomalias podem estar associadas ao contraste de resistividade entre o solo de baixa consistência saturado e a rocha carbonática compacta.

Anomalias de intermediária resistividade (600 a 3000 Ohm.m) possuem uma abrangência por toda a seção. Logo, ela ocorre tanto no aterro como na fundação da pilha (depósitos cenozoicos) estando, predominantemente, acima do nível d'água. No aterro, estes valores podem se associar a alta porosidade, uma vez que esta unidade é constituída por uma grande diversidade de materiais com características distintas, sobretudo granulométricas. Na fundação, por outro lado, ela pode estar associada as diferenças texturais encontradas no depósito cenozoico que ora possui maior conteúdo de argila, ora possui maior conteúdo de areia.

É importante notar que ocorrem, na região do aterro da pilha, anomalias de alta resistividade (>3000 Ohm.m) de forma localizadas. Tais fenômenos podem estar relacionados a presença de blocos de rochas compactas (além da baixa umidade), as quais foram observadas durante o mapeamento geológico-geotécnico de superfície ou a regiões de maior porosidade tal qual já elucidado anteriormente.

Anomalias de alta resistividade (3000 a 15000 Ohm.m) apresentaram principal ocorrência na região dos furos SM-03-PDE e SM-23-PDE. O substrato neste local é constituído por rocha carbonática sã e compacta, que possui o grau de resistência variando de R4 (resistente) a R5 (muito resistente) e grau de alteração R1 (rocha sã). O grau de fraturamento é F1 (muito pouco fraturada). Tais características geotécnicas tendem a restringir a passagem da corrente elétrica. O contato entre a anomalia de baixa e alta resistividade nesta região se limita ao contato entre o solo residual e a rocha, o que se mostra coerente, visto que há um grande contraste de resistividade entre eles.

É importante ressaltar que na região do furo SM-22-PDE, a rocha carbonática foi identificada com 25 m. Entretanto, nesta região, as anomalias são ultrapassam 600 Ohm.m. Isto pode ocorrer em detrimento da presença no nível d'água nesta região, que permite que a corrente seja conduzida com menor resistência.

Por fim, observa-se que a geometria das anomalias de alta eletrorresistividade (> 1500 Ohm.m) entre os furos SM-22-PDE e SM-23-PDE se encontra subverticalizada, o que corrobora para a interpretação de que nesta região a uma falha, cujo seu principal indicativo é a discrepância entre a posição do topo rochoso identificado nos furos SM-22-PDE e SM-24-PDE, tal qual já mencionado anteriormente.

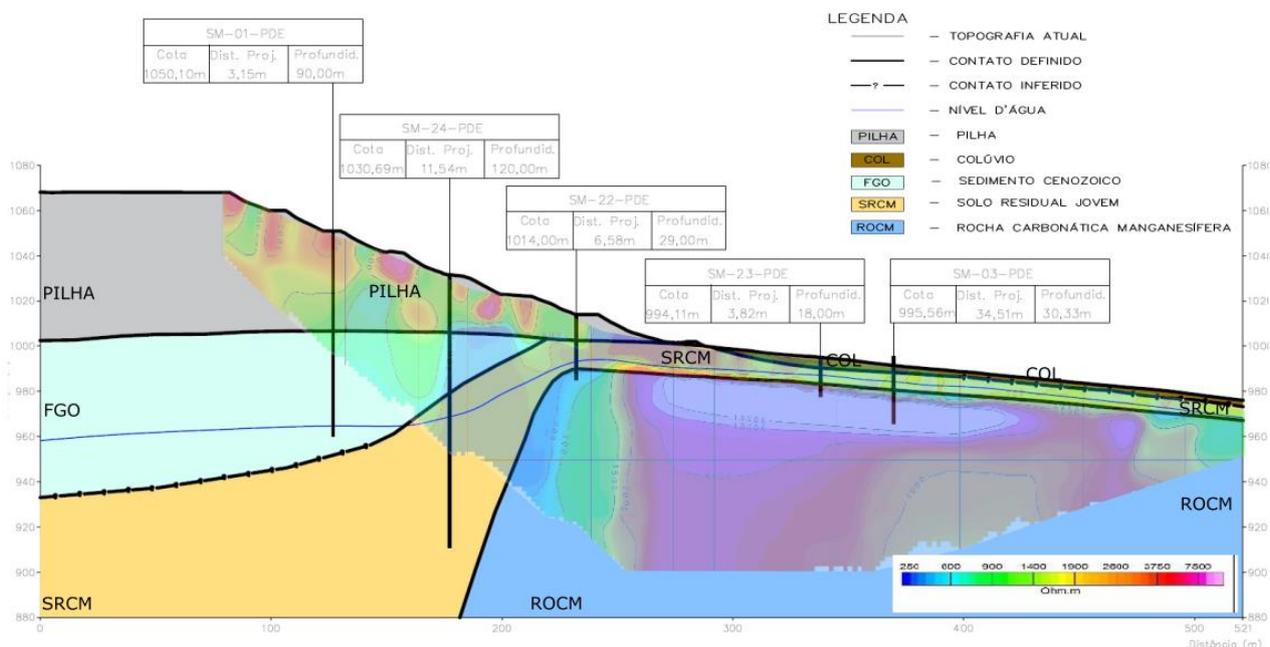


Figura 7. Seção geológico-geotécnica D-D' e linha geofísica 12.

Ao se avaliar os perfis geofísicos das linhas 11, 12, 14 e 52, pode-se averiguar diversas anomalias as quais podem estar correlacionadas ao sistema de falhas identificadas durante o mapeamento geológico de superfície e a avaliação dos testemunhos de sondagem tal qual abordado anteriormente.

Dentro desse contexto, foi traçado um plano seguindo a direção dessas descontinuidades, anomalias cuja atitude obtida foi de 220/ 70 (*dip direction/dip*), ou seja, NE-SW. Tal orientação se associa aproximadamente a família de falhas denominada FL2 (234/62), dispostas segundo NW-SE (Figura 4).

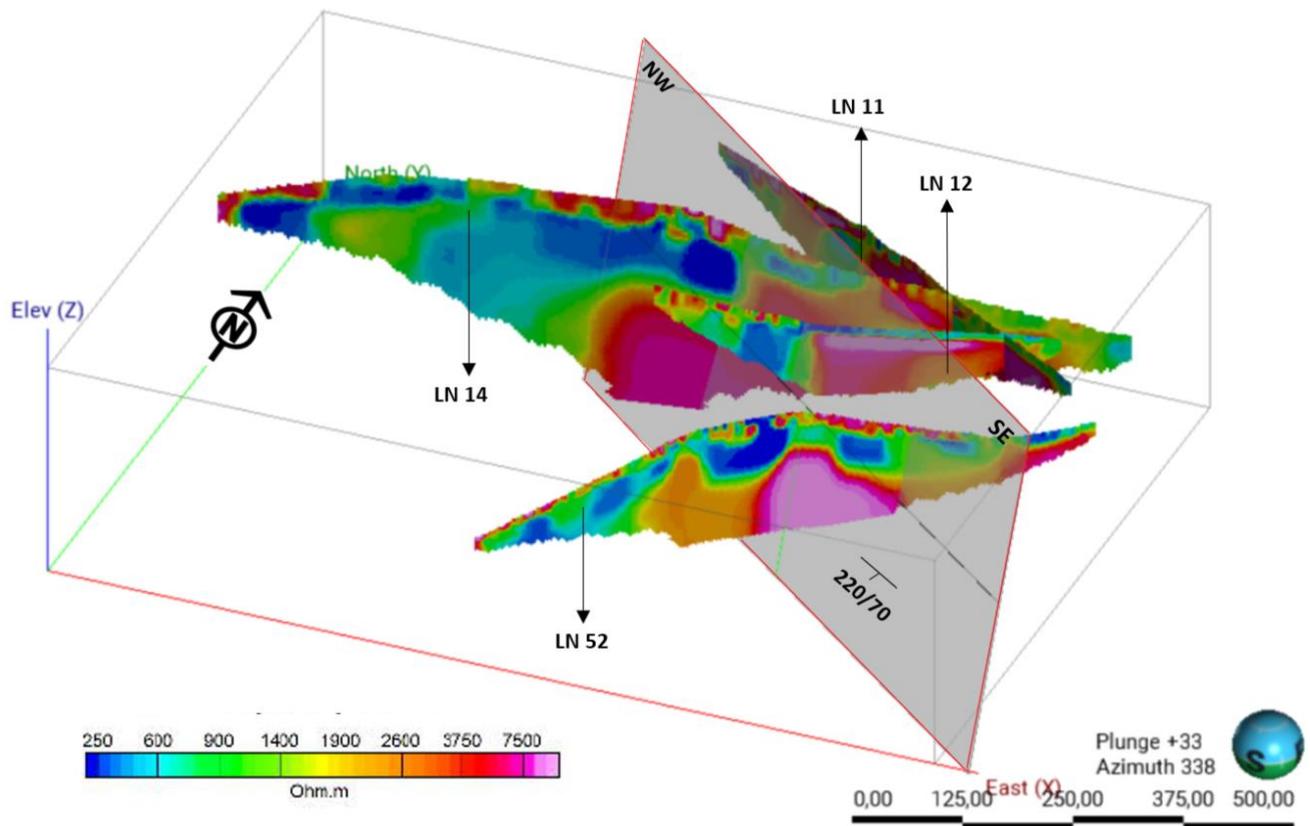


Figura 8. Seções geofísicas evidenciando anomalias de eletroresistividade com geometria verticalizada.

Esta avaliação corrobora para o entendimento de que a região possui estruturas geológicas cuja geometria se dá por intermédio de falhas que desenvolvem *horst* e *grabens* de calha de direção NW-SE. Tal interpretação explica a discrepância estratigráfica observada em alguns furos conforme já discutido e no mapeamento realizado.

## 6. CONCLUSÕES

A correlação entre as anomalias de eletroresistividade e as características geotécnicas dos litotipos se mostrou, em grande parte, aderentes ao modelo geológico-geotécnico elaborado a partir dos furos de sondagem e mapeamento geotécnico de superfície. Observou-se, na maioria dos casos, boa correlação entre os contatos das anomalias e os litotipos interpretados. Por fim, anomalias verticalizadas foram bem associadas a uma família de falhas (FL2) identificadas em campo.

Dessa forma, conclui-se que o levantamento geofísico pelo método de eletroresistividade corroborou para a confecção e validação das seções geológico-geotécnicas elaboradas, uma vez que a interpretação delas apenas pelas investigações diretas poderia ter resultados distintos se realizada por diferentes profissionais face a complexidade geológico-estrutural da área em apreço.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M., 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7, 349-364.285-295.
- DORR J. V. N. II, GAIR J. E., POMERENE J. B., RYNEARSON G. A., 1957., Revisão Estratigráfica Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. Avulso. 81. 36p.
- DORR J. VAN N. II. 2nd. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. In: Professional Paper, Washington, USGS/DNPM, 641-A: 110.

ENDO I., GALBIATTI H. F., DELGADO C. E. R., OLIVEIRA M. M. F. *et al* 2019a. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969). Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: [www.qfe2050.ufop.br](http://www.qfe2050.ufop.br).

SAADI A., SGARBI G. N. C., ROSIÈRE C. A., 1992. A bacia do Gongo Soco, nova bacia terciária no Quadrilátero Ferrífero: Controle cárstico e/ou tectônico. In: SBG/Núcleo São Paulo, Congresso Brasileiro de Geologia, 37: 600-601.

SOUZA, L.A.; GANDOLFO, O.C. Geofísica aplicada. Cap.12, In: Geologia de Engenharia e Ambiental. Oliveira, A.M.S; Monticelli, J.J. Editores. São Paulo: ABGE, 2018.

SOUZA, L.A.; GANDOLFO, O.C. Geofísica aplicada à Geologia de Engenharia e Meio Ambiente: Manual de Boas Práticas. 1. Ed. São Paulo: ABGE, 2021.