



Integração geológico-geofísica para estudos geotécnicos em barragens.

Assis, L., Vale; Simão, M. L., Vale; Friguetto, B. S., Progen.

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

As investigações geotécnicas de barragens de mineração é uma importante ferramenta na gestão de riscos e na prevenção de acidentes relacionados às falhas estruturais. Neste contexto os métodos geofísicos são ferramentas relevantes e sua integração com informações geológicas e hidrogeológicas geram modelos representativos para análise das condições e interações neste tipo de estrutura. Neste trabalho foi utilizado como objeto de estudo uma barragem de rejeitos de mineração, localizada no Brasil, onde foram feitos levantamentos utilizando os métodos de caminhamento elétrico (IE2D), potencial espontâneo (SP), sísmica de refração (SR), análise multicanal de ondas superficiais (MASW) passivo, MASW ativo, através de levantamentos terrestres e magnetometria e eletromagnético no domínio da frequência (EM) através de levantamentos aéreos. Posteriormente os dados foram correlacionados, através de um modelo digital 3D, incorporando dados de sondagem, cota piezométrica, nível d'água, seções geotécnicas e mapeamento geológico. O resultado desse estudo foi a geração de um modelo geofísico-geológico integrado 3D, com os dados aéreos atingindo até 350 m de profundidade, enquanto os terrestres, de maior resolução, atingindo profundidades entre 185 m para os métodos elétricos até 230 m para os métodos sísmicos. De acordo com o mapeamento geológico local (Dorr, 1969, Endo et al., 2019), a barragem está assentada sobre uma megaestrutura do tipo Sinclinal, cujos contatos litológicos se dão por falhas de empurrão. Essas litologias são caracterizadas por formações carbonáticas e ferríferas, além de uma expressiva cobertura terciária. A partir da integração realizada foi possível delimitar a fundação da estrutura, a geometria do reservatório, identificar uma estrutura geológica com geometria em dobra, relacionando-se ao sinclinal que constitui o arcabouço estrutural da área, delimitar as áreas com maior umidade no maciço da barragem e delimitar o nível da água na estrutura.

Introdução

A aplicação de métodos indiretos em barragens vem se mostrando um importante meio de aquisição de dados complementares para os estudos geotécnicos e monitoramento contínuo de estruturas. Principalmente em locais onde a realização de levantamentos diretos está limitada, devido às condições de segurança implementadas, é necessário incrementar o uso de metodologias de estudos alternativos. No entanto, para realização de um estudo geofísico que atenda as

perspectivas do projeto, algumas abordagens devem ser consideradas, por exemplo, obter dados contínuos das propriedades físicas dos materiais que constituem a barragem e seu reservatório, considerar a variação no tempo, quais são as propriedades físicas chaves, qual o objetivo pretende-se atingir, área de abrangência, que resolução é necessária. Ainda, deve-se considerar o uso de dados diretos para calibrar os dados geofísicos obtidos, a fim de garantir a confiabilidade da informação gerada. Assim a integração dos dados indiretos com sondagens, valores de cota piezométrica e nível d'água, mapeamento geológico, ensaios de campo e de laboratório, são essenciais para interpretação correta dos estudos. Neste estudo realizado em uma barragem de rejeito de minério de ferro, foram aplicados diversos métodos geofísicos a fim de compreender melhor questões como: onde se localiza a fundação da barragem, como se organizam os materiais no maciço da estrutura, como se comporta o fluxo de água interno e os fatores que o condicionam, onde estão localizadas as zonas mais saturadas no maciço e se existem elementos estruturais na fundação (terreno natural) que possam influenciar na estrutura. Assim, integrando informações obtidas em diversos métodos geofísicos com fontes de aquisição direta de dados, buscou-se obter a melhor compreensão do estado atual de uma estrutura de barragem de rejeitos.

Metodologia/ Problema Investigado

A primeira etapa do estudo ocorreu com a coleta dos dados em campo, seguido pelo processamento, modelagem e finalmente a integração das informações. A primeira campanha geofísica foi realizada em 2019, onde foram feitas 38 linhas de caminhamento elétrico e potencial espontâneo (Figura 1), com espaçamento de 10 e 5 metros, resultando em 43km de levantamento. O método empregado para eleitorresistividade foi o Imageamento Elétrico Bidimensional, com arranjo Schlumberger. A escolha do arranjo foi baseada na realização de um estudo orientativo, que comparou os arranjos Dipolo-Dipolo e o Schlumberger, sendo que este último apresentou melhores resultados em relação ao sinal/ruído, além de apresentar menor desvio padrão na inversão dos dados. Para processamento dos dados de Imageamento Elétrico foi utilizado o software de inversão *RES2DINV*, sendo os pontos ruidosos identificados e filtrados do modelo.

A segunda campanha de aquisição de dados terrestres ocorreu em 2020, sendo empregado a sísmica de refração. Foram realizadas 26 linhas, totalizando 7.2km de levantamento. Utilizou-se 24 geofones de 14Hz, espaçados a 5 m cada, e como fonte de energia ativa foi empregada uma marreta de 5kg. O processamento dos dados foi realizado através do software de inversão e interpretação *2D Zond ST2D*. Para modelagem foi utilizado o algoritmo de inversão *Smoothness Constrained*,

que discretiza o terreno em blocos de mesmos parâmetros físicos. Em 2021, uma nova campanha de sísmica de refração foi realizada, com menor extensão, focada na base dos barramentos. Foram realizadas 7 linhas, totalizando 1,5 km, sendo as especificações dos geofones e do processamento e modelagem dos dados as mesmas da campanha anterior.

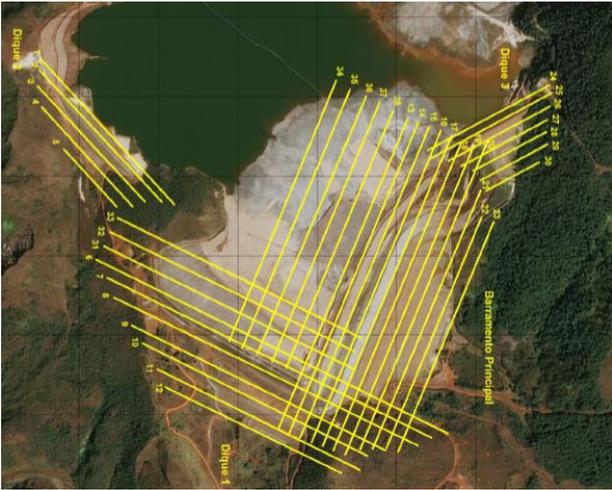


Figura 1 – Posição das linhas levantamento por métodos elétricos realizado em 2021

Além da sísmica de refração também foram realizados outros levantamentos sísmicos, o MASW passivo e o MASW ativo. O primeiro, realizado em 2021, constituiu de três pontos de coleta sendo o resultado apresentado em 1D, atingindo até 194m. Já o segundo, feito em 2022, foram feitas 4 linhas com o total de 1,4km, os geofones usados eram de 4.5Hz e foram espaçados a cada 2,5m. A inversão dos dados foi feita pelo software *ParkSeis*.

Além das campanhas de geofísica terrestre, foram realizadas campanhas aéreas na região. A primeira em 2007, realizada com o objetivo de caracterizar a área para exploração mineral, realizou a coleta de dados magnetométricos e gravimétricos. A segunda realizada em 2021 foi feita a fim de coletar dados magnetométricos e eletromagnéticos focados principalmente nas estruturas geotécnicas. Na primeira campanha foram realizadas 123 linhas espaçadas de 100 m, já na segunda foram realizadas 920 linhas transversais, com comprimento total de 490 km, e espaçadas de 25 m, além de 260 linhas de controle, espaçadas de 200 m cada, com comprimento total de 59 km.

Para a modelagem dos dados, exceto para o MASW passivo cujo resultado é dado em 1D, utilizou-se o software *Geosoft Oasis Montaj* onde foram gerados *grids* para cada linha de levantamento. A partir destas seções foi gerado o modelo de voxel, 3D, através do método de krigagem, usando o modelo de variograma esférico. Para finalizar, foram compiladas e organizadas as informações existentes referentes à barragem, no caso as sondagens, os valores de indicadores de níveis d'água e piezômetros, mapas geológicos, seções geotécnicas, a topografia atual e a primitiva, além da posição de feições

importantes como canaletas, drenos de fundo e extravasores. Com os dados coletados, processados e as informações de calibração do modelo agrupadas foi feita a integração em um único modelo 3D, utilizando o *software Leapfrog*.

Resultados

A campanha de levantamento elétrico resultou em 38 seções de resistividade aparente (Figura 2), chegando a profundidades de até 160 m. Os valores das resistividades variam entre 27 e 14.000 ohm.m, onde as regiões mais resistivas são representadas por cores quentes, enquanto as menores, por cores frias. Além das seções foi gerado o modelo 3D, através da interpolação dos dados. As zonas cuja resistividade ultrapassa 3.000 ohm.m, zonas mais resistivas, podem ser divididas em cinco principais áreas, as duas ombreiras do maciço principal, que são formadas por terreno natural, grande parte da camada superficial dos maciços, uma extensa anomalia (valores que destoam da média padrão esperada na área) localizada abaixo do reservatório, por volta de 60 m de profundidade, e uma última abaixo do maciço principal, por volta de 70 m. As zonas de baixa resistividade, abaixo de 300 ohm.m, estão concentradas principalmente no reservatório da barragem, assumindo uma geometria horizontal contínua que se estende até o maciço. Próximo à região a direita da crista do maciço principal essa anomalia assume direção vertical, alcançando a profundidade máxima do levantamento que atingiu 130 m de profundidade.

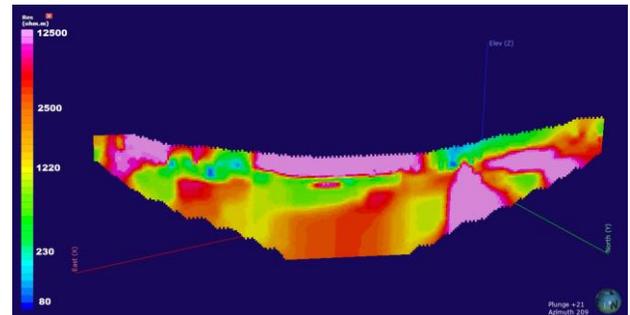


Figura 2 – Seção de eletrorresistividade aparente gerada no maciço principal

As duas campanhas de sísmica de refração realizadas geraram ao todo 33 seções geofísicas de velocidade da onda P (V_p). As seções realizadas nos barramentos chegaram até 70 m, enquanto as realizadas nos pés da barragem atingiram 30 m. As seções foram interpoladas e gerou-se o modelo 3D (Figura 3). Os valores de velocidade variam de 300 m/s até 2000 m/s, sendo que as zonas de maiores velocidade estão localizadas nos pés das barragens, na ombreira entre o Dique 1 e o barramento principal (região de terreno natural) e ao longo do maciço do Dique 1, em profundidades a partir de 12 m.

Os levantamentos sísmicos de MASW foram realizados apenas no maciço principal da barragem e apresentaram resultados da variação da velocidade de onda S (V_s). O MASW passivo resultou em três pontos de coleta 1D, onde foi possível observar a variação da velocidade em

uma linha, atingindo em média 180 m. Nestas linhas foi possível segmentar as velocidades em quatro seções, a primeira, mais superficial, variando de 220 a 340 m/s, em seguida um segmento de velocidade próximo a 400 m/s e 500 m/s, a terceira de 600 a 780 m/s, e a última, próxima a 80 m de profundidade, com valores maiores do que 1.000 m/s.

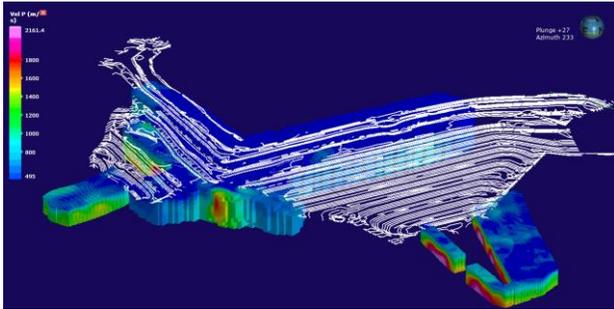


Figura 3 – Modelo 3D de variação da velocidade das ondas P, obtido pelo método de sísmica de refração.

Jom o MASW ativo foram geradas 4 seções de velocidade de onda S, atingindo até 25m de profundidade, cujos valores variam entre 100 m/s e 550 m/s. Em todas as seções, por volta de 8 m de profundidade, é possível ver uma variação bem-marcada da velocidade delimitada por valores entre 260 e 270 m/s. Duas principais zonas de baixa Vs podem ser observadas (Figura 4), uma próxima a crista, na porção direita do barramento e outra na porção central do maciço, na porção esquerda.

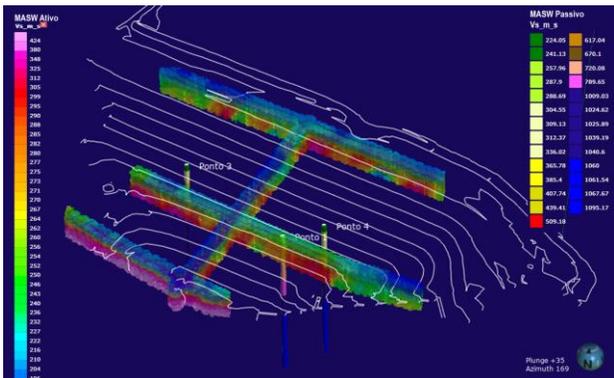


Figura 4 – Modelo 3D de variação da velocidade das ondas S no maciço principal, as linhas representam o levantamento do MASW ativo, as colunas no centro o MASW passivo.

Os resultados gerados pela primeira campanha de geofísica aérea foram mapas derivados de dados gravimétricos (ftg) e magnéticos (MAG). Já a segunda campanha gerou mapas eletromagnéticos (AEM) e de MAG, além do modelo 3D em profundidade.

A campanha aérea de 2007 gerou mapas de contraste gravimétricos e magnéticos onde foi possível identificar áreas de menor e maior densidade e susceptibilidade magnética respectivamente (sendo as cores frias representando valores menores e as cores quentes valores maiores dessas propriedades na área).

Para a barragem aqui estudada a segunda campanha apresentou valores de resistividade de 1 a até aproximadamente 80.000 ohm.m. As zonas de menor resistividade estão associadas principalmente ao reservatório da barragem, com valores de 200 ohm.m chegando até 70 m de profundidade. Nos maciços também é possível observar zonas de menor resistividade, mas em regiões superficiais, chegando a 10m. No barramento principal ressalta-se uma anomalia vertical, cujas baixas resistividades perpetuam-se até regiões mais profundas (Figura 5).

Os modelos magnéticos da campanha de 2021, assim como de EM, são formados por blocos com 12 m de comprimento e de largura, por 4 m de altura. Os dados de MAG chegaram até 750 m aproximadamente, e a susceptibilidade magnética na área varia entre 0 e 0.5 microCGS. A barragem como um todo apresenta baixos valores de susceptibilidade, exceto na porção inferior direita do maciço principal, que possui valores sutilmente maiores.

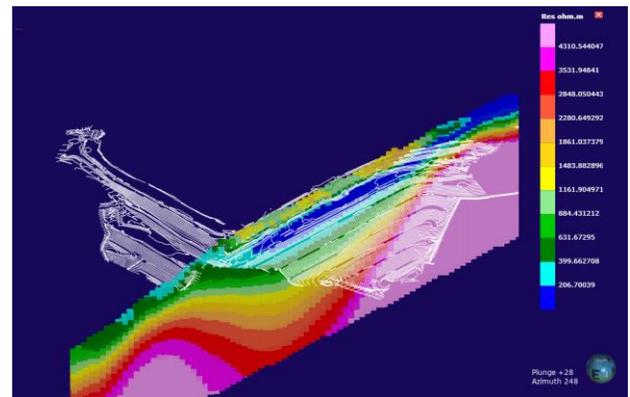


Figura 5 – Seção de resistividade obtida a partir da inversão dos dados eletromagnéticos, indução por campos secundários. As cores mais frias na legenda representam resistividades menores.

Discussão e Conclusões

Analisando os dados de forma regional, e posteriormente avançando para os estudos mais detalhados, podemos associar os levantamentos aerogeofísicos às macroestruturas geológicas, como presença de falhas e dobras, além de auxiliar na definição da profundidade e geometria do reservatório da barragem e a presença de anomalias de grande escala. A partir do modelo AEM foi observado na região, em torno da porção direita do maciço principal, uma anomalia cujas baixas resistividades atingem até maiores profundidades e assumem geometria em forma de “U”. O arcabouço geotectônico mapeado na área da barragem corresponde a um sinclinal assimétrico, cujo eixo (Endo et al., 2019) coincide com a anomalia eletromagnética observada (Figura 6). Segundo as informações de sondagem e as seções geológicas da área, além de existir um contato entre a formação 2 e a formação 4 abaixo da barragem, corroborando com a geologia regional mapeada, existe também um espesso manto de intemperismo formado por materiais como colúvio, solo residual e saprólito. Esse perfil de intemperismo profundo é comum em regiões

marcadas por falhas e eixos de dobras, que condicionam a passagem de fluidos e favorecem o processo de alteração das rochas. Materiais mais saturados, devido a propensão de percolação de fluidos, e maior presença de argilominerais, comum em materiais de alteração de rochas, como solos residuais, geram respostas menos resistivas e podem estar associadas a anomalia observada.

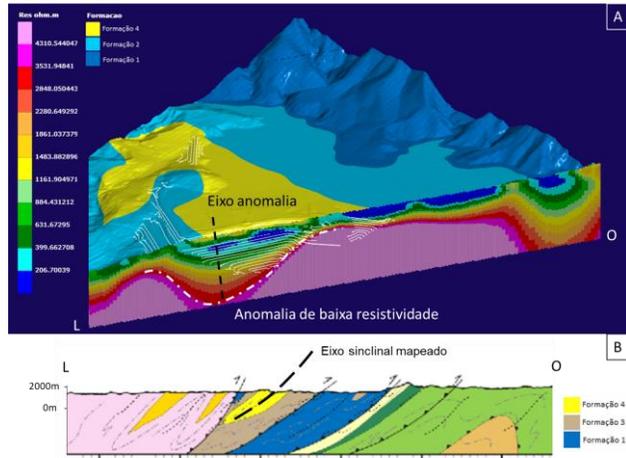


Figura 6 – Em 'A' a geologia regional (Endo et al., 2019) foi rebatida para superfície enquanto em perfil é representado a seção de resistividade obtida pelo levantamento AEM. Em 'B' tem-se o perfil geológico adaptado de Endo et al. (2019) para região estudada.

A identificação da geometria e da espessura do reservatório da barragem pôde ser aproximada pelo uso do modelo aéreo da AEM. Foram filtrados os valores abaixo de 200 ohm.m, limite definido após a integração com os dados de sondagem (Figura 7). Seguindo esse padrão pôde-se inferir que o reservatório atinge até 70m de espessura.

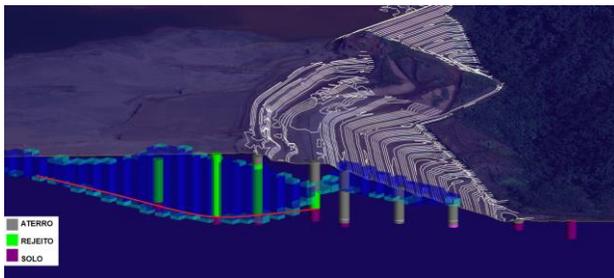


Figura 7 – Logs dos furos de sondagem integrados com as regiões de resistividade menor que 200 ohm.m. Em vermelho a fundação do reservatório da barragem inferida a partir dos dados do AEM e das campanhas de sondagem.

Através dos dados geofísicos foi inferido também a fundação da barragem e o contato do terreno natural mais alterado com a rocha sã. Para isso avaliou-se os dados do MASW passivo com as seções geotécnicas interpretadas e correlacionou-se os seguintes valores: para Vs menores que 350 m/s estão associados materiais como aterros e rejeitos, entre 350 até valores próximos a 800 m/s ocorrem depósitos terciários como

colúvios, solos residuais e saprólitos, e para Vs maior que 1.000 m/s infere-se a presença de rochas menos alteradas a rochas sã (Figura 8).

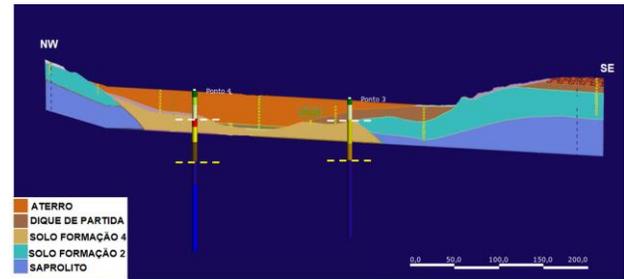


Figura 8 – Seção geológica sobreposta por dois pontos de coleta de Vs pelo método MASW passivo. As linhas brancas marcam a Vs até 350 m/s, coincidindo com a passagem de aterro para o terreno natural, já as linhas amarelas indicam Vs maiores de 1000 m/s em profundidade, indicando a passagem de materiais alterados para rochas sã ou menos alteradas.

O levantamento terrestre feito por caminhamento elétrico foi relacionado com as medidas dos instrumentos de Indicador de Nível da Água (INA) da barragem. Com essa relação foi possível verificar que no maciço a passagem para regiões com resistividade abaixo de 300 ohm.m coincidem com as medidas de nível de água indicadas pelos instrumentos (Figura 9). Ressalta-se que ambos dados comparados foram gerados no mesmo período. Essa correlação indica que essas áreas de baixa resistividade são compostas por material saturado.

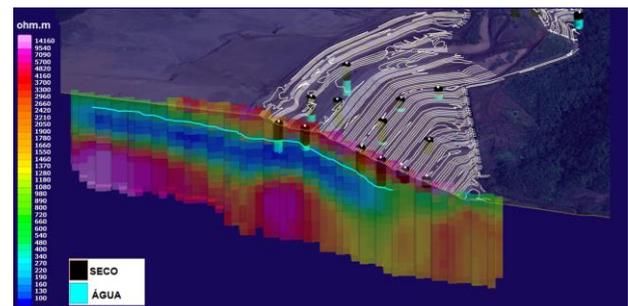


Figura 9 – Seção de eletrorresistividade aparente sobreposta pelos INA's do maciço e suas medições na data que foi realizada o levantamento geofísico. Em ciano está traçado o nível da água obtido a partir desta relação.

A utilização da sísmica de refração, calibrada pelos dados de sondagem, também possibilitou a definição da fundação do dique 1 da barragem. A mudança na compacidade dos materiais é observada na mesma profundidade de transição do aterro para o terreno natural, de acordo com a sondagem realizada (Figura 10). Vp com valores abaixo de 835 m/s estão associadas a materiais de aterro enquanto valores acima deste limite foram correlacionados com terreno natural. Essa divisão foi feita para esta estrutura em específico.

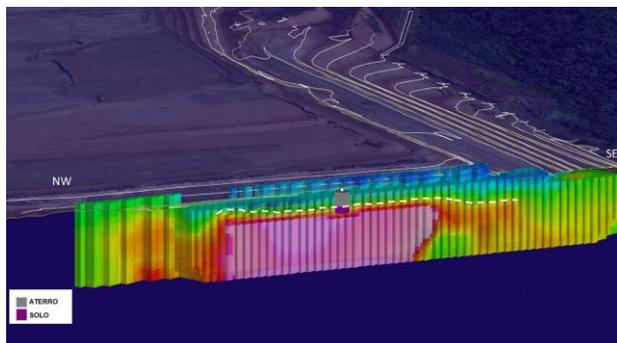


Figura 10 – Seção de sísmica de refração, indicando a variação de V_p , sobreposta por uma sondagem. A linha branca traçada marca uma mudança na compacidade dos materiais, indicando a transição do aterro para o terreno natural.

Através da integração dos dados geofísicos e geológicos foi possível gerar importantes informações acerca da estrutura estudada. A visualização destes dados através de um modelo tridimensional facilitou a demarcação de áreas e limites de transição de materiais além de mudança de parâmetros físicos na barragem. Os levantamentos geofísicos, além de muitas vezes serem opções economicamente viáveis, geram informações relevantes através de métodos menos invasivos para barragem, quando comparado com os levantamentos diretos. Porém ressalta-se que a calibração dessas informações por sondagens, ensaios e instrumentação é insubstituível, e para uma resposta mais precisa seria necessário maior volume de dados diretos. O acompanhamento periódico e em diferentes épocas do ano também são recomendáveis para se ter um espectro do comportamento sazonal da estrutura, além de avaliar possíveis variações em sua condição, assim a realização de levantamentos em períodos regulares é indicado.

Agradecimentos

Agradecemos à Vale, por nos permitir usar e publicar dados geofísicos adquiridos em suas operações. Aos colaboradores Wilson Lugão, Felipe Augusto Quintiliano Guerra e Adriana Ribeiro. À AFC geofísica pelo suporte na aquisição e processamento dos dados.

Referências

Dorr, J. V. N. (1969). Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil (No. 641-A, pp. A1-A110). US Government Printing Office.

Endo I., Galbiatti H. F., Delgado C. E. R., Oliveira M. M. F. de, Zapparoli A. de C., Moura L. G. B. de, Peres G. G., Oliveira A. H. de, Zavaglia G., Danderfer Fº A., Gomes C. J. S., Carneiro M. A., Nalini Jr. H. A., Castro P de T. A., Suito M. T. de F., Tazava E., Lana C. de C., Martins-Neto M. A., Martins M. de S., Ferreira Fº F. A., Franco A. P., Almeida L. G., Rossi D. Q., Angeli G., Madeira T. J. A., Piassa L. R. A., Mariano D. F., Carlos D. U.. 2019. 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;

Leão L. P., 2016. Estudo mineralógico e químico das formações ferríferas bandadas da área do Sinclinal Conta História. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. 137p.

2020. Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. 1st ed., Pp. 480. Belo Horizonte: 3i Editora. Publisher's Version.