

Aplicação do Método Ground Penetrating Radar (GPR) no Mapeamento Geoestrutural de Cavidades Naturais Subterrâneas em Terrenos Ferríferos – Estudo de Caso da Mina N4E, Carajás

Marcelo Roberto Barbosa
Vale SA, Carajás, Brasil, marcelo.roberto.barbosa@vale.com

Rafael Guimaraes de Paula
Vale SA, Carajás, Brasil, rafael.guimaraes@vale.com

Marco Antonio Braga
UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, marcobraga@geologia.ufrj.br

Iuri Viana Brandi
Vale SA, Belo Horizonte, Brasil, iuri.brandi@vale.com

Cibele Clauver
UNIBH, Belo Horizonte, Brasil, cibeclauver@gmail.com

Juliano Matos
NEOGEO, Belo Horizonte, Brasil, juliano@ngg.com.br

Cristiane Sebastião
COFFEY, Belo Horizonte, Brasil, cristiane.sebastiao@gmail.com

RESUMO: A região de Carajás, a sudeste do estado do Pará, possui um domínio geomorfológico característico representado por um conjunto de platôs com altitudes variando de 500 a 850m, onde está localizada a maior mina de ferro no mundo. No contexto litológico, domina uma cobertura laterítica com até 20m de espessura em média. Esta cobertura exhibe feições pseudocársticas na interface com a rocha subjacente, onde se desenvolveram a maioria das cavidades naturais subterrâneas da região. Estas cavidades são protegidas por lei ambiental federal, e para atender à legislação e licenciamentos, a mineradora Vale vem desenvolvendo há alguns anos, estudos técnico-científicos para entender os impactos do avanço das operações de mina nestas cavidades. Neste contexto, foram testados alguns métodos geofísicos, com destaque para o eletromagnético Ground Penetrating Radar (GPR). Este trabalho apresenta os resultados de 3.022m de seções GPR executadas sobre uma cavidade e seu interior na mina de ferro N4E em Serra Norte, testando-se diferentes arranjos, frequências e formas de tratamento dos dados. Apesar do caráter experimental dos testes geofísicos na área de espeleologia em Carajás, foi possível definir profundidades de alcance em litologias ferríferas e a marcação dos planos de descontinuidade nas seções GPR 2D interpretadas, servindo de fundamental apoio aos estudos geotécnicos e geomecânicos.

PALAVRAS-CHAVE: GPR, Terrenos Ferríferos, Carajás, Cavidades Naturais Subterrâneas

1 INTRODUÇÃO

A região de Carajás está localizada no sudeste do estado do Pará e apresenta um conjunto de serras de topo aplainado (Platôs) com altitude média de 650 metros, fazendo parte de uma expressiva unidade geomorfológica denominada de Planalto Dissecado do Sul do Pará (Boaventura, 1974). Os platôs são sustentados por uma cobertura laterítica resistente aos processos erosivos, possuindo direção estrutural regional preferencial W-NW e E-SE e desenvolvidos sobre uma sequência de rochas vulcanossedimentares de idade arqueana do Grupo Grão Pará principalmente (Macambira, 2003).

Os platôs que formam a Serra dos Carajás se destacam por apresentar uma expressiva ocorrência de cavidades em suas bordas como resultado dos processos de dissecção do relevo. Nesse contexto, a exploração das reservas minerais encontra-se comprometida devido à necessidade de preservar estas cavidades por força de legislação federal ambiental vigente.

Para determinar se uma cavidade deve ser protegida ou não, uma série de critérios foi estabelecida por recentes leis federais (2008/2009), sendo que a maioria das cavidades resulta em serem protegidas. Esta proteção exige manter uma distância de 250 m onde não pode haver qualquer tipo de intervenção humana para cada cavidade. Considerando que cavidades naturais subterrâneas em ambiente de minério de ferro ocorrem comumente próximas uma das outras, esta distância de 250m se amplifica bloqueando grandes áreas / reservas de minério.

Esta distância pode ser reduzida desde que estudos técnico-científicos consistentes sejam feitos abrangendo aspectos físicos e biológicos, como forma de demonstrar ao órgão ambiental, que o avanço da mina não irá causar qualquer destruição na cavidade e assim uma autorização pode ser dada.

Para a abordagem do meio físico, estudos sobre a estabilidade estrutural das cavidades têm sido feitos por meio de mapeamentos e monitoramento geotécnico instrumentado, porém, métodos indiretos como a geofísica estão provando serem muito adequados para entender o comportamento estrutural do maciço, onde se hospedam as cavidades, especialmente no trecho entre a superfície do terreno e o teto das cavidades.

Neste trabalho são apresentados os resultados referentes aos 3.022m de seções geofísicas do método eletro-magnético Ground Penetrating Radar (GPR), executadas sobre uma cavidade (N4E-0026) e seu interior, na mina de ferro N4E na Serra Norte em Carajás.

2 METODOLOGIA

O GPR (Ground Penetrating Radar) 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 para o mapeamento de feições geológicas, localizar poluentes no subsolo em fases adsorvidas, dissolvidas e livres, bem como estruturas antrópicas e objeto enterrados pelo homem. A análise com o método GPR consiste na emissão e propagação de ondas eletromagnéticas, em um meio físico, com a posterior recepção dos sinais refletidos, em descontinuidades desse meio. Desta forma, o sistema de GPR é formado por uma fonte geradora de pulsos elétricos de alta frequência, uma antena transmissora, uma antena receptora e uma unidade de armazenamento de dados. A Figura 1 mostra de modo esquemático o funcionamento do GPR. A fonte geradora produz um pulso de curta duração e alta voltagem, que é aplicado na antena transmissora. A antena transmissora emite a onda eletromagnética para o subsolo sendo que parte da onda é refletida quando existir contraste nas propriedades físicas das rochas e fluidos nela contidos. A antena receptora detecta este sinal refletido que é amostrado, digitalizado e armazenado. Nesta antena receptora são registradas duas ondas diretas, a

primeira adquirida é a onda direta que viaja pelo ar e a segunda é a onda direta que viaja pelo chão. Após a recepção das duas ondas diretas são detectadas as ondas refletidas em interfaces e difratadas por pequenos corpos.

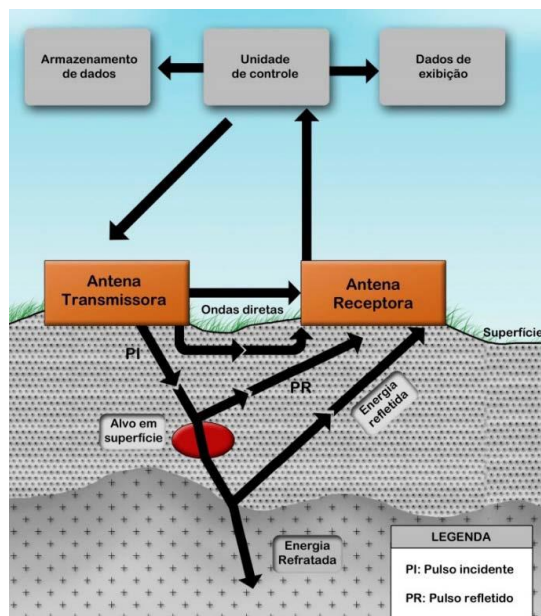


Figura 1: Esquema da reflexão das ondas.

A Figura 2 mostra a equipe em trabalho de campo com a estrutura montada para as antenas para os caminhamentos ao longo dos perfis.



Figura 2: Levantamento GPR em campo.

As interpretações das seções levam em conta a estrutura interna dos “refletores” tais como forma do corpo em subsuperfície, descontinuidades geológicas (como foliações, acamamentos, falhas e fraturas), mergulho de

estratos, além da dicotomia contraste e atenuação que podem ser diferenciadas conforme Figura 3.

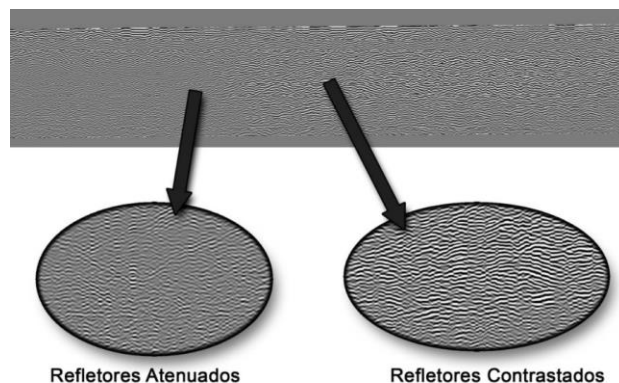


Figura 3: Esquema da reflexão das ondas.

Foram realizados testes geofísicos com antenas de frequências 80 MHz (MLF), 100 MHz, 200 MHz e 400 MHz na linha externa L-03 e na linha interna L-01, ambas nas proximidades da cavidade N4E-0026. Essas linhas testes serviram de base para a definição adequada dos parâmetros intrínsecos à aquisição de forma a corroborar para um melhor imageamento e, conseqüentemente, uma melhor interpretação dos dados geofísicos.

3 AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a realização dos levantamentos geofísicos foram levantadas linha topográficas em campo em malha transversais e longitudinais ao eixo principal da cavidade, Neste trabalho foi utilizado o equipamento SIR3000 com antena de 80 MHz (MLF – Multi Low Frequence) e 400 MHz e o equipamento RAMAC com antena de 100 MHz e 200 MHz. Os levantamentos de campo realizados com antenas de 80, 100 e 200 MHz foram realizados em modo estático e 400 MHz em modo dinâmico, utilizando parametrização individual para cada antena. O processamento dos dados de GPR foi realizado no software ReflexW, que permite aplicar todos os processos básicos e avançados para o tratamento de dados de GPR enquanto a interpretação dos dados de GPR foi realizada na Suíte de Aplicativos da LandMark, utilizando-se os módulos 2D do SeisVision.

A Figura 4 apresenta a localização das seções de GPR sobre a cavidade N4E-0026.

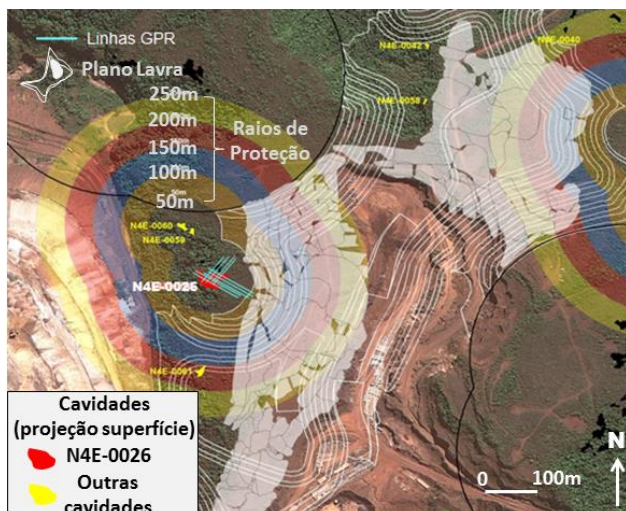


Figura 4: Localização das seções GPR sobre a cavidade N4E-0026 na mina N4E.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Os testes de parametrização adotados com as diversas frequências de onda definiram os alcances máximos de profundidades sobre a cavidade N4E-0026 em terrenos feríferos. As profundidades são consideradas adequadas para a continuidade dos trabalhos uma vez que a média de profundidade das cavidades na região é cerca de 10m. A Tabela 1 mostra as profundidades alcançadas.

Tabela 1: Profundidade alcançada nas seções GPR em terrenos feríferos sobre a cavidade N4E-0026 na mina N4E.

Antena GPR	Profundidade de alcance (m)
80 MHz	12
100 MHz	10
200 MHz	8
400 MHz	2

Todas as seções obtiveram boas resoluções que foram interpretadas rastreando-se terminações de refletores e, desta forma, definindo-se alinhamentos/lineamentos formados por diferentes discontinuidades. Um padrão de refletores fortemente contrastado é identificado nos perfis de 400 MHz, sendo que nesta

frequência não foi observada atenuação de sinal nos perfis. As frequências de 80 MHz, 100 MHz e 200 MHz registram atenuações no contraste das seções em algumas regiões.

As seções são apresentadas por meio de uma paleta em tons escuros, alcançando diferentes níveis de profundidade, devido à frequência de onda da antena utilizada. O teto da cavidade foi identificado com dificuldade através da presença de hipérboles interpretadas com localização inferida. O padrão reverberante do sinal abaixo da hipérbole pode servir para corroborar na delimitação das cavidades em 3D. A análise das seções não permitiu identificar contatos claros entre diferentes litotipos. Em todas as seções, nas diferentes antenas utilizadas, os refletores tendem a ser planos, por vezes com mergulho, relativamente regulares, e moderadamente contínuos a descontínuos. As seções, nas diversas frequências em que foram adquiridas, apresentam descontinuidades dos refletores que podem ser associados às descontinuidades e a possíveis planos de fraqueza (Figura 5).

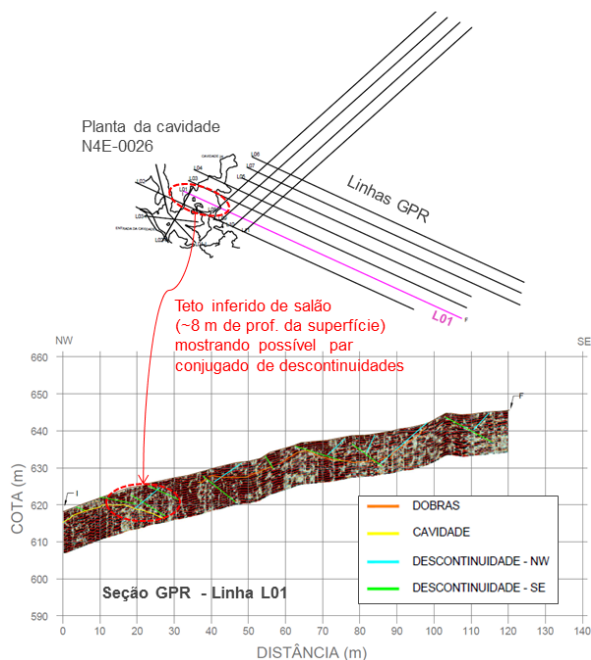


Figura 5: Seção GPR interpretada sobre a cavidade N4E-0026 na mina N4E.

Tais descontinuidades e/ou planos de fraqueza possuem medidas variadas de mergulho e direção, que ficam mais bem apresentados na

seção em 3D (Figura 6).

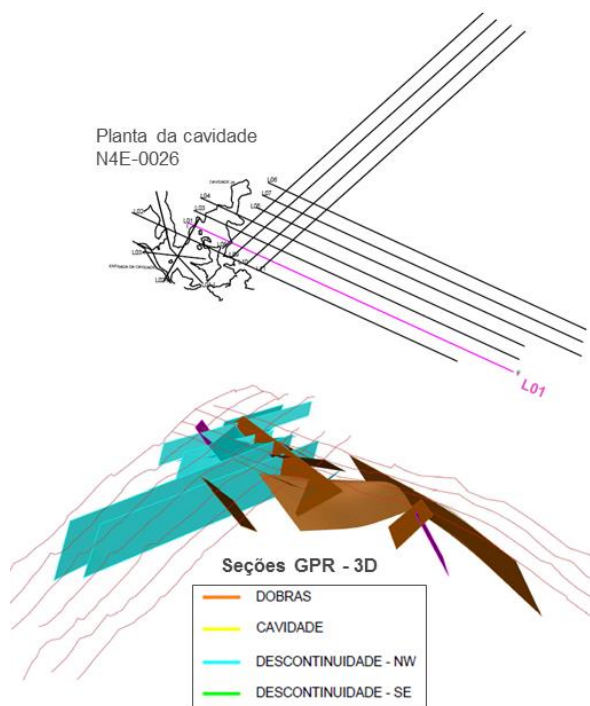


Figura 6: Seções GPR – 3D mostrando interpretação integrada das descontinuidades sobre a cavidade N4E-0026 na mina N4E.

Os perfis apresentam superfícies que podem indicar dobras, em várias escalas, que podem estar relacionados a dobramentos regionais e/ou locais. Os resultados referentes ao levantamento utilizando a antena de frequência 400 MHz apresentam-se restritos à subsuperfície (profundidade máxima de 2,0 metros) e, indica assim um maior detalhamento dos planos de descontinuidade. Em algumas seções foram identificadas feições anômalas e sem continuidade lateral que podem sugerir planos ou cunhas de fraqueza. Em todas as feições identificadas houve a tentativa de correlação com os resultados para todas as frequências utilizadas. Diversos planos de descontinuidades podem ser detectados em frequências diferentes.

5 CONCLUSÕES

- Nesse trabalho, com o arranjo proposto o GPR obteve boa performance de execução e a leitura conseguiu identificar os alvos até 12m de profundidade.

- Conseguiu marcar planos de descontinuidades em seções 2D que auxiliam a identificar interseções de descontinuidades em cunhas, entre a superfície do terreno e o teto da cavidade.
- A análise integrada 3D das seções GPR mostrou ser um importante aliado na interpretação estrutural, ressaltando aspectos relevantes de fragilidade entre o terreno e o teto da cavidade.
- A visualização avançada em Realidade Virtual (RV) permite uma discussão multidisciplinar incluindo a inserção de outros níveis de informação melhorando e complementando a interpretação.
- Os domínios estruturais mapeados no GPR confirmam e detalham as atitudes registradas do mapeamento.
- Os testes são ainda experimentais e deverão ter continuidade para confirmação e aprimoramento dos resultados.

REFERÊNCIAS

- Boaventura, R. S. (1974). *Geomorfologia da Folha Tocantins*. In: Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto Radam Folha SB.22 Araguaia e parte da folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro.
- 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.