



## **Deposição de rejeitos de minério de ferro em reservatórios: uma aplicação do método GPR**

**doi:10.4136/ambi-agua.1831**

**Received: 03 Jan. 2016; Accepted: 18 Jul. 2016**

**Rachel Jardim Martini<sup>1</sup>; Tathiana Rodrigues Caetano<sup>2</sup>;  
Hersília de Andrade e Santos<sup>2\*</sup>; Paulo Roberto Antunes Aranha<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade do Porto (UP), Porto, Portugal  
Programa Doutoral em Engenharia Civil

<sup>2</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, MG, Brasil  
Departamento de Engenharia Civil

<sup>3</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil  
Instituto de Geologia

\* Autor correspondente: e-mail: hsantos@civil.cefetmg.br,  
racheljmartini@gmail.com, anirathagus@gmail.com, aranha1941@gmail.com

### **RESUMO**

Os rejeitos gerados pela mineração de ferro no Brasil atingem volumes altos e têm aumentado em grande velocidade. Normalmente eles são dispostos em estruturas de pilhas ou em reservatórios formados por barragens de rejeitos, que demandam grandes áreas nos complexos minerários. A limitação dos recursos naturais, bem como a limitação de novas áreas para disposição de resíduos, tem levado a uma mudança de paradigma. Portanto, este trabalho teve como objetivo a aplicação de uma técnica geofísica, conhecida como Radar de penetração (GPR), para definir a existência de padrões de sedimentação na subsuperfície do reservatório criado pela barragem de rejeito do Diogo, em Rio Piracicaba, Minas Gerais, Brasil. Para auxiliar o reconhecimento dos padrões capturados pelo GPR, amostras do material da subsuperfície foram coletadas e analisadas por meio de testes de composição mineralógica, teor de umidade, condutividade elétrica, análise mineralógica e granulometria, fluorescência de Raios-X e difração de Raios-X. Os resultados indicaram que áreas com presença de rejeitos que possuem alta concentração de hematita (em torno de 60% na análise mineralógica) tiveram padrões de reflexão alterados. A presença da água gerou algumas reflexões múltiplas, que foram menos significativas em locais de menor profundidade e com maior presença de rejeito, e mais significativas em locais de maior profundidade e com menor presença de rejeitos. De uma forma geral, foi viável a aplicação do método GPR em ambientes aquáticos com subsuperfície com material depositado rico em hematita.

**Palavras-chave:** barragem de rejeitos, geofísica, hematita, reservatório do Diogo.

### **Disposal of iron tailings in reservoirs: a GPR application**

#### **ABSTRACT**

A large volume of waste is generated by iron mining in Brazil, and the amount has been rapidly increasing. The waste is usually stored in large piles or in reservoirs formed by tailings dams, which occupy large areas in the mining complex. The limitation of natural

resources and of new areas for waste disposal has led to change in paradigms. This study therefore aimed to apply a geophysical technique, known as Ground Penetrating Radar (GPR), in order to define sedimentation patterns in the subsurface reservoir created by Diogo's tailings dam in Rio Piracicaba in Minas Gerais, Brazil. To assist the recognition of patterns captured by the GPR, subsurface material samples were collected and analyzed for mineralogical composition, moisture content, electrical conductivity, mineralogical analysis, particle size, X-Ray Diffraction and X-Ray Fluorescence. The results indicated that areas with tailings that had high concentrations of hematite (around 60% in the mineralogical analysis) altered the reflection patterns. The presence of water generated some multiple reflections, which were less significant in shallower sites with more waste and more significant in deeper sites with less waste. In general, the application of the GPR was feasible in aquatic environments with rich subsurface hematite deposits.

**Keywords:** Diogo's reservoir, geophysics, hematite, tailing dam.

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades econômicas mais importantes do Brasil desde o século XVII. Ao longo das últimas décadas, a produção de minério de ferro, rocha com alta concentração de óxidos ferrosos como hematita e magnetita, vêm se destacando como importante exploração minerária. Os principais estados produtores são Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul (Koppe, 2007).

Entretanto, a mineração de ferro gera impactos no meio ambiente que vão desde a supressão de vegetação nativa e remoção de habitat de comunidades até alterações em escoamentos subterrâneos e na qualidade da água. As interferências da atividade minerária no ecossistema local iniciam-se com a remoção dos materiais estéreis do lugar, da retirada do mineral de valor das minas e finalizam-se com a deposição dos resíduos do processo (Barreto, 2001).

De acordo com a política nacional de resíduos sólidos (Brasil, 2010), os resíduos podem ser do tipo estéril ou rejeito, sendo gerados nas atividades de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2006), rejeito é “todo e qualquer material não aproveitável economicamente, gerado durante o processo de beneficiamento de minérios”.

Em geral, os rejeitos são provenientes do processo de extração dos elementos de interesse econômico da mineração. Os rejeitos podem ser classificados em inertes e não-inertes, sendo que estes últimos podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004).

A quantidade de rejeitos gerada nos processos de beneficiamento de minério normalmente é alta, e a disposição é feita, dependendo dos objetivos econômicos da mineradora, em superfície ou é vinculada no processo de extração do minério, de forma subterrânea ou a céu aberto (Lozano, 2006).

As demandas por sustentabilidade ambiental têm provocado ajustes nos processos das principais atividades econômicas do Brasil, como os observados na geração de energia, agricultura, construção civil e na indústria. Não obstante, a mineração vem apresentando necessidades de ajuste do seu processo de exploração e beneficiamento quanto aos novos conceitos de reúso, reaproveitamento e otimização operacional, de forma a garantir serviços e produtos mais sustentáveis ambientalmente.

A possível reutilização do rejeito estocado em barragens e em pilhas motivou este estudo, que teve como objetivo a avaliação dos processos de deposição do rejeito de mineração de ferro dentro de um reservatório de rejeitos controlado, utilizando o método GPR (Ground Penetrating Radar). Esta ferramenta não invasiva propicia uma análise das estruturas de

subsuperfície através da geração e captação de pulsos eletromagnéticos que são emitidos para a subsuperfície e refletem de volta para a superfície do terreno (Davis e Annan, 1989). Assim, foi escolhido o reservatório do Diogo, localizado dentro do complexo minerário Água Limpa (Minas Gerais), para aplicação da técnica.

Esta investigação mostra que é viável a aplicação do GPR em ambientes aquáticos cuja subsuperfície apresenta material rico em hematita depositado, sendo possível identificar padrões de deposição com o GPR.

A técnica de imageamento por GPR da subsuperfície consiste na geração de pulsos eletromagnéticos emitidos por uma fonte na superfície, na qual as ondas eletromagnéticas (EM) de alta frequência são refletidas nas descontinuidades do subsolo (camadas, rochas, estruturas) e detectadas por uma antena receptora posicionada também na superfície. Então, esse sinal é amplificado, digitalizado e armazenado, ficando assim disponível para as etapas posteriores de processamento (Davis e Annan, 1989).

Entre muitos fatores que afetam o sinal deste radar destacam-se: condições locais/ambientais (exemplo: presença de redes de alta tensão), limitações do modelo de GPR utilizado (se a antena é blindada ou não), a atenuação da onda EM no subsolo devido as propriedades dielétricas do mesmo e mudanças no contraste das impedâncias dielétricas entre as interfaces de camada (Aranha, 2002).

## 2. MATERIAL E MÉTODO

Para este trabalho, utilizou-se um equipamento de GPR da GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) modelo SIR 3000. Antenas blindadas, que reduzem as interferências externas, e monoestáticas foram empregadas. Aplicou-se o método de reflexão simples, com afastamento constante entre as antenas. Neste, a antena transmissora e a receptora são separadas por uma distância constante e transportadas ao longo do perfil a intervalos fixos e repetitivos. Os parâmetros considerados para a escolha e aquisição do equipamento GPR foram definidos de acordo com o meio a ser pesquisado e com as condições de resolução e penetração das ondas.

O levantamento feito com o equipamento GPR no reservatório do Diogo seguiu um trajeto reto, definido a priori pelos testes em água. Foram coletados 20 radargramas do fundo do reservatório. Para determinação exata dos radargramas, um GPS do tipo diferencial foi acoplado ao computador do GPR.

Os perfis foram processados nos softwares “Gradix Interpex, Reflexw 2D data-analysis e Radan<sup>®</sup> 7”. As etapas de processamento de dados GPR utilizados para os perfis do reservatório do Diogo foram: pré-processamento, “declip”, análise do espectro de frequências, filtragem “dewow, set time zero, window traces, remove background”, filtragem (Gaussiano), aplicação de ganhos, análise de velocidades, conversão tempo/profundidade e a correção do comprimento dos perfis através dos dados obtidos com o GPS.

Nos perfis obtidos, foram identificadas diversas hipérboles, cujas velocidades de propagação das ondas foram obtidas através dos softwares e, posteriormente, confirmadas com a velocidade obtida manualmente. Com este valor, foi feita a correção da profundidade através da conversão tempo/profundidade dos perfis.

O valor da velocidade de propagação foi confirmado manualmente. No local foi medida a altura da lâmina d'água igual a 0,75 m, que nos radargramas correspondeu a 45 ns. Ao utilizar a relação distância sobre tempo igual a velocidade, obtém-se uma velocidade média de propagação da onda EM da ordem de  $0.033 \text{ m ns}^{-1}$ .

### 2.1. Área de Estudo

Localizado nos municípios de Rio Piracicaba/Santa Bárbara e foco do presente estudo, o complexo minerário de Água Limpa possui uma área equivalente a 4.329 ha, que contempla

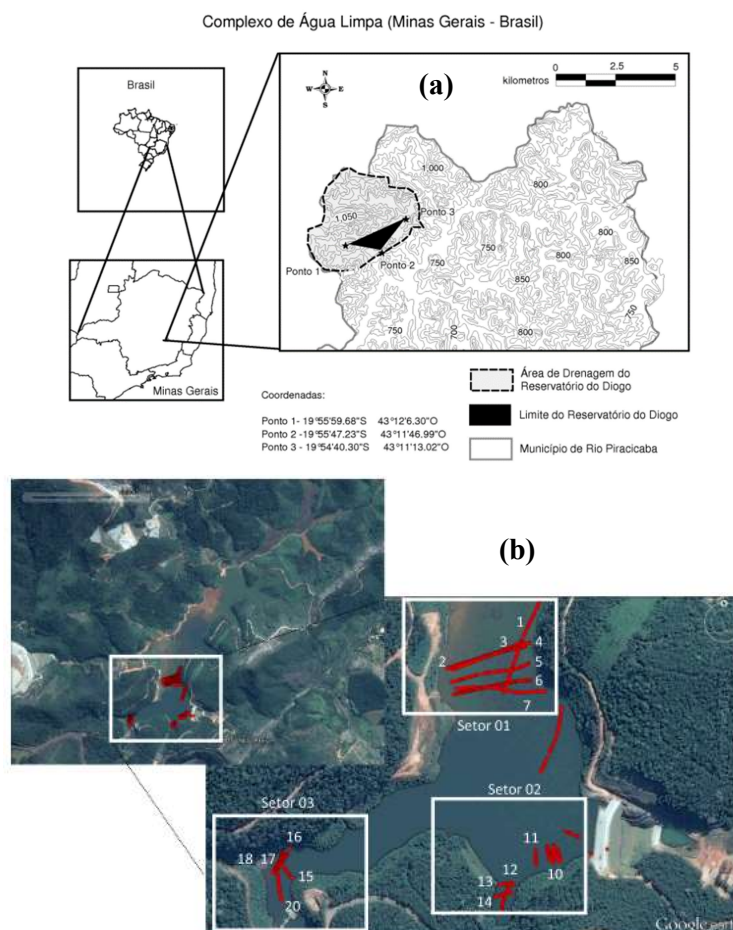
as cavas, pilhas, barragens e a usina de tratamento do minério, além das unidades de apoio como oficinas, posto de combustível, pátio de resíduos, almoxarifado, restaurante, escritório, estradas e viveiros (Martini, 2014).

No complexo minerário de Água Limpa, os resíduos da mineração são dispostos em: 1) cava, quando são estéreis, 2) pilhas pelo método de lançamento hidráulico para montante, quando são rejeitos arenosos e 3) em reservatórios formados por barramento convencional de curso d'água, quando o rejeito é uma lama originada do processo de beneficiamento (Oliveira, 2010). Assim, o reservatório do Diogo (Figura 1a) é um dos locais para onde são destinados os rejeitos do tipo lama (Martini, 2014).

A barragem do Diogo (Lat. 19°55'51" S e Long. 43°11'20" W) está localizada no município de Rio Piracicaba (Minas Gerais) na bacia de mesmo nome. O reservatório surgiu do barramento do córrego Pé da Serra/Diogo, que tem cota de 672 m, e possui volume acumulado de 61.400.000 m<sup>3</sup> e área inundada de 140 ha (Martini, 2014).

## 2.2. Reservatório do Diogo

Devido à forma diferenciada de deposição dos rejeitos no reservatório do Diogo, foram identificados três diferentes setores no reservatório para investigação com o GPR (Figura 1b).



**Figura 1.** (a) Localização aproximada do reservatório do Diogo com curvas topográficas no mapa político do Brasil, e (b) Setores amostrados no reservatório do Diogo e as principais seções imageadas pelo GPR (perfis).

Fonte: IBGE, Google Earth e Topcon.

- Setor 01: Área norte de afluência de rejeito de lama e com menor profundidade;
- Setor 02: Área próxima à barragem com baixa concentração de rejeitos;
- Setor 03: Área oeste de afluência de rejeito de lama e com menor profundidade.

Os rejeitos, que entram no reservatório pelo setor 01 e pelo setor 03, são provenientes de diferentes etapas do processo de beneficiamento.

### 2.3. Amostra dos rejeitos depositados

Para análise da composição físico-química do material depositado no reservatório do Diogo, foram coletadas amostras do material localizado na parte superior do depósito por meio de uma draga. Este material encontrava-se depositado logo abaixo da área onde foi feita a amostragem com o GPR.

Os materiais “Amostras 1” foram coletados no Setor 1 do reservatório e os “Amostras 2” foram coletados no Setor 3 (Figura 1b).

Para estas amostras, foram realizados ensaios de determinação de teor de umidade (ABNT, 1986), condutividade elétrica, análise mineralógica e granulometria (ABNT, 1984a), massa específica (ABNT, 1984b), fluorescência e difração de Raios-X.

Para a determinação dos valores de condutividade elétrica do material coletado, todas as amostras foram misturadas com água destilada e, em seguida, feita a leitura no condutivímetro.

Para a análise mineralógica, a preparação das amostras foi feita da seguinte forma: secagem em estufa, destorroamento e homogeneização da amostra.

No ensaio de Fluorescência e Difrátômetro de Raios-X, para melhor uniformidade na análise, o material analisado foi moído com o auxílio do moinho planetário, e posteriormente peneirado. Amostras com tamanho de partículas inferiores a 75  $\mu\text{m}$  foram utilizadas, sendo compactadas na porta-amostra e submetidas ao ensaio de DRX. O varrimento se deu entre os ângulos  $5^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$  com a velocidade de  $1^\circ \text{min}^{-1}$ .

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Caracterização das amostras

Os resultados da condutividade elétrica das misturas de água destilada com as amostras, indicaram que os materiais “Amostras 2” são mais condutores do que “Amostras 1” (Tabela 1).

**Tabela 1.** Condutividade elétrica das “Amostras 1 e 2”.

Amostras	Úmida	Condutividade elétrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )
1	Sim	59,8
2	Sim	113,9

A análise mineralógica apresentou como resultado a indicação de maior presença de hematita nos materiais “Amostras 2”, sendo apresentado com mais detalhe a seguir:

- Amostras 1: Granulometria muito fina com fração argila-silte. Raramente ocorrem grãos de quartzo e hematita possíveis de serem identificados.
- Amostras 2: Predomínio de pequenas plaquetas de hematita seguido de grãos de quartzo angulares e arredondados que atingiram no máximo 1 mm, enquanto os grãos

de hematita não passam de 0,3 mm. Proporção aproximada: 60% de hematita e 40% de quartzo. Os pontos brancos foram identificados como quartzo e os pretos como hematita.

Com relação ao ensaio de massa específica, os materiais “Amostras 2” (3,154g/cm<sup>3</sup>) foram mais densos que os materiais “Amostras 1” (2,864 g cm<sup>-3</sup>), conforme Tabela 2.

**Tabela 2.** Massa Específica dos materiais “Amostras 1 e 2”.

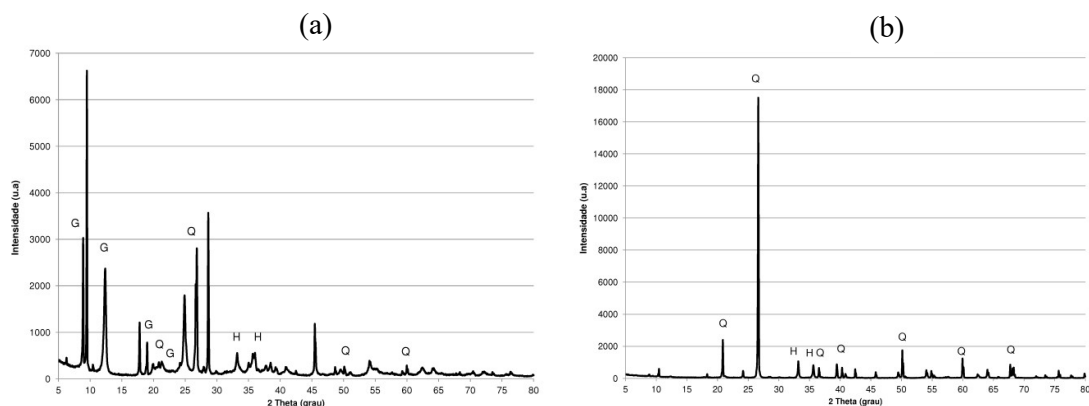
Amostras	Massa Específica (g cm <sup>-3</sup> )		
	A	B	C
1	2,822	2,928	2,843
2	3,103	3,023	3,335

A técnica do DRX aplicada no material “Amostras 1” confirmou a presença de quartzo (Q), hematita (H) e da zeólita sedimentar gismondina (G) em diferentes ângulos de reflexão do raio X (Figura 2a). Já “Amostras 2” teve mais reflexão para o quartzo em diferentes ângulos e também apresentou reflexão da hematita (Figura 2b).

Com relação aos resultados de Fluorescência, há predominância de óxidos ferrosos e de sílica, correspondendo a quase totalidade da composição química (Tabela 3). No material “Amostras 1” também foi verificada significativa presença de óxido de alumínio contido nas zeólitas gismondina, que indicam a presença de contribuição de material sedimentar proveniente de solos de alteração nos depósitos do Setor 1, e não apenas rejeitos de minérios como no Setor 3.

**Tabela 3.** Substâncias encontradas após análise de fluorescência de raios-X.

Amostras	Óxidos principais (%)		
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	55,83	20,88	17,69
2	60,59	37,70	x



**Figura 2.** Difractograma de raios-X dos materiais (a) Amostras 1 e (b) Amostras 2; e: Q = quartzo, H = hematita, e G = Gismondina.

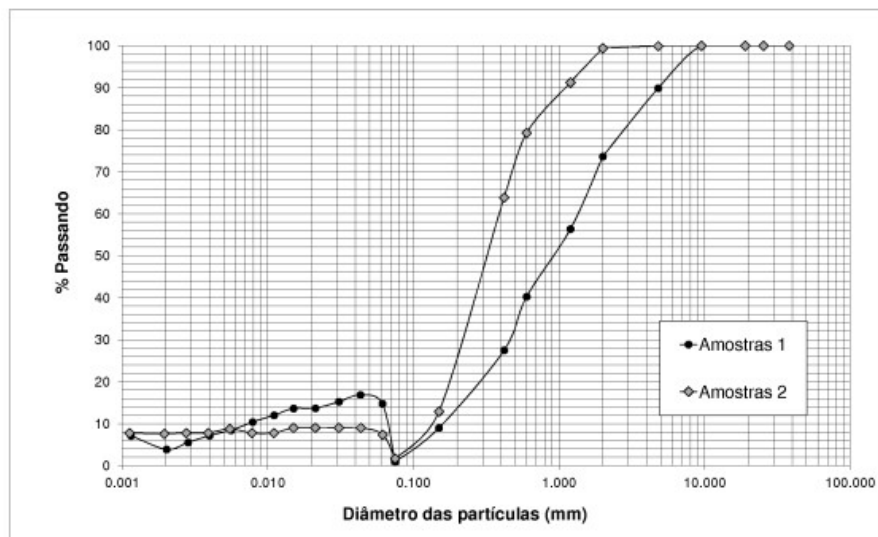


Os resultados do ensaio de teor de umidade (Tabela 4) mostraram que os materiais “Amostras 1” possuem umidade maior do que os materiais “Amostras 2”.

**Tabela 4.** Teor de umidade dos materiais “Amostras 1 e 2”.

Amostras	Umidade (%)
1	53,31
2	15,76

Através dos ensaios de análise granulométrica foram definidas as curvas granulométricas dos materiais “Amostras 1 e 2” (Figura 3).

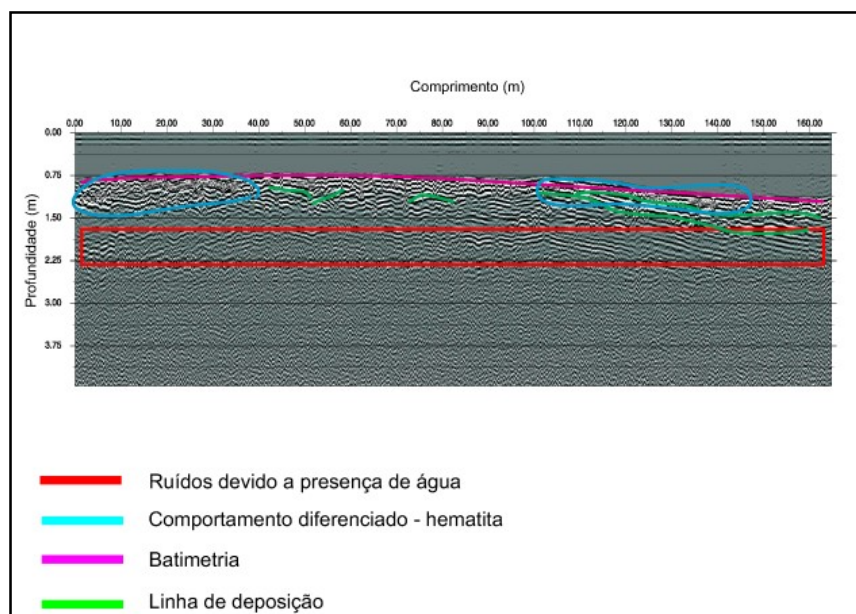


**Figura 3.** Curva granulométrica dos materiais “Amostras 1” e “Amostras 2”.

### 3.2. Perfis GPR

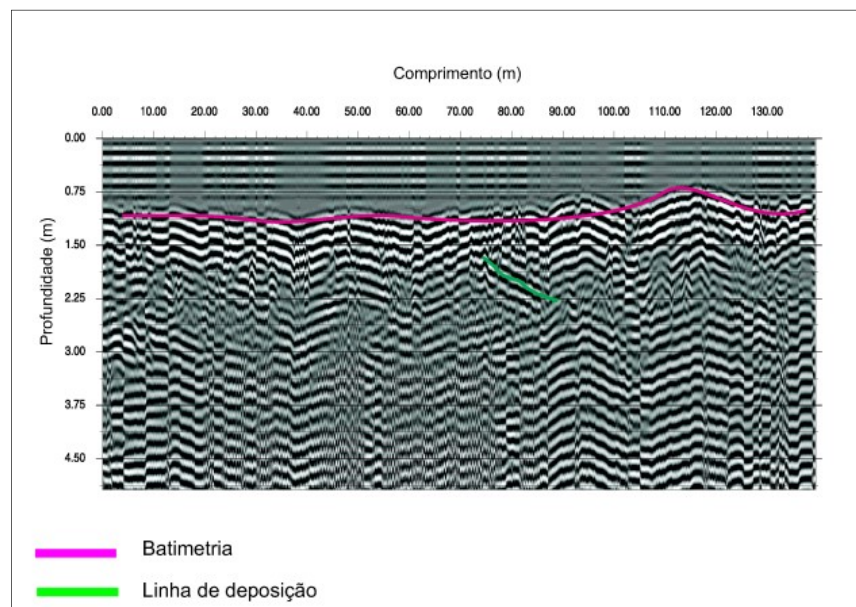
Os perfis de GPR foram adquiridos com as antenas de 200 MHz (Figuras 4, 6 e 7) e de 100 MHz (Figuras 5 e 8). Os respectivos radargramas são apresentados nessas figuras.

Nos perfis do setor 1, seção 01 (Figura 4), foram identificadas a reflexão correlacionada com o fundo do reservatório (destacado em rosa) e reflexões correlacionadas com as linhas de deposição variáveis (verde), que representam um indicativo de mudança do sistema deposicional. A partir da distância de 100,00m até o final do perfil existem dois refletores contínuos marcados com linha verde, interpretados como que acompanham o sentido de deposição dos rejeitos (Norte – Sul) e a inclinação da batimetria do reservatório, e estão relacionadas às linhas de corrente do escoamento que ocorre dentro do reservatório. Neste perfil foram identificados pontos de mudança no padrão de reflexão (na representação do material) que aparecem no fundo do reservatório – onde no radargrama estão estas mudanças. Além disso, também destaca-se um comportamento diferenciado (azul) e ruídos, como a múltipla reflexão (vermelho).



**Figura 4.** Radargrama da seção 01 – Setor 01 - Direção Norte-Sul (Amplificação vertical  $\approx 11$ ) - Antena de 200 MHz.

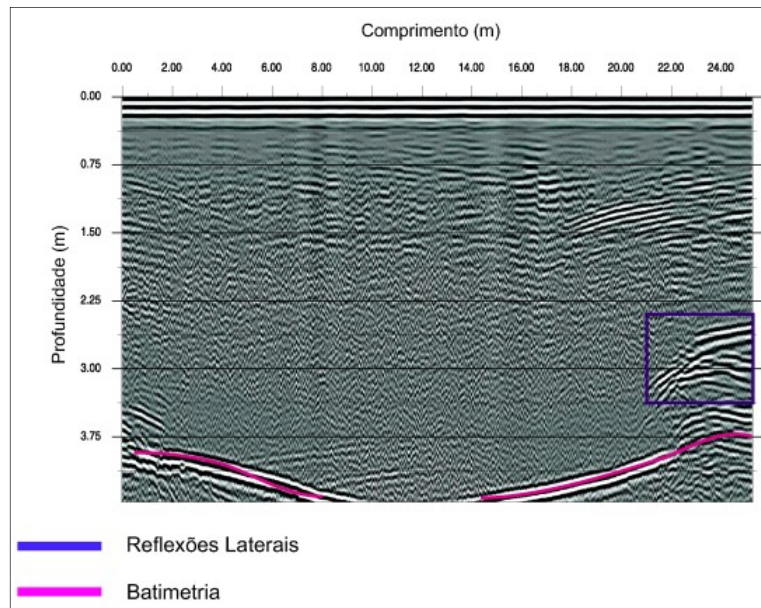
Na seção 4 (Figura 5) é possível identificar a batimetria do reservatório (destacada em uma linha contínua rosa). Além disso, neste perfil foi identificado um refletor inclinado que indica uma linha de deposição de material diferenciado (destacado em linha verde).



**Figura 5.** Radargrama da seção 04 – Setor 01 - Direção Leste-Oeste (Amplificação vertical  $\approx 11$ ) - Antena de 100 MHz.

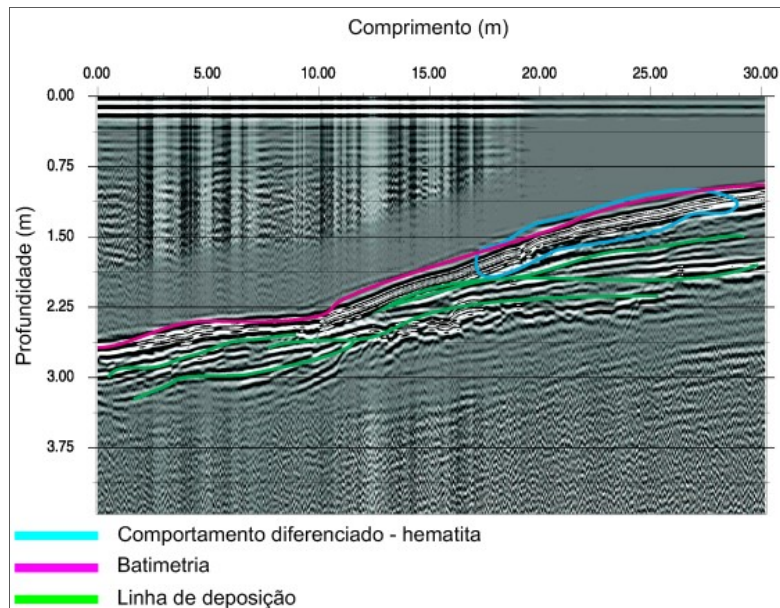
No setor 2, seção 13 (Figura 6), o Radargrama apresenta reflexões laterais (destacadas em roxo) e reflexão do fundo do reservatório, a batimetria (destacada em rosa).





**Figura 6.** Radargrama da seção 13 – Setor 02 - Direção Sul-Norte (Amplificação vertical  $\approx 5$ ) - Antena de 200 MHz.

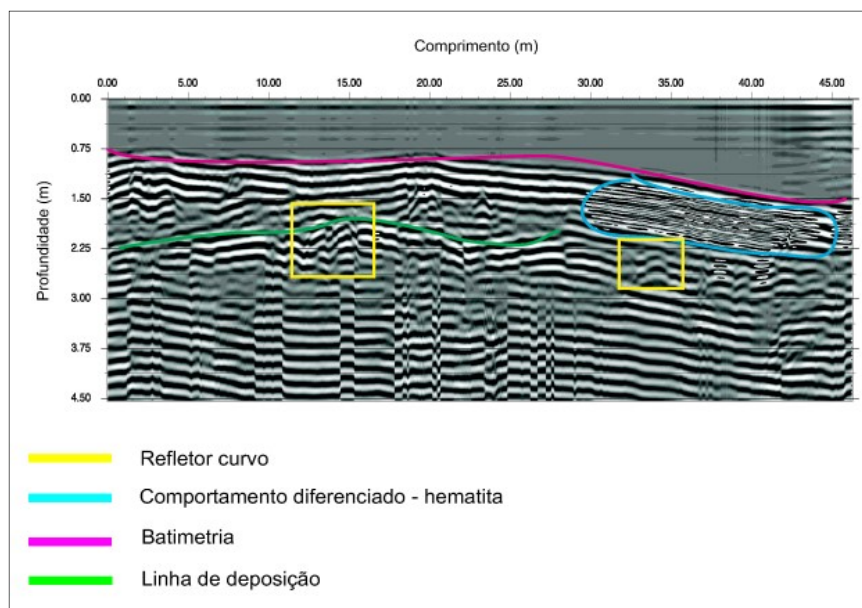
No setor 3, identificou-se na seção 15 (Figura 7) refletores relacionados com as linhas de deposição do material (destacado em verde) e reflexões com padrão diferenciado, o que indica mudança de material (destacado em azul). O fundo do reservatório é identificado com profundidade de até 2,60 m.



**Figura 7.** Radargrama da seção 15 – Setor 03 - Direção Sul-Norte (Amplificação vertical  $\approx 5$ ) - Antena de 200 MHz.

Na seção 16 (Figura 8), pode-se identificar novamente a reflexão do fundo do reservatório, batimetria (destacado em rosa), os refletores correlacionados com as linhas de deposição do material (destacado em verde) e uma variação do tipo de material devido à atenuação do sinal (destacado em azul), e algumas hipérbolas, que representam refletores

curvos (destacadas em amarelo).



**Figura 8.** Seção 16 – Setor 03 Direção Sul-Norte (Amplificação vertical  $\approx 5$ )  
- Antena de 100 MHz.

#### 4. DISCUSSÃO

O GPR é um método geofísico não destrutivo de avaliação da subsuperfície que permite a identificação de materiais enterrados e de mudanças de meio, como por exemplo plumas de contaminação (Beres e Haeni, 1991; Daniels et al., 1995). Desta forma, tem sido ampla sua aplicação nos campos de arqueologia, engenharia de estrutura e rodovias, bem como em áreas que tentam solucionar problemas ambientais (Aranha, 2002).

No presente trabalho, o emprego do GPR definiu o posicionamento de rejeitos do beneficiamento de minério de ferro dentro de um reservatório formado por uma barragem de rejeitos. Assim, uma camada de aproximadamente 3 m a 4 m da subsuperfície foi imageada, sendo possível identificar nos radargramas: a batimetria, a mudança de padrão de reflexão em determinadas áreas e a mudança em linhas de deposição do material.

A eventual presença de camadas superficiais de alta condutividade impede a penetração dos sinais, o que resulta em uma menor profundidade de penetração e resolução do sinal recebido (Benson, 1995). Desta forma, uma primeira preocupação deste trabalho foi determinar se a condutividade elétrica dos rejeitos seria um fator que impediria o imageamento. Os valores obtidos ( $59,3 \mu\text{S cm}^{-1}$  para os materiais “Amostras 1” e  $113,9 \mu\text{S cm}^{-1}$  para os “Amostras 2”) estiveram dentro de valores de condutividade elétrica normalmente encontrados em rios de água doce, que segundo Fondriest (2014) ficam entre 100 e  $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Assim, a condutividade elétrica não foi um fator impactante na obtenção das informações.

Ocorreram algumas interferências devido às reflexões múltiplas, que causou a repetição de algumas informações das primeiras camadas de rejeitos. Contudo, se a presença da camada de água pode causar problemas de reflexão das ondas EM (Moutinho et al., 2005), o efeito da água nos poros da subsuperfície faz com que a constante dielétrica do material não sofra tanta influência da presença dos metais pesados, o que causaria um “apagão” das informações da subsuperfície em corpos arenosos (Oliveira Jr. e Medeiros, 2008). Isto explica o sucesso na

obtenção das informações em camadas de rejeitos formados principalmente por hematita e sílica.

A presença de hematita, que foi maior nos materiais da “Amostras 2” do que nos materiais da “Amostras 1”, esteve relacionada com a mudança dos padrões de reflexão observada nos radargramas do Setor 3. No presente estudo, testes de composição mineral apontaram para 60% de hematita nos materiais “Amostras 2”, bem como os testes de fluorescência de raios-X (60% da presença de Óxido de ferro). Além disso, os materiais “Amostras 2” foram mais finos que os “Amostras 1” e com maior massa específica, o que leva à concentração de material e reduzido número de vazios.

Segundo Baker e Jol (2008), o efeito magnético de materiais pode interferir na propagação da onda do GPR. Quando a permeabilidade magnética, que é a capacidade do material de se tornar magnetizado quando um campo eletromagnético é imposto, é elevada, ocorre a atenuação da amplitude da onda. Desta forma, minerais ferromagnéticos podem ter um efeito considerável sobre a velocidade da onda e na amplitude do sinal GPR (Baker e Jol, 2008).

A permeabilidade magnética depende primariamente do predomínio/tamanho dos grãos, bem como da estrutura/tamanho físico do material. Na maioria dos materiais geológicos subsuperficiais comuns, a quantidade de material ferromagnético é considerada insignificante (tipicamente <2%). No entanto, quantidades apreciáveis de hematita geram relaxamento e perda desses efeitos (Baker e Jol, 2008).

O setor 02, que correspondia ao trecho próximo à barragem e sem afluência de rejeitos, apresentou apenas a batimetria captada pelo GPR e a ocorrência de múltiplas reflexões do fundo do reservatório. Desta forma, a profundidade da lâmina d'água no reservatório pode ter influenciado em uma melhor obtenção de informações nas partes mais rasas e com presença de rejeitos.

A utilização de diferentes antenas em relação à frequência central (100 e 200 MHz) produziu imagens com diferentes graus de detalhamento e com pequena diferença em profundidades (em torno de 1,5 m). Parâmetros como a permeabilidade magnética (Baker e Jol, 2008) e o coeficiente de reflexão, uma vez que estão relacionados a presença de água nos vazios (Oliveira Jr. e Medeiros, 2008), sofrem alteração à medida que o adensamento muda.

Assim, as informações retiradas dos radargramas permitem inferir que foi viável a aplicação do GPR em ambientes aquáticos cuja calha, ou fundo, apresenta material rico em hematita depositado. Além disso, foi possível identificar a presença deste material com o GPR, em função da presença de mudanças no padrão de reflexão que atenuava o sinal de GPR, permitindo assim reconhecer as áreas de concentração de material com alto teor de hematita.

Uma das vertentes do paradigma da sustentabilidade ambiental na mineração é a reutilização de seus rejeitos em novos processos. A aplicação do método GPR em estruturas de disposição de rejeitos é uma ferramenta que pode auxiliar na obtenção de informações referentes a segurança do material depositado e a localização dos rejeitos, cujo interesse seja relacionado a uma possível reutilização.

A análise mineralógica por difração de raios X mostrou a presença de zeólitas sedimentares provenientes da erosão de solos incluídas nos rejeitos do Setor 1, enquanto no Setor 2, somente sedimentos provenientes de rejeitos minerários provenientes da extração da hematita em depósitos de itabirito.

As análises de densidade e umidade das amostras do Setor 1 mostram que embora sejam pouco menos densas que as amostras do Setor 3, tem um conteúdo de umidade 3 vezes maior (15,76 para 53,31), o que torna estes sedimentos mais fluidos e fáceis de movimentar-se em presença de fluxos aquosos, podendo comprometer a estabilidade de barragens sujeitas a esforços provenientes de fluxos de lama com alto peso específico.

Assim sendo, por exemplo, uma barragem capaz de suportar uma coluna de água de 10 m teria que ter um reforço estrutural suficiente para suportar um peso três vezes maior - igual a 30 m de coluna de água no exemplo apresentado, no caso de fluxo de detritos provenientes de movimentação de massa em barragens de rejeito de mineração de ferro.

## 5. CONCLUSÃO

Pelo emprego da técnica de GPR no reservatório da barragem de rejeitos do Diogo, foi possível a retirada de informações dos radargramas e a demonstração de que foi viável a aplicação do GPR em ambientes aquáticos cuja calha, ou fundo, apresenta material rico em hematita depositada. Desta forma, acredita-se que aplicação do método GPR em estruturas de disposição de rejeitos pode auxiliar a obtenção de informações referentes à segurança do material depositado e a localização dos rejeitos de interesse para uma possível reutilização.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) e à VALE pelo financiamento da pesquisa por meio do projeto TEC - RDP-00186-10. Nossos agradecimentos à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de mestrado da autora Rachel Jardim Martini. Agradecemos também a Ronie Amorim e Edgar Sepúlveda pelo apoio gerencial, e à Fernanda Cristina Resende Ramos, Lucas Thadeu da Silva Ramos e Charles Silva de Souza pelo apoio operacional.

## 7. REFERÊNCIAS

- ARANHA, P. R. A. **Estudo das Coberturas Superficiais e sua Dinâmica na Região de Gouveia, Serra do Espinhaço, MG: Utilizando o Radar de Penetração no solo (GPR)**. 2002. 305 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. 1984b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR13028**: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004
- BAKER, G. S.; JOL, H. M. **Ground penetrating radar theory and applications**. Boulder: Elsevier, 2008. 544p.
- BARRETO, M. L. **Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. 216p.



- BENSON, A. K. Applications of ground-penetrating radar in assessing some geologic hazards--examples of groundwater contamination, faults, and cavities. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, p. 177-193. 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90040-3](http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851(95)90040-3)
- BERES, M.; HAENI, F. P. Application of ground penetrating radar methods in hydrogeologic studies. **Groundwater**, v. 29, n. 3, p. 375-386. 1991. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.1991.tb00528.x>
- BRASIL. 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. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, 03 ago. 2010.
- DANIELS, J. J.; ROBERTS, R.; VENDL, M. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, p. 195-207. 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90041-1](http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851(95)90041-1)
- DAVIS J. L.; ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of oil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v. 37, p. 531-551, 1989. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>
- FONDRIEST ENVIRONMENTAL INC. Fundamental of Environmental Measurements. **Conductivity, Salinity & Total Dissolved Solids**. 3 mar. 2014. Disponível em: <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/> Acesso em: 02 nov. 2015.
- KOPPE, J. C. A lavra e a indústria mineral no Brasil – estado da arte e tendências tecnológicas. In: FERNANDES, F. R. C.; MATOS, G. M. M.; CASTILHOS, Z. C.; LUZ, A. B. da (eds.). **Tendências tecnológicas Brasil 2015: geociências e tecnologia mineral**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 81-102.
- LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006
- MARTINI, R. J. **Aplicação do ground penetrating radar em estudos para disposição de rejeitos de minério de ferro**. 2014. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- MOUTINHO, L.; PORSANI, J. L.; PORSANI, M. J. Deconvolução preditiva de dados GPR adquiridos sobre lâmina d'água: exemplo do Rio Taquari, Pantanal Matogrossense. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 1, p. 61-74, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2005000100006>
- OLIVEIRA, C. G. **Avaliação da separação magnética com rejeito final das espirais de água limpa**. 2010. 45f. Monografia (Pós-Graduação lato sensu em Beneficiamento Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- OLIVEIRA Jr., J. G.; MEDEIROS, W. E. Influência do conteúdo de água, granulometria e minerais pesados sobre as reflexões de GPR em corpos arenosos inconsolidados. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, p. 437-449, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2008000400005>