

Emprego do Método Geofísico do GPR na Investigação das Condições de Infra-estrutura de uma Barragem de Terra para Abastecimento Agrícola.

Marco Antonio Barsottelli Botelho
UFBA, Salvador, Brasil, mabarsottelli@gmail.com.br

RESUMO: Apresenta-se o método geofísico do GPR como uma alternativa eficiente para realizar prospecção indireta de obras de barragens. A barragem investigada é a do Apertado, a qual é uma barragem de terra para abastecimento e para irrigação, situada no Município de Mucugê (BA). Realiza-se uma prospecção indireta, empregando GPR com antenas de 80 e 200 MHz, sobre o corpo principal da barragem, inicialmente na crista da barragem e posteriormente em três diferentes cotas (24, 13 e 4 m); finalmente, sobre o piso do canal de chegada que dá acesso ao vertedouro. Todas as seções de GPR foram levantadas com as antenas separadas por afastamento constante de 0,60 e 0,30 m para as antenas nas frequências de 80 e 200 MHz, respectivamente. A aplicação do GPR sobre o corpo desta barragem homogênea de terra, não detectou heterogeneidades indicativas de grandes fraturas ou zonas saturadas. Entretanto, no trecho inicial, ou de acesso, da barragem, detectou-se pequenas estruturas, muitas vezes reveladas por difrações, que estão relacionadas a raízes, oriundas de uma alameda de árvores que foram plantadas paralelas e distando 4,0 metros da barragem. Estas raízes penetraram no corpo da barragem, podendo causar rachaduras ou zonas de fraquezas. O trecho central e final do corpo da barragem (vizinhança do vertedouro) apresenta zonas com pequenos refletores e difratores orientados na vertical, os quais devem ser investigados com métodos diretos, para verificar a possibilidade de serem fraturas ou bolsões de ar que possam vir a constituir um problema de segurança. As sondagens GPR realizadas sobre o piso do canal de aproximação, realizadas no fim do período de seca, quando o piso está seco e acima do nível freático, revelou a presença de fortes refletores associados a muitas difrações. Este padrão ou radarfácies encontrado nas seções de GPR, é característica de eventos de erosão, ou de níveis lateríticos. Investigando a rocha da ombreira da barragem, onde foi escavado o canal de acesso, encontramos veios de lateritas (óxido de ferro). Os fortes refletores associados a difrações são na verdade superfícies lateríticas que cortam a rocha que constitui a ombreira da barragem e sobre esta rocha também foi escavado o canal de aproximação. Acreditamos que a fuga de água pelos veios lateríticos podem causar a acumulação de água entre o terreno e a capa cimentada da rampa do vertedouro, podendo vir a causar o desabamento desta capa e o comprometimento da rampa.

PALAVRAS-CHAVE: GPR, Georadar, prospecção indireta, barragem de abastecimento para irrigação.

1 INTRODUÇÃO

O conjunto de operações que permite uma perfeita caracterização de todas as feições geológicas e geotécnicas passíveis de serem relacionadas com a implantação de uma barragem é denominado de pesquisa ou investigação. A metodologia da pesquisa

envolve a investigação de campo, estudos superficiais, diferentes meios prospectivos, ensaios tecnológicos desenvolvidos *in situ* e ainda testes que podem ser realizados em laboratório. Os meios prospectivos procuram caracterizar todas as feições naturais do local onde será implantada a obra de barramento. A prospecção pode ser classificada em indireta,

semidireta e direta, em função do contato com estas funções naturais, principalmente geológicas e geotécnicas. Vide Costa (2012).

Os métodos geofísicos permitem obter informações sobre as propriedades físicas dos meios investigados. Por exemplo, os métodos sísmicos nos permitem obter as velocidades de propagação das ondas, a eletrorresistividade nos fornece a condutividade elétrica, a gravimetria nos dá a densidade, a magnetometria a susceptibilidade magnética e o moderno método do GPR ou Georadar nos permite avaliar a constante dielétrica. Enfim, os métodos geofísicos são indicados para realizar a prospecção indireta pois permitem a identificação das propriedades físicas e, conseqüentemente, o conhecimento do material sem que haja qualquer contato entre o investigador e o material investigado.

O emprego do GPR e o desenvolvimento de tratamentos para seus dados quando obtidos sobre estruturas de interesse da engenharia civil já existe desde o fim do século passado, vide o trabalho de Jaya et al (1999); entretanto a aplicação do GPR em problemas geotécnicos vem aumentando e diversificando suas aplicações até os dias de hoje, vide o trabalho de Botelho e Alves (2015).

O emprego de métodos geofísicos em estudos para implantação de barreamentos ou investigações sobre a integridade de barragens não é recente, existem exemplos com três décadas ou mais, como exemplo, tem-se o trabalho de Carlsten et al (1995). Neste novo milênio os métodos geofísicos vem sendo cada vez mais empregados para a investigação indireta de barragens, seja com os clássicos métodos elétricos, como em Sjö Dahl et al (2008), seja com o método GPR, como nos trabalhos de Hui e Haitao (2011) e Laperte et al (2011), ou integrando diferentes métodos geofísicos como em Teixeira (2013).

Aplicações de métodos geofísicos na realização de prospecção indiretas em barragens no Brasil podem ser exemplificadas com os trabalhos de Xavier (2010) e o de Zarzi e Rigotti (2011), ambos empregando o método de eletrorresistividade.

2 A BARRAGEM DO APERTADO

A construção da barragem de Apertado foi concluída em julho de 1998, tendo como finalidade principal a irrigação, visando o aproveitamento do enorme potencial agrícola da região que apresenta solos altamente férteis, bem como drenados e propícios a serem agricultáveis mecanicamente. O abastecimento humano também foi contemplado e atende a pequenas localidades próximas ao lago.

2.1 Localização

A barragem de Apertado está localizada no alto curso do rio Paraguaçu (bacia hidrográfica do rio Paraguaçu), nas coordenadas 13° 04' 45" S e 41° 26' 35" W, em área pertencente ao município de Mucugê, distando cerca 26 km da sede deste município e cerca de 480 km da capital do Estado da Bahia, Salvador. Uma vista aérea da barragem do Apertado e parte da área da bacia hidrográfica e terras agricultáveis mais próximas são mostrados na figura 01.



Figura 1. Vista aérea de parte da bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu represado pela barragem do Apertado, bem como as terras irrigadas mais próximas.

2.2 Características Técnicas

As principais características técnicas da barragem de Apertado estão listadas a seguir: (a) Ela é do tipo maciço homogêneo em terra com vertedouro lateral e soleira livre; (b) o

volume de acumulação atinge 108.890.000 m³; (c) a área da bacia hidrográfica perfaz 1.166,0 km²; (d) possui vazão regularizada com 90% de garantia de 8,90 m³/s; (e) o comprimento da crista tem 751,80 m; (f) sua altura máxima é de 27,20 m; (g) a cota de coroamento está em 1.023,70 m; e finalmente, (h) a cota do vertedor está em 1.017,00 m.

3 O MÉTODO GPR

O método geofísico denominado GPR (*Ground Penetrating Radar*) ou Radar de Penetração no Solo é empregado para investigar a existência de fissuras ou fraturas sub-verticais, vazios, tubulações ou outras heterogeneidades que possam estar presentes no corpo da barragem de Apertado, os quais possam constituir algum risco à estabilidade da estrutura. O método GPR tem a capacidade de gerar imagens internas do objeto de investigação, neste caso uma barragem, com alta resolução permitindo detectar a existência de estruturas com dimensões da ordem de centímetros.

A técnica de funcionamento do GPR é similar à de um sistema de reflexões de ondas, tal como um sonar, o qual emprega ondas acústicas. Entretanto, o GPR emprega pulsos eletromagnéticos com alta frequência (10 a 1000 MHz). Estes pulsos penetram no terreno e se propagam, refletem, difratam, refratam e atenuam, de acordo com as propriedades elétricas e eletromagnéticas dos materiais geológicos presentes na sub-superfície. Ou seja, as propriedades elétricas e eletromagnéticas dos materiais determinam a velocidade de propagação do pulso de radar, a atenuação que sofre o pulso e a energia que é refletida nas interfaces entre materiais com diferenças nas propriedades.

A energia que é refletida nas interfaces depende de maneira direta do contraste de propriedades elétricas que exista entre os diferentes meios que estejam em contato direto. A amplitude do sinal de radar refletido, considerando uma incidência normal no

refletor, é definida pelo coeficiente de reflexão (R):

$$R = \frac{(k_1)^{1/2} - (k_2)^{1/2}}{(k_1)^{1/2} + (k_2)^{1/2}} \quad (1)$$

onde, k_1 e k_2 são as constantes dielétricas dos meios (1) e (2), em contato, considerando uma incidência do pulso perpendicular à interface.

O pulso de radar ao atingir uma superfície de contato entre dois meios com propriedades (elétricas e eletromagnéticas) distintas vai sofrer uma partição da energia proporcional ao contraste entre as constantes dielétricas. A porção do pulso que sofre a reflexão, particularmente deslocando-se em direção ao ponto da superfície onde está a antena receptora, será captada, amplificada, digitalizada e armazenada em meio magnético.

Um espaço vazio (cheio de ar) apresenta contraste de constantes dielétricas com o solo que o envolve. Estes espaços vazios podem se apresentar como fraturas ou gretas de ressecamento, os quais geram reflexões e/ou difrações das ondas eletromagnéticas que incidem e refletem neles. Por outro lado, podem existir zonas saturadas de água, nas quais o pulso eletromagnético vai sofrer atenuação e/ou partição de energia. O campo de ondas refletido, leva os efeitos causados pelas heterogeneidades internas ao corpo da barragem para a superfície, os quais serão detectados pela antena receptora e então registrado nos radargramas. A velocidade de propagação das ondas de radio do GPR, em materiais de baixa perda, é dada por :

$$V = c / \sqrt{K} \quad (2)$$

onde, c é a velocidade da luz no vácuo e K é a constante dielétrica relativa do meio atravessado.

Vale esclarecer que os terrenos mais argilosos, particularmente quando saturados de água, são melhores condutores de eletricidade e, por esta característica, causarão maior absorção do pulso eletromagnético. Esta capacidade do GPR em detectar zonas mais aeradas ou mais saturadas o torna uma ferramenta importante

para realizar não só a prospecção indireta, com o objetivo de caracterizar o local onde será implantada a obra, como também avaliar *in situ* a existência de feições que possam comprometer a segurança da estrutura.

3.1 Aquisição dos Dados

A campanha de aquisição dos dados de radar (GPR) foram realizadas inicialmente ao longo da crista da barragem (na cota de 27,2 m), seguido por mais três (3) perfis ao longo do lado jusante do corpo da barragem, porém em diferentes níveis com 4, 13 e 23 metros de cota. Posteriormente realizou-se uma campanha sobre o canal de acesso, desta vez empregou-se um arranjo perfis levantados em direções ortogonais entre si.

Os levantamentos com GPR foram realizados empregando-se antenas de 80 e de 200 MHz, as quais operam acopladas a uma roda contadora de distância e controladora do intervalo entre os disparos que geram as sondagens, vide Figura 2.



Figura 2. Levantamento de perfil GPR empregando antena de 200 MHz ao longo da cota de 23 m na face jusante do corpo da barragem.

Os traços (*scans*) dos perfis GPR são levantados com odômetro (*survey wheel*) com uma taxa de disparo de 100 scans/metro ao longo das linhas, com um intervalo de disparo de 0,10 metros entre as sondagens. Vale lembrar que a seção de radar ou radargrama é formado pela justaposição lateral dos *scans* e as aquisições dos dados foram realizadas com arranjos de antenas no modo de afastamento constante.



Figura 3. O CPU do GPR é posicionado e ligado às antenas, as quais se deslocam ao longo do perfil. Este perfil foi levantado na cota de 13 m na face jusante do corpo da barragem.

3.2 Processamento dos Dados GPR

Após o registro os dados de GPR necessitam ser processado para que a imagem da sub-superfície que ele fornece fique ainda mais nítida e então se possa efetuar a interpretação do radargrama. O fluxograma do processamento dos radargramas inclui : (a) definição do tempo zero; (b) aplicação de filtros no domínio da frequência (corta baixa, passa banda, etc.), onde usamos os limites 30 – 280 MHz para a antena de 200MHz e 15 – 130 para a antena de 80 MHz; (c) ganhos AGC com janelas de 40 ns (200 MHz) e 60 ns (80 MHz) e ainda ganhos programados; (d) a determinação da velocidade de propagação do pulso de radar no solo é feito a partir da análise do colapso de hipérboles; (e) A conversão tempo - profundidade é realizada quando for necessário determinar a profundidade de alguma interferência.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Sobre a barragem do Apertado foram levantadas cinquenta e duas (52) seções de GPR ou radargramas, sendo 48 ao longo dos quatro perfis traçados sobre o corpo da barragem (um na crista e três na face jusante) e quatro (4) perfis no canal de chegada. A seguir, apresentaremos os resultados obtidos e alguns radargramas que nos levaram aos resultados apresentados.

4.1 Face da Jusante da barragem

O perfil levantado na cota de 4,0 metros inicia próximo ao local onde foi cortado um alinhamento de árvores de eucalipto e o radargrama 22 ocupa esta posição inicial. A figura 4 mostra o local onde se iniciou o registro do Radargrama 22 (vejam os tocos de eucalipto) bem como a antena posicionada sobre a barragem.



Figura 4. Levantamento do radargrama 22 sobre o perfil com cota de 4 m, na face jusante do corpo da barragem. Observar os tocos remanescentes das árvores cortadas.

O Radargrama 22 inicia nas proximidades do carro, ou melhor, nos eucaliptos cortados, tal como mostrado na figura 4, se prolongando por 50 m. O radargrama 22 é mostrado na figura 05 e os círculos amarelos ressaltam estruturas que podem ser indicativos de raízes, as quais se situam a 2 e 3 metros abaixo da cota de levantamento. Vale acrescentar que neste trabalho adotaremos as cores vermelha para indicar possíveis fissuras ou gretas de ressecamento do material argiloso; a cor azul para indicar estruturas enterradas e, como já foi dito, a cor amarela para indicar raízes.

O radargrama 24 foi levantado num nível 2,0 m abaixo e a 50 m do ponto final do perfil 22, acompanhando uma calha horizontal de concreto.

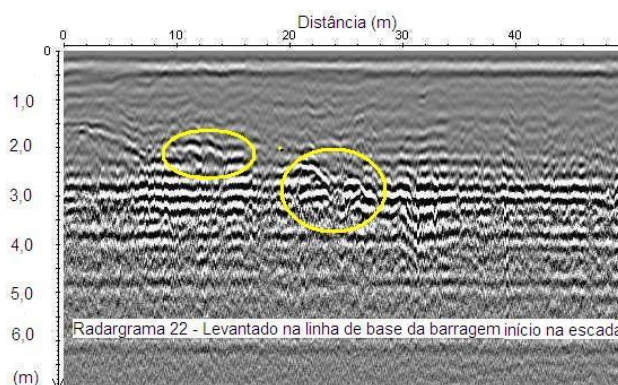


Figura 5. O radargrama 22 mostra um refletor nos primeiros 16 metros da horizontal (x), o qual pode representar o contato entre o terreno natural e o aterro da construção da barragem. Os círculos amarelos ressaltam estruturas associadas a hipérbolos que parecem tratar-se da presença de raízes dos eucaliptos.

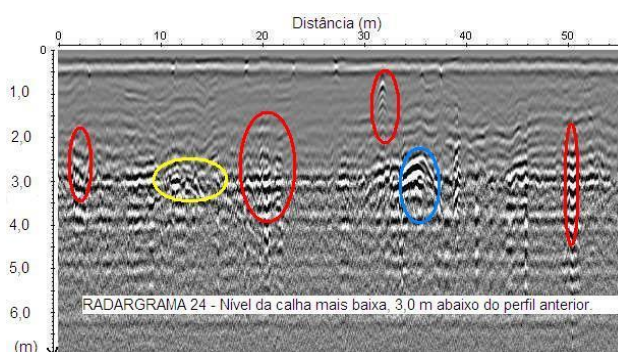


Figura 6. O radargrama 24 feições subverticais alongadas que estão associadas a gretas de ressecamento (vermelho); feições hiperbólicas com amplitudes fortes no ápice (azul); e finalmente, diversas hiperbólicas sobrepostas que podem tratar-se de raízes ou, mais provavelmente, pedaços de rochas jogados junto ao material mais fino.

Enfim, o GPR detectou muitas das gretas de ressecamento observadas no corpo da barragem, detectou outras mais profundas, abaixo de 2,0 ou 3,0 metros da superfície (elipsóides alongados na vertical); detectou zonas heterogêneas que revelam material de aterro grosso, vide figuras 6 e 7 (elipses vermelhas); e também o topo da estrutura de tomada de água (elipse azul), revelado por fortes difrações. Os radargramas das figuras 5 e 6 mostram difrações mais fracas que são oriundas de raízes e de materiais com diâmetros da ordem de poucos centímetros.

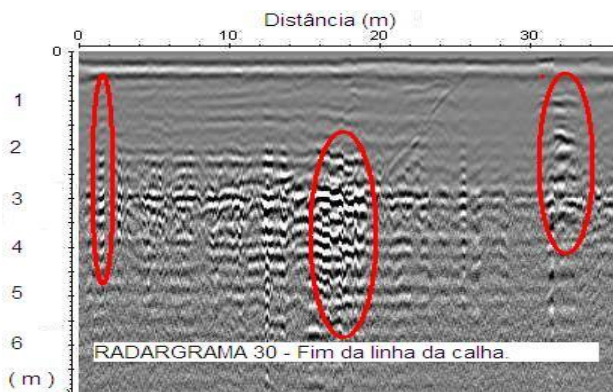


Figura 7. O radargrama 30 também revela duas feições subverticais alongadas que estão associadas a gretas de ressecamento (elipsóide vermelho alongado) e ainda uma zona que apresenta difrações e um padrão de amplitude mais forte que pode indicar pedaços de rochas jogados junto ao material mais fino, ou ainda, estruturas internas da rocha onde foi esculpida a ombreira direita.

4.1 Canal de Aproximação ou de Chegada

Aproveitando a estação de secas, a qual provocou o baixo nível das águas, e deixou exposto o piso da área plana do canal de aproximação que leva ao vertedouro, levantamos o radargrama 031 para o reconhecimento da sub superfície. Este perfil corta toda a área numa direção aproximadamente paralela ao muro do vertedouro. O resultado obtido foi surpreendente, o radargrama gerado com a antena de 200 MHz, nos revela refletores fortes e irregulares, aos quais estão associados a muitos pontos difratores.

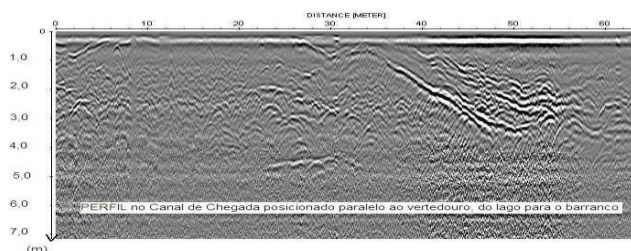


Figura 8. O radargrama 31 foi levantado na distância de 40 m do muro do vertedouro, revelando fortes refletores associados a difratores.

Com o objetivo de entender melhor a estrutura detectada abaixo do piso do canal de aproximação, realizou-se o levantamento de mais três radargramas, sendo um primeiro mais

próximo e um segundo mais afastado do muro do vertedouro (linhas azuis), considerando a posição do radargrama 31. E um novo radargrama perpendicular (linha amarela) ao muro de arrimo e também aos outros três (3) radargramas. Vide a figura 09.

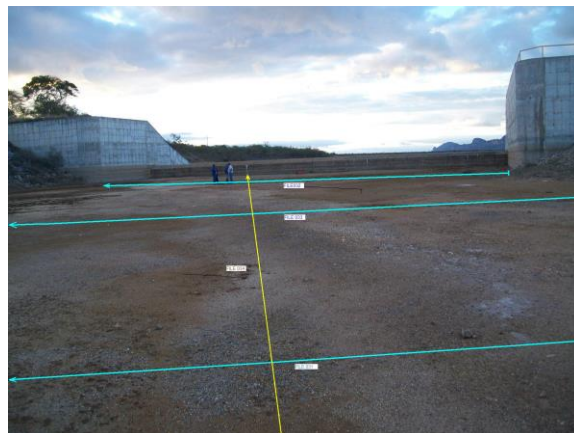


Figura 9. Os radargramas 032, 031 e 033 estão a distâncias crescentes do muro do vertedouro (20, 40 e 60 m), sendo representados por linhas de cor azul claro, já o Perfil 034, em amarelo, é perpendicular aos demais.

Para uma melhor compreensão da geologia da sub-superfície levantou-se mais dois perfis paralelos ao 031, os quais apresentam uma separação de aproximadamente 20 metros (o 032 e o 033) e, ainda, um perfil que é perpendicular aos perfis anteriores (o 034 que é amarelo) e também ao muro do vertedouro. O radargrama 32 também revela as mesmas feições de um refletor irregular com difrações.

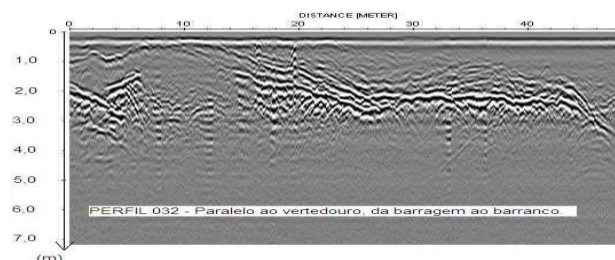


Figura 10. O radargrama 32 situado mais próximo do muro do vertedouro (20 m) também mostra radarfície similar ao mostrada no radargrama anterior (o 31),

Vale esclarecer que refletores irregulares, com amplitudes fortes, associados com muitos pontos difratores, indicam uma superfície erosional, tanto nos radargramas (GPR) como em seções sísmicas geradas com o método da

reflexão sísmica. A alta amplitude revela contrastes de impedância em ambos os métodos, entretanto, no método GPR, tais refletores podem ser gerados por níveis de concreções ferruginosas.

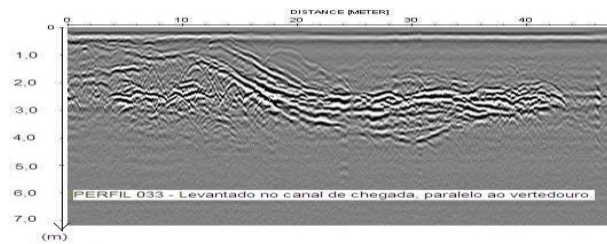


Figura 11. O radargrama 33 situado mais afastado do muro do vertedouro (60 m) também mostra a mesma radarfácies dos radargramas anteriores (o 31 e o 32).

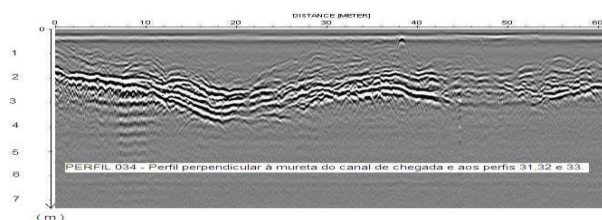


Figura 12. O radargrama 34 foi levantado na direção perpendicular do vertedouro e, conseqüentemente, aos outros radargramas (o 31, 032 e o 33), e também revelou o mesmo tipo de radarfácies dos demais radargramas.

O radargrama perpendicular ao muro, mostrado na figura 12, confirmou que o forte refletor se prolonga por 60 metros, atingindo o vertedouro. A profundidade máxima deste refletor, ou melhor, deste conjunto de refletores, aproximadamente paralelos, varia de 2,0 a 4,0 metros.

Investigando a parede lateral do canal de chegada, onde o mesmo foi escavado, verificamos a existência de níveis lateríticos. Portanto, acreditamos que a forte superfície refletora presente em todos os radargramas levantados na área plana do canal de chegada, que leva até o muro do vertedouro, sejam níveis lateríticos similares aos encontrados no barranco da margem esquerda da barragem, mostrados pelas setas vermelhas na figura 13. Existe um nível superficial (vide figura 14), o qual é formado por acúmulo de material laterítico, na

dimensão de seixos e calhaus, os quais se destacam nos afloramentos, por causa do intemperismo que os destacou da rocha intemperizada, devido à sua maior resistência quando comparado à da matriz desta rocha.



Figura 13. A imagem mostra o barranco lateral ao canal de aproximação, onde pode-se observar um nível laterítico superficial e um segundo nível no topo de uma formação argilosa branca, as quais contêm concreções ferruginosas.



Figura 14. Detalhe da concreção ferroginosa presente nos níveis lateríticos que cortam o barranco ao lado da área plana do canal de aproximação que leva ao vertedouro.

Considerando que o canal de aproximação, e a própria ombreira ao lado, foram esculpidos no terreno existente na área, e que os níveis lateríticos constituem superfícies que atravessam a barragem da jusante à montante, (nesta região da barragem). Podemos concluir que estes níveis lateríticos revelados claramente pelo método geofísico do GPR podem constituir superfícies de percolação de água. Observando

a rampa de descida do vertedouro, vide figura 15.

Aproveitando o momento de seca na região, quando não há água escoando pelo vertedouro da barragem do Apertado, podemos observar a rampa cimentada do vertedouro e a existência de surgimentos de água, com coloração ferruginosa, fluindo através da capa de cimento. Vide a figura 15.



Figura 15. Detalhe da rampa do vertedouro, onde as setas vermelhas indicam pontos de fuga de água, através do concreto, indicando que ocorre acúmulo de água abaixo da rampa.

CONCLUSÕES

O GPR encontrou refletores irregulares e associados a muitas difrações em profundidades entre 3,0 e 4,0 metros. Este padrão de resposta do GPR indica paleo-superfícies e/ou níveis lateríticos, e estes níveis lateríticos tem boa permeabilidade. Isto foi confirmado pela geologia encontrada na parede escavada do canal de aproximação e no terreno vizinho ao canal. É confirmado pelo GPR que esta superfície laterítica se estende da montante até ao plano inclinado do vertedouro, o que, aliado ao fato de que pode-se verificar visualmente a fuga de água pela parede cimentada da rampa do vertedouro, podemos temer que o fluxo da água gere bolsões de água abaixo da parede da rampa e que isto possa constituir um futuro

Os estudos realizados com GPR na face jusante do corpo da barragem o GPR detectou muitas das gretas de ressecamento, também observadas visualmente no corpo da barragem,

detectou outras mais profundas, abaixo de 3,0 metros da superfície; detectou zonas heterogêneas que revelam material de aterro grosseiro; e também o topo da estrutura de tomada de água, revelado por fortes difrações. Verificou-se a existência de difrações mais fracas, próximas a uma alameda de árvores já cortadas, as quais interpretamos como geradas pelas raízes das árvores..

REFERÊNCIAS

- Carlsten, S.; Johansson, S. e Worma, A. (1995). Radar Techniques for Indicating Internal Erosion in Embankment Dams. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 33, p.143-156.
- Botelho, M.A.B. e Alves, R. (2015). Emprego de Método GPR e da Migração Reversa no Tempo (RTM) na Compreensão e Solução de Problemas Geotécnicos, *14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, SBGf, 9p. Rio de Janeiro, CD-ROM
- Costa, W.D. (2012) *Geologia de Barragens*, Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 352 p.
- Jaya, M.; Botelho, M.; Hubral, P.; Liebhadt, G. (1999). Remigration of Ground-penetrating Radar Data, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 41, p.19-30.
- Hui, L. e Haitao, M. (2011). Application of Ground Penetrating Radar in Dam Body Detection. *Procedia Engineering*. Vol.26, p.1820-1826.
- Loperte, A.; Bavusi, M.; Cerverizzo, G.; Lapenna, V. e Soldovieri, F. (2011). Ground Penetrating Radar in Dam Monitoring: The Test Case of Acerenza (Southern Italy), *International Journal of Geophysics*, Vol.8, p.1-9.
- Sjödahl, P.; Dahlin, P.; Johansson, S. e Loke, M.H. (2008). Resistivity Monitoring for Leakage and internal erosion detection at Hällby Embankment Dam, *Journal of Applied Geophysics*, Vol.65, p.155-164.
- Teixeira, W. L. e (2013) *Um Estudo das Condições de Percolação e Estabilidade em Barragens de Terra Mediante Métodos Geofísicos: Caso do Dique de Sant LLorenç de Montgai – Espanha*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 168 p.
- Xavier, F. Da F. (2010) *Geofísica Elétrica Aplicada a Investigação Geotécnica do Subsolo para Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)*, COBRAMSEG 2010, ABMS, 9p., CD-ROM.
- Zorzi, R.R. e Rigotti, A., (2011). Aplicação de Métodos Geoeletricos para Monitoramento da Barragem de Concreto UHE Gov. José Richa, *Boletim Paranaense de Geociências*, Vol.64-65, p. 48-58.