

## Geofísica Rasa na Investigação Geológica-Geotécnica de Cavidades Naturais Subterrâneas na Mina de Ferro N4E, Carajás

Marcelo Roberto Barbosa (Vale SA), Marco Antonio da Silva Braga (UFRJ), Iuri Viana Brandi (Vale SA), Rafael Guimarães de Paula (Vale SA), Guilherme Prosdocimi (NEOGEO), Leonardo Santana de Oliveira Dias (LEAPMIND)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August 2017.

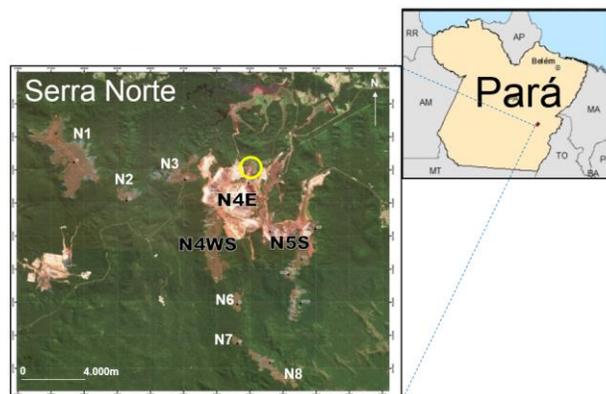
Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

Consistent scientific studies on the physical features of natural caves in mining areas are an essential environmental licensing requirement of current federal Brazilian legislation. The increasing use of indirect technics such as geophysical surveys are improving the quality of cave structural mapping, mainly in the portions between the surface of the terrain and its ceiling. This paper presents the results of three near surface geophysical methods; Seismic Refraction (SR), Ground Penetrating Radar (GPR) and Eletroresistivity (CE), applied for geological and geotechnical investigations of a natural cave in ferruginous terrain at N4E iron ore mine in Carajás. The geophysical data analysis allowed confirming the three typical ferruginous lateritic horizons observed in the plateaus of the region, as well as emphasizing the structural features and their relationship with the development/evolution of the cave.

### Introdução

Os platôs da região dos Carajás constituem um grande contraste geomorfológico no sudeste do estado do Pará, representados por um conjunto de serras com cotas topográficas que variam entre 500-850 m, cercadas por grandes áreas arrasadas cujas cotas variam entre 250-350 m, possuindo diferenças de altura até 500 m. Estes platôs foram formados entre as idades do Cretáceo e Terciário Superior e encontram-se alinhados na direção estrutural regional W-NW e E-SE (Figura 1)



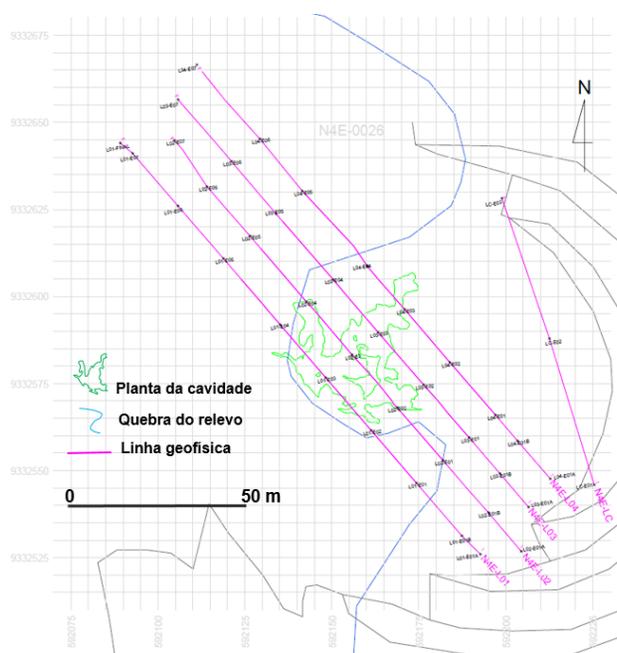
**Figura 1** - Platôs da região de Carajás (siglas Nx), localizados na Serra Norte, sudeste do estado do Pará, Brasil. No centro da imagem estão as principais minas de ferro em operação (N4E, N4WS e N5S). A área de estudo está destacada com um círculo amarelo.

Geologicamente, a região é dominada por uma sequência de rochas vulcano sedimentares de idade arqueana do Grupo Grão Pará (Macambira, 2003), que hospeda uma grande província mineral, incluindo as maiores reservas de minério de ferro no mundo, exploradas pela empresa Vale S.A. O topo dos platôs é sustentado por uma cobertura laterítica resistente aos processos erosivos que desenvolve feições pseudocársticas, apresentando expressiva ocorrência de cavidades naturais subterrâneas em suas bordas. Atualmente, a legislação ambiental federal exige a preservação de cavidades, solicitando ao empreendedor manter uma distância de 250 m de cada cavidade, onde não pode haver qualquer tipo de intervenção humana até que se demonstre, através de estudos técnico-científicos (físicos e biológicos), que o avanço da mina não irá causar qualquer tipo de impacto irreversível à cavidade (Barbosa *et al.* 2016).

Neste trabalho serão apresentados os resultados dos levantamentos geofísicos rasos, executados numa mesma malha topográfica, sobre a cavidade natural subterrânea N4E-0026 em terrenos lateríticos, na mina de ferro N4E em Carajás (Figuras 2 e 3).



**Figura 2** - Área de estudo na Mina N4E. Notar em amarelo a planta da cavidade N4E-0026 projetada na superfície.



**Figura 3** - Planta da cavidade N4E-0026 com a localização das linhas da malha topográfica onde foram executados os levantamentos geofísicos.

### Metodologia

Foram utilizados os métodos geofísicos; Sísmica de Refração (SR), Ground Penetrating Radar (GPR), e Eletroresistividade (CE).

Para a realização dos levantamentos geofísicos foram abertas linhas topográficas em malha com direções transversais ao eixo principal de desenvolvimento da cavidade e suas principais estruturas, no intuito de melhor identificar os alvos em subsuperfície. A malha foi composta de 4 linhas paralelas entre si, estrategicamente localizadas sobre a cavidade, com espaçamentos de 10 m, e

150 m de comprimento médio, bem como uma linha controle de 100 m de comprimento sem estar sobre a cavidade (Figura 3).

### Sísmica de Refração (SR)

Os métodos sísmicos fundamentam-se na geração de ondas acústicas e na medição do tempo requerido para que estas ondas se propaguem da fonte de emissão (golpe com marreta, queda de peso, detonação por explosivos e similares), até um conjunto de sensores (geofones ou hidrofones), dispostos em superfície ao longo de um perfil.

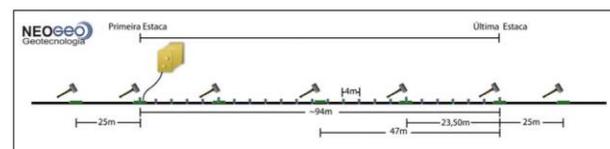
Para trabalhos de refração, os geofones são projetados, preferencialmente, para captar a vibração vertical (onda P), tendo uma frequência central na faixa de 14 - 28 Hz; dependendo do modelo.

Ao longo de sua trajetória no interior do terreno a onda sofre a influência das mudanças de propriedades elásticas das rochas e dos meios que atravessa, o que provoca mudanças em sua direção e velocidade de propagação, segundo os princípios de Huygens, Fermat e Snell.

Segundo Telford *et al.* (1990), como não é possível o movimento relativo entre dois meios atravessados, o meio superior é forçado a se mover em fase com o meio inferior. O distúrbio no meio superior propaga-se ao longo da interface com a mesma velocidade do meio inferior. O método de refração sísmica baseia-se na detecção destas ondas, para obtenção do modelo de distribuição de velocidade e de profundidade do subsolo.

Neste estudo, a aquisição dos dados foi feita utilizando o sismógrafo da fabricante Geometrics, modelo Geode, módulo de 24 canais, e geofones de tipo eletromagnético a bobina móvel, com frequência característica de 10 Hz, que permitem converter as vibrações induzidas no terreno em sinais elétricos. Os geofones foram igualmente espaçados em 4,10 m e a fonte sísmica utilizada para as aquisições foi uma marreta com massa aproximada de 10 Kg.

Para cada perfil sísmico executado foram realizados 7 pontos de tiros, assim dispostos nesta sequência: 25 metros antes do primeiro geofone, primeiro geofone, 23,50 m após o primeiro geofone, metade da seção, 23,50 metros antes do último geofone, último geofone e 25 metros após o último geofone, conforme pode ser observado no esquema ilustrativo da Figura 4.



**Figura 4** - Modelo esquemático dos pontos de tiros ao longo da linha geofísica pelo método de Sísmica de Refração (SR).

A profundidade atingida pelo imageamento sísmico variou entre aproximadamente 7 a 42 m, e após o levantamento, foi necessária a correção topográfica para

a correta interpretação da velocidade das camadas superficiais.

### Ground Penetrating Radar (GPR)

O GPR ou Radar de Penetração no Solo é um método geofísico não invasivo e que utiliza ondas eletromagnéticas com frequências entre 10 a 2.500 MHz. Consiste na emissão e propagação de ondas eletromagnéticas, em um meio físico, com a posterior recepção dos sinais refletidos por descontinuidades desse meio (refletores), podendo ser interpretados, formas de corpos em subsuperfície e descontinuidades geológicas como foliações, falhas, fraturas, acamamentos e mergulhos de camadas. O sistema do GPR pode ser resumido por uma fonte geradora de pulsos elétricos de alta frequência, uma antena transmissora, uma antena receptora e uma unidade de armazenamento de dados (Barbosa *et al.* 2016)

Alguns autores têm publicado pesquisas com resultados que demonstram que o método é bastante satisfatório para identificações de litologias e estruturas (Rosseti & Goes 2001) e igualmente a identificação de cavidades em subsuperfície, como em Gosar *et al.* (2016).

Para o levantamento GPR foram utilizados os equipamentos SIR3000 do fabricante GSSI com antena de frequência central de 80 MHz (MLF – Multi Low Frequency), em modo estático, onde foram atingidas profundidades de 8 m em alta resolução, e o equipamento PulseEKKO da fabricante Sensor & Software LTDA, com antena de frequência central de 250 MHz, modo dinâmico, atingindo profundidades de 22m. Os perfis são apresentados em profundidade e a conversão tempo/profundidade está baseada na velocidade 0,07 m por nano segundos (PulseEKKO e Antena MLF), obtidos a partir da análise de feições hiperbólicas encontradas no dado bruto.

Os softwares utilizados foram: ReflexW (Sandmeier) para o processamento dos dados elétricos, interpretação e apresentação, e o Seisvision (LandMark) para interpretação e tratamento de imagens e montagens dos perfis.

### Eletrorresistividade (Caminhamento Elétrico - CE)

A eletrorresistividade é um método geofísico baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais, e tem sido utilizado nos mais variados campos de geologia, hidrogeologia, geotecnia, geologia ambiental, engenharia entre outros. Este método é dividido em duas técnicas de levantamentos de campo: Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamento Elétrico (CE). Diversas variações nas configurações dos eletrodos são possíveis, conferindo grande versatilidade ao método. A técnica do caminhamento elétrico é aplicada quando o alvo de interesse é o estudo da variação, tanto lateral, quanto vertical da resistividade. O método emprega uma corrente elétrica direta baseada na emissão artificial introduzida no terreno através de dois eletrodos de corrente (denominados A e B) com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos de potencial

(denominados M e N) nas proximidades do fluxo de corrente. Com isso, é possível identificar regiões em subsuperfície que apresentam maior ou menor resistividade, que varia principalmente pela composição mineralógica, concentração de argilo-minerais, porosidade, grau de compactação, teor em água, natureza dos sais dissolvidos, e outros. Os eletrodos são cravados no solo por percussão a martelo/furadeira ou por rosqueamento para melhorar a conexão elétrica com o solo. Quando se injeta corrente no solo, a mesma irá distribuir-se por todas as rotas possíveis, desde a superfície até os níveis mais profundos, passando preferencialmente pelos caminhos mais fáceis (condutivos) enquanto uma porcentagem progressivamente menor irá percorrer os caminhos mais longos e resistentes (Barbosa *et al.*, 2016).

A escolha dos parâmetros de aquisição da eletrorresistividade é feita com base nos objetivos propostos para o método, definindo assim, o número de cabos a utilizar, o comprimento das seções, espaçamento entre eletrodos, arranjos e protocolo. Os parâmetros para a inversão também dependem de cada caso e recebem um ajuste fino. A resolução na superfície é inversamente proporcional ao espaçamento mínimo entre eletrodos e diminui gradativamente com a profundidade. A parte mais rasa do terreno é a que mais influencia na medida, portanto, uma boa modelagem superficial é importante mesmo quando o que se deseja visualizar mais profundo.

A técnica da eletrorresistividade tem sido utilizada para detecção e estudo de cavidades por alguns autores desde a década de 50, sendo alguns mais recentes como Manney *et al.* (2005) e Cardoso, L.H. (2016).

O equipamento utilizado no trabalho foi o resistímetro SAS 4000 da fabricante ABEM com configuração de 64 canais, composto de unidade de controle e unidade seletora. O espaçamento entre eletrodos foi de 2,80 m e 1,40 m. O software de processamento e interpretação foi o Res2DInv. O arranjo de eletrodos foi o Dipolo-Dipolo (DDP) por apresentar considerável relação sinal-ruído assim como satisfatória relação profundidade que atingiu até 40 m, versus resolução lateral.

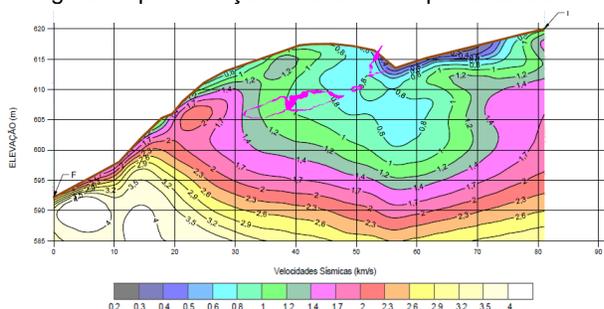
### Resultados

#### Sísmica de Refração (SR)

Todas as seções apresentaram a disposição em multicamadas com profundidades entre 7 e 42 m, cujas velocidades sísmicas variaram entre 0,2 km/s a 4 km/s. A tendência mais horizontalizada das interfaces refratoras em profundidade, é interrompida por deflexões das camadas sísmicas que ocorrem em algumas regiões da subsuperfície. Tal perturbação pode ser acarretada pela presença de cavidades com preenchimento por ar, que acaba por influenciar em um abaulamento das interfaces e conseqüente aumento da abrangência das zonas relacionadas a baixa velocidade sísmica (Figura 5). Os valores de velocidade sísmica para essas regiões, próximas à cavidade, variaram entre 0,8 km/s a 1,4 km/s, entretanto, não apresentaram valores significativamente baixos como observado por outros autores como Sheehan *et al.* (2005). Isso decorre do fato de algumas

ondas sísmicas não conseguem atravessar o vazio correspondente à cavidade.

As altas velocidades, acima de 2,0 km/s, presentes em profundidade e geometria horizontalizada, podem estar relacionadas a rochas de formação ferrífera bandada com grau de preservação crescente em profundidade.



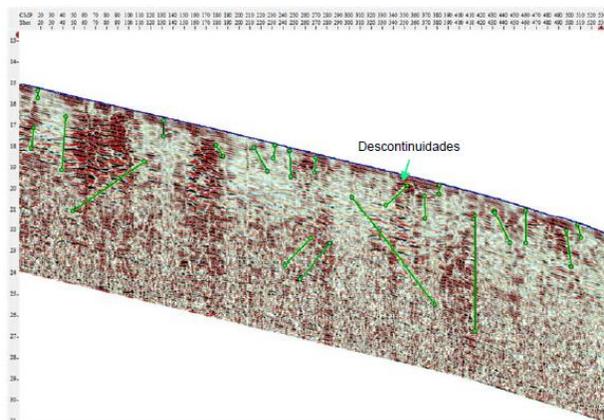
**Figura 5** - Seção Sísmica de Refração (SR) com até 42 m de profundidade sobre a cavidade N4E-0026. A zona ondulada com baixas velocidades está associada a presença da cavidade.

### Ground Penetrating Radar (GPR)

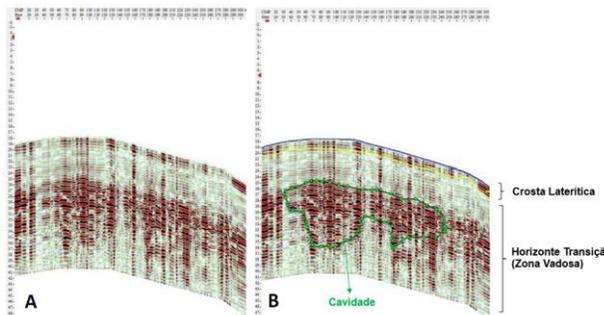
A interpretação procurou rastrear terminações de refletores e, desta forma, definir alinhamentos formados por diferentes discontinuidades. As discontinuidades geológicas (foliações, falhas, fraturas e etc.) apresentam-se como interrupções nos refletores, que se destacam entre as reflexões associadas ao acamamento natural.

Planos de discontinuidades interpretados nas seções da antena 80MHz, concentram-se nas porções superiores do perfil, tendo atingido 8 m de profundidade, nas porções próximas ao teto das cavidades. Apresentam direções de mergulho variados, alguns deles na forma de feições em cunha. Tais planos constituem caminhos favoráveis de fluxo hídrico, colaborando para que os processos de dissolução da rocha e sua erosão ocorram, e estão fortemente associados às superfícies de abatimentos relacionados à gênese e/ou desenvolvimento de cavidades, e por isso, constituem importantes feições no mapeamento geofísico (Figura 6).

As seções da antena 250MHz atingiram uma maior profundidade (22 m), o que permitiu a interpretação de feições (tipo núcleos) que podem estar associadas à presença de cavidades, mostrando feições refletores com quebra do paralelismo e a consequente reverberação do sinal, que se tornam descontínuos e sinuosos. Tal fato é característico da passagem da onda eletromagnética em meios preenchidos por ar, revelando, portanto, um aspecto relevante para o presente estudo. Ainda outro benefício do método, foi a variação do contraste dos refletores, diferenciando 2 diferentes horizontes de espessuras irregulares (crosta laterítica superior e uma zona de transição em profundidade), com padrões eletromagnéticos distintos, e que corroboram com estudos geológicos da mina e dos platôs da região, relacionados aos processos de laterização (Figura 7).



**Figura 6** - Seção GPR com até 8 m de profundidade (antena 80MHz) sobre a cavidade N4E-0026. Notar os planos de descontinuidades estruturais interpretados (linha verde) através das interrupções dos refletores.



**Figura 7** - Seção GPR com até 22 m de profundidade (antena de 250MHz) sobre a cavidade N4E-0026 (Seção A original e B com interpretação). Notar os dois horizontes diferenciados na seção e o contorno tipo núcleo, (linha verde), interpretados através das interrupções e mudanças de ângulo do padrão de contrastes dos refletores.

### Eletrorresistividade (Caminhamento Elétrico - CE)

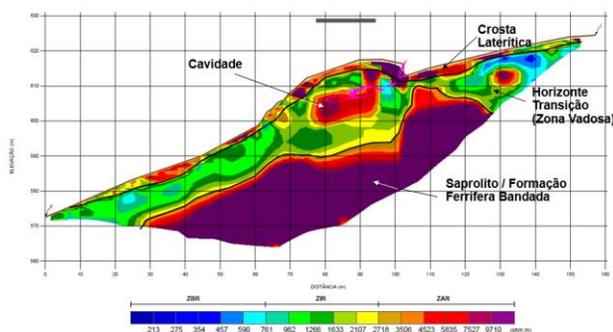
As profundidades atingiram até 40 m em boa resolução, permitindo a diferenciação de magnitudes elétricas em Zonas de Alta Resistividade aparente (ZAR) com valores acima de 2.700 ohm.m e Zonas de Baixa Resistividade com valores abaixo de 750 ohm.m aproximadamente. Valores intermediários entre 2.700 e 750 ohm.m foram associados a Zonas de Resistividade Intermediária (ZIR). De maneira geral, todas as seções elétricas interpretadas, permitiram identificar 3 diferentes horizontes de espessuras irregulares, com padrões resistivos distintos (também realçados pelo método GPR), que serão descritos a seguir, e que corroboram com estudos geológicos da mina e dos platôs da região, relacionados aos processos de laterização.

O horizonte superior mais próximo à superfície do terreno, apresentou alguma heterogeneidade dos valores elétricos, porém com predominância de Zonas de Alta Resistividade (ZAR), e profundidades aproximadas de 1 m a 5 m. Em termos litológicos, esta crosta superficial

mostra alta rugosidade, porosidade e permeabilidade, e vem sendo denominada de “Crosta Laterítica”. Esta crosta possui, em princípio, uma quantidade significativa de ar preenchendo os poros, podendo culminar em uma resposta geofísica de altos valores de resistividade aparente.

O horizonte intermediário, mais abaixo, é formado por uma redução significativa nos valores de resistividade aparente, com presença de faixas descontínuas de Baixa Resistividade (ZBR) e Intermediária (ZIR), com espessuras entre 10 e 30 m, que se tornam progressivamente mais expressivas ao se afastarem lateralmente das entradas de acesso à cavidade. As seções que atravessam as entradas apresentaram sempre ZAR, que mais raramente podem aparecer de modo isolado. Este horizonte foi interpretado como pertencente a zona vadosa, porção de interesse espeleológico pela característica físico-química dos seus litotipos presentes e texturas grosseiras e porosidades mais desenvolvidas, e onde ocorrem a formação e desenvolvimento das cavidades (denominada como “Zona de Transição”). Esta zona vem sendo objeto de estudos pelas equipes Vale, e essa técnica geofísica indireta deverá trazer substanciais avanços em seu conhecimento.

As regiões mais profundas e basais das seções elétricas apresentaram uma tendência de crescimento nos valores de resistividade aparente (ZAR). Este horizonte deve estar relacionado à transição de saprolito (rocha alterada) para formação ferrífera bandada (rocha sã), cuja tendência do crescente grau de preservação para profundidade, também ocasiona um progressivo aumento nos valores de resistividade. A cavidade se mostrou na interface de ZAR e ZIR e está se. (Figura 8).



**Figura 8** - Seção de Eletrorresistividade sobre a cavidade N4E-0026. Notar a diferenciação dos padrões resistivos em 3 horizontes, que corroboram com os perfis lateríticos ferruginosos da região. A cavidade se mostrou na interface ZAR e ZIR.

### Normalização e Transformação dos Dados

No presente trabalho foi proposta a normalização das seções da cavidade, através de uma média dos valores da cada faixa de resistividade, considerando, assim, que os valores normalizados possuam os devidos desvios padrões para os valores reais, sem perda da confiabilidade da interpolação geofísica.

### Discussão e Conclusões

Na Sísmica de Refração (SR), as porções atribuídas à presença de cavidades ocorrem por redução da velocidade sísmica em um padrão ondulado sinuoso atípico, enquanto as altas velocidades, nas regiões basais com tendência mais horizontalizadas, estão associadas a rochas de formação ferrífera bandada corroborando com os estudos geológicos e espeleológicos.

A análise da seção de Caminhamento Elétrico (CE) permitiu diferenciar 3 horizontes com padrões resistivos característicos e associados aos processos de laterização na região. Do topo para a base foi interpretado um horizonte superficial associado a “crosta laterítica”, algo heterogêneo porém com domínio das zonas de alta resistividade aparente (ZAR), provavelmente pela presença de ar nos poros dos litotipos superficiais; um pacote intermediário mais abaixo, relacionado à um “horizonte de transição” onde alternam-se zonas de baixa (ZIR) e intermediária resistividade aparente (ZIR), importante, pois é onde há o desenvolvimento das cavidades e onde o preenchimento dos poros e fraturas se dá por ar ou água; e na porção basal, a resposta geofísica está relacionada ao topo de rocha ferruginosa alterada (“saprolito”) e a própria rocha sã (formação ferrífera bandada) dominando de forma mais homogênea a ZAR.

Os planos de descontinuidades interpretados dos perfis de GPR auxiliaram na identificação das interseções de planos de descontinuidades em cunhas, “internos no maciço”, entre a superfície do terreno e o teto da cavidade. Estes planos, associados ao mapeamento geoestrutural-geomecânico direto no interior da cavidade, desempenha um importante papel no entendimento da estabilidade e estruturação local, principalmente no “horizonte de transição”, horizonte importante associado à gênese da cavidade.

Tanto o método GPR quanto o CE, delimitaram de modo muito satisfatório os 3 horizontes ferruginosos de espessuras irregulares, que começam a ser correlacionados e corroboram com os estudos geológicos da mina e dos platôs da região, demonstrando que ambos os métodos tiveram forte correspondência entre si.

O presente estudo, concluiu, portanto, uma satisfatória correlação entre os dados geofísicos interpretados e feições geológicas-geotécnicas de interesse espeleológico, confirmando o ganho na interpretação integrada dos métodos geofísicos, que, na realidade, se complementam para reduzir incertezas e ambiguidades, para a correta e mais assertiva avaliação sobre o meio físico da cavidade e seu entorno.

### Agradecimentos

Ao gerente de licenciamento ambiental e espeleologia da Vale S.A., Rodrigo Dutra Amaral, pelo apoio e autorização para uso dos dados.

### Referências

BARBOSA, M.R.; DE PAULA, R.G.; BRAGA, M.A.S.; BRANDI, I.V.; CLAUVER, C.; MATOS, J.; DIAS, L.S.O.

2015, Métodos Geofísicos Aplicados a Coberturas Lateríticas com Feições Pseudocársticas na Mina de Ferro N4E, Carajás, VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto – MG, p.4.

**CARDOSO, L.H.** 2016. Investigação geofísica na prospecção de cavidades naturais em litotipos ferríferos na região de Mariana, Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Brasil: Dissertação de Mestrado, Depto Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, p.76.

**GOSAR A. & ČERU T.** 2016. Search for an artificially buried karst cave entrance using ground penetrating radar: a successful case of locating the S-19 Cave in the Mt. Kanin massif (NW Slovenia). *International Journal of Speleology*, 45 (2), 135-147. Tampa, FL (USA).

**MACAMBIRA, J.B.** 2003. O ambiente deposicional da formação carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a bacia grão-pará: Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, p. 217.

**MANNEY R.M.; ROTH J.S.; NYQUIST J. E.** 2005, Exploring directional differences in resistivity results in karst. *Proceedings of the Symposium for the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, Environmental and Engineering Geophysical Society, 1117–1124.

**ROSSETTI D.F & GÓES A.M.** 2001. Imaging Upper Tertiary to Quaternary deposits from Northern Brazil Applying Ground Penetrating Radar. *Revista Brasileira de Geociências*. 31 (2); 195-202.

**SHEEHAN, J.R., DOLL, W.E., WATSON, D.B. & MANDELL, W.A.** 2005. Application of seismic refraction tomography to karst cavities. U. S. Geological Survey Scientific Investigation Report 5160, 29-38.

**TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. A.** 1990. *Applied geophysics*, 2nd edition: Cambridge Univ. Press.