

INTEGRAÇÃO DE DADOS DE GPR E ANÁLISE GEOTÉCNICA NO MONITORAMENTO DA BARRAGEM SÍTIOS NOVOS (CAUCAIA, CEARÁ)

INTEGRATION OF GPR DATA AND GEOTECHNICAL ANALYSIS IN THE MONITORING OF THE SÍTIOS NOVOS DAM (CAUCAIA, CEARÁ)

DANIEL CHAVES ALMEIDA

Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, daniel.almeida.geo@gmail.com

JOÃO WILTON OLIVEIRA EUSTÁQUIO

Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, wiltoneustaquio49@gmail.com

CARLA BEATRIZ COSTA DE ARAÚJO

Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, carlabeatriz@ufc.br

FRANCISCO CARLOS HENRIQUE PIO DE OLIVEIRA

Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, franciscocarlospho@gmail.com

RESUMO ABSTRACT

O monitoramento geotécnico de barragens é atualmente realizado, principalmente, por métodos convencionais como inspeções visuais e medidas de instrumentações como medidores de nível d'água, piezômetros e marcos superficiais, todavia estes fornecem apenas dados pontuais, além disso algumas barragens, em especial de pequeno porte, não possuem qualquer tipo de instrumentação, o que limita a compreensão das condições hidráulicas e mecânicas do barramento. Uma alternativa crescente aos métodos convencionais é o uso dos métodos geofísicos, estes possibilitam investigações mais completas e não invasivas. Visando verificar a aplicabilidade desses métodos em barragens de terra para uso hídrico, foram realizadas aquisições de Ground Penetrating Radar (GPR) na Barragem Sítios Novos, localizado no município de Caucaia, Ceará. O levantamento geofísico foi realizado em duas campanhas, a primeira ocorreu em janeiro de 2023, na qual o reservatório se encontrava com 70,36% de capacidade, e uma segunda campanha em maio de 2023, onde este registrava cota máxima, possibilitando capturar diferentes cenários de percolação. Por conseguinte, foi realizado o comparativo com dados de medidores de nível d'água e com análises de percolação realiza-

Geotechnical monitoring of dams is currently conducted using conventional methods such as visual inspections and measurements from instruments like water level meters, piezometers, and surface markers. However, these provide only point-specific data. Additionally, some dams, especially smaller ones, lack any instrumentation, limiting the understanding of the hydraulic and mechanical conditions of the structure. An emerging alternative to conventional methods is the use of geophysical methods, which enable more comprehensive and non-invasive investigations. To verify the applicability of these methods in earth dams for water use, Ground Penetrating Radar (GPR) surveys were conducted at the Sítios Novos Dam, located in the municipality of Caucaia, Ceará. The geophysical survey was conducted in two campaigns: the first took place in January 2023, when the reservoir was at 70.36% capacity, and the second in May 2023, when it was at full capacity, allowing for the capture of different percolation scenarios. Subsequently, a comparison was made with water level meter data and percolation analyses conducted through geotechnical modeling, which allowed for a better understanding of the dam's structure and hydraulic behavior.

das por modelagem geotécnica, que permitiram uma melhor compreensão da estrutura da barragem e o seu comportamento hidráulico. Através do Ground Penetrating Radar e análises comparativas foi possível identificar diferentes materiais constituintes da barragem, bem como estruturas internas. Ademais, foi feito o monitoramento da evolução do nível d'água e detecção de potencial zona anômala. Os resultados obtidos indicam a eficiência e aplicabilidade do GPR como metodologia auxiliar no monitoramento de barragens.

Palavras-chave: Barragem; GPR; Modelagem geotécnica; Instrumentações.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade (construção de cidades, geração de energia, agricultura, lazer, entre outros) sempre esteve ligado à disponibilidade hídrica das diversas regiões do mundo. Neste aspecto, a construção de barragens tem papel fundamental para assegurar a oferta de água contínua necessária para a manutenção das cidades e das populações.

No Brasil, o crescente número de barragens distribuídas por todo o território trouxe também uma crescente preocupação sobre a segurança destas estruturas, tendo em vista o envelhecimento de muitas barragens construídas, a crescente dependência da sociedade dos benefícios proporcionados por elas, e a necessidade de minimizar riscos e evitar efeitos catastróficos (Canali, 2002; Menescal, 2009). A possibilidade de ruptura desses empreendimentos acarreta consequências para a sociedade, tendo em vista que podem ocorrer perdas de vidas humanas, além de impactos econômicos, sociais e ambientais. No Estado do Ceará, destaca-se os eventos ocorridos durante a quadra chuvosa de 2022 como a Barragem de Caraíbas (Várzea Alegre) e a Barragem do Catolé (Cedro) ocorridas no início de 2022, bem como as ocorridas em 2023, são exemplos a Barragem do Açude Retiro em Maranguape e a barragem do açude Romão, na zona rural de Farias Brito. (Freitas, 2022; Cesário, 2023; Sampaio & Freitas, 2023).

Conforme descrito por Menescal (2009), a experiência mundial sobre infraestruturas de barragens tem mostrado que os custos necessários à

Through Ground Penetrating Radar and comparative analyses, it was possible to identify different materials constituting the dam, as well as internal structures. Additionally, monitoring of the water level evolution and detection of potential anomalous zones was performed. The results obtained indicate the efficiency and applicability of GPR as an auxiliary methodology in dam monitoring.

Keywords: Dam; GPR; Geotechnical modeling; Instrumentations.

garantia da segurança de uma barragem são pequenos, se comparados com aqueles que se seguem em caso de ruptura. Ressalta-se ainda que as barragens são estruturas com significativo valor econômico, e no caso de barragens para fins de abastecimento de cidades, em geral, são construídas com recursos públicos. A segurança de barragens visa garantir a estabilidade das estruturas e reduzir ao máximo as possibilidades de acidentes (BRASIL, 2020). A segurança é garantida através de revisões periódicas compreendendo a análise das características hidráulicas, hidrológicas, de estabilidade estrutural e a adequabilidade operacional das diversas instalações, de acordo com critérios de projeto e informações disponíveis quando da realização de cada revisão. Usualmente, as barragens são monitoradas através de inspeções visuais e instrumentos como: marcos superficiais, inclinômetros, medidores de nível d'água, piezômetros, medidores de deformação, célula de pressão total, medidores de vazão e estações meteorológicas (Machado, 2007; Cruz, 2014; Silveira, 2016). Apesar desses métodos diretos serem tradicionais e eficientes, oferecem apenas dados pontuais sobre a barragem.

Os métodos geofísicos surgem como uma metodologia complementar para o monitoramento e inspeção das barragens, uma vez que geram imagens contínuas de subsuperfície, possibilitando a identificação de possíveis irregularidades na estrutura da barragem. Esses métodos possuem grande potencial para detectar processos de erosão interna e infiltrações anormais em estágios iniciais de desenvolvimento (Sjödahl et al. 2008, Be-

drosian et al. 2012). Tal técnica de monitoramento é não-destrutiva, o que é particularmente importante quando se trabalha com barragens, onde a perfuração e outras investigações penetrantes são normalmente evitadas (Sjödahl et al., 2008). Além dos métodos geoeletricos, existem ainda métodos sísmicos e o radar de penetração no solo (Ground Penetrating Radar), que também têm sido usados em investigações de barragens (Mailani, 2006; Kim et al., 2007). Medições de resistividade elétrica têm sido usadas em várias ocasiões para investigações de locais de barragens (Aina et al. 1996, Batayneh et al. 2001) e controle da segurança de barragens (por exemplo, Van Tuyen et al. 2000; Buselli e Lu, 2001; Panthulu et al. 2001; Voronkov et al. 2004; Cho & Yeom, 2007).

Os métodos geofísicos têm forte potencial para atuar auxiliando a instrumentação convencional, podendo, no caso de inexistência ou falha geral desta, fornecer informações mais completas e relevantes que a inspeção visual (Teixeira, 2013). Por isto, este trabalho apresenta uma aplicação de Ground Penetrating Radar na caracterização geológico-geotécnica da Barragem Sítios Novos, localizada no município de Caucaia, Ceará, Nordeste do Brasil. O levantamento mapeou camadas subsuperficiais e examinou o comportamento hídrico no interior do maciço, auxiliado por análises de percolação em softwares geotécnicos e por medidas de instrumentações (medidores de nível d'água).

2. OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicabilidade do método geofísico Ground Penetrating Radar como uma ferramenta auxiliar no monitoramento de barragens de terra. Através da interpretação dos levantamentos de Ground Penetrating Radar, o trabalho visou contribuir para a segurança e a gestão das barragens, oferecendo uma análise detalhada das condições internas e potenciais riscos associados à estrutura.

3. METODOLOGIA

O trabalho iniciou-se com o levantamento do acervo bibliográfico acerca da Barragem Sítios Novos e dos métodos de estudo (Ground Penetra-

ting Radar e modelagem geotécnica). Através das informações levantadas para caracterização do reservatório em análise, especialmente da Base Documental da Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH, 1997a, 1997b, 1997c, 1999), foi possível planejar as aquisições geofísicas e levantar a geometria e os parâmetros geotécnicos para a modelagem de fluxo.

A Barragem Sítios Novos está localizada na região metropolitana de Fortaleza, mais especificamente no distrito de Sítios Novos, na porção oeste do município de Caucaia. A geologia da região é composta em 80% por rochas cristalinas do Pré-Cambriano, pertencentes ao Complexo Gnaiss Migmatítico (PEgn), e por coberturas sedimentares do Terciário-Quaternário, representadas pela Formação Barreiras (Tqb). Em relação às ocorrências minerais na área do empreendimento, constata-se a presença de calcário e diatomito, geralmente associados ao leito dos corpos d'água da região (Demes, 2013). A área também inclui sedimentos inconsolidados da cobertura aluvionar do Rio São Gonçalo, que foram utilizados na construção da barragem, concluída em 1999, com o objetivo de abastecer o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) e as comunidades locais. A barragem é composta por um barramento principal de terra do tipo zoneada, uma barragem auxiliar de terra do tipo homogênea, uma tomada d'água do tipo galeria e um vertedouro, além de conter um sistema adutor, que constitui o Canal do Pecém.

Os dados de Ground Penetrating Radar foram adquiridos em duas campanhas de trabalho de campo, realizadas em diferentes condições de nível de água na barragem: a primeira em 13 de janeiro de 2023 e a segunda em 25 de maio de 2023. Nos mesmos dias das aquisições geofísicas, foram coletadas as leituras das instrumentações. O banco de dados de instrumentação, complementado e cedido pelo corpo técnico da COGERH, permitiu verificar a evolução temporal das leituras. Além da aquisição dos dados geofísicos e das leituras dos piezômetros e medidores de nível de água, foi realizada a modelagem geotécnica de fluxo interno da barragem por meio do software Slide, em seções transversais aos perfis de Ground Penetrating Radar e paralelas às instrumentações, com o objetivo de realizar comparações entre todos os dados (Figura 1).

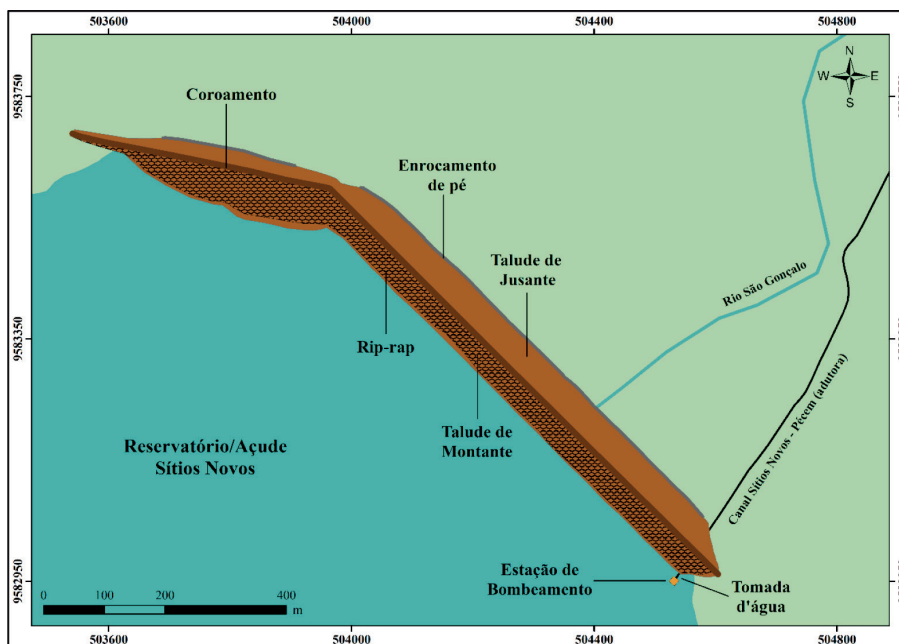


Figura 1 - Elementos da Barragem Sítios Novos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados das instrumentações são coletados pelo AGIR (Agente de Guarda e Inspeção do Reservatório). Posteriormente os dados são enviados para a Gerência Regional que insere a informação no SIGERH (Sistema Integrado de Gestão dos Recursos Hídricos). A barragem possui ao todo, 12 medidores de nível d'água e 9 piezômetros, estes

são dispostos ao longo de 3 seções instrumentadas, denominadas conforme a estaca em que estão inseridas, tem-se então da direita para esquerda (visão de montante) a Seção 55; Seção 62; e Seção 69, estas são subdivididas em 4 pontos, o primeiro localizado entre a crista e o talude montante e os demais ao longo do talude jusante (Figura 2).

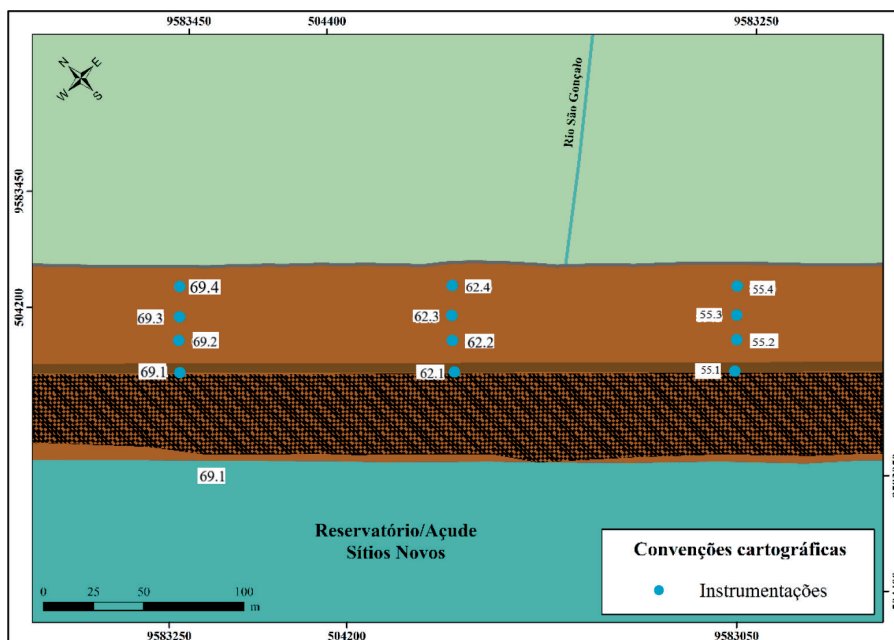


Figura 2 - Distribuição dos instrumentos ao longo das seções 55, 62 e 69.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados são registrados semanalmente, conforme seção e número da instrumentação, sendo medidos a partir do ponto superficial, utilizan-

do um sensor de nível d'água. Os dados coletados nos dias de aquisição de Ground Penetrating Radar (GPR) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Leituras das instrumentações registradas nos dias de aquisição geofísica.

Data de Aquisição	Seção Instrumentada					
	Seção 55	Leitura (m)	Seção 62	Leitura (m)	Seção 69	Leitura (m)
13 de Janeiro	NA.55.1	11,63	NA.62.1	13,44	NA.69.1	11
	NA.55.2	Seco	NA.62.2	Seco	NA.69.2	Seco
	PZ.55.2	Seco	PZ.62.2	Seco	PZ. 69.2	13,96
	NA.55.3	Seco	NA.62.3	Seco	NA. 69.3	Seco
	PZ.55.3	10,05	PZ.62.3	Seco	PZ. 69.3	8,44
	NA.55.4	Seco	NA.62.4	Seco	NA. 69.4	Seco
	PZ.55.4	5,99	PZ.62.4	6,09	PZ. 69.4	4,05
25 de Maio	NA.55.1	11,6	NA.62.1	12,3	NA. 69.1	10,05
	NA.55.2	Seco	NA.62.2	Seco	NA. 69.2	Seco
	PZ.55.2	14,03	PZ.62.2	13,81	PZ. 69.2	13,83
	NA.55.3	Seco	NA.62.3	Seco	NA. 69.3	Seco
	PZ.55.3	9,37	PZ.62.2	10,44	PZ. 69.3	8,33
	NA.55.4	1,85	NA.62.4	5,66	NA. 69.4	2,67
	PZ.55.4	4,47	PZ.62.4	8,33	PZ. 69.4	3,87

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1 Modelagem geotécnica

A modelagem geotécnica visa complementar o comparativo entre os níveis d'água inferidos pelo Ground Penetrating Radar e medidos pelas instrumentações, além disto pode-se realizar a análise da percolação da água dentro do maciço, o que auxilia na interpretação dos dados adquiridos. Para realização da modelagem foi utilizado o software de modelagem geotécnica de estabilidade de taludes e percolação denominado Slide da empresa Roscience. O Slide é um software de análise de estabilidade de taludes capaz de correlacionar a análise de estabilidade, com percolação de águas subterrâneas e infiltração. Por meio desse software, é possível avaliar e projetar a estabilidade dos taludes, fluxo, pressões e gradientes,

levando em consideração as características geotécnicas do material de fundação e corpo da estrutura, além da sua geometria. Para a elaboração da análise da barragem principal de Sítio Novos, o software foi alimentado com os dados obtidos através do 'Relatório do Projeto Executivo da Barragem de Sítios Novos' cedido pela COGERH e também disponibilizados publicamente no site da Secretária Estadual de Recursos Hídricos - SRH. Neste relatório, encontra-se diversos dados técnicos acerca do processo de construção da barragem, incluindo os desenhos estruturais de corte da barragem, o que possibilitou a construção do modelo digital da estrutura externa e interna da barragem (Figura 3). Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 2.

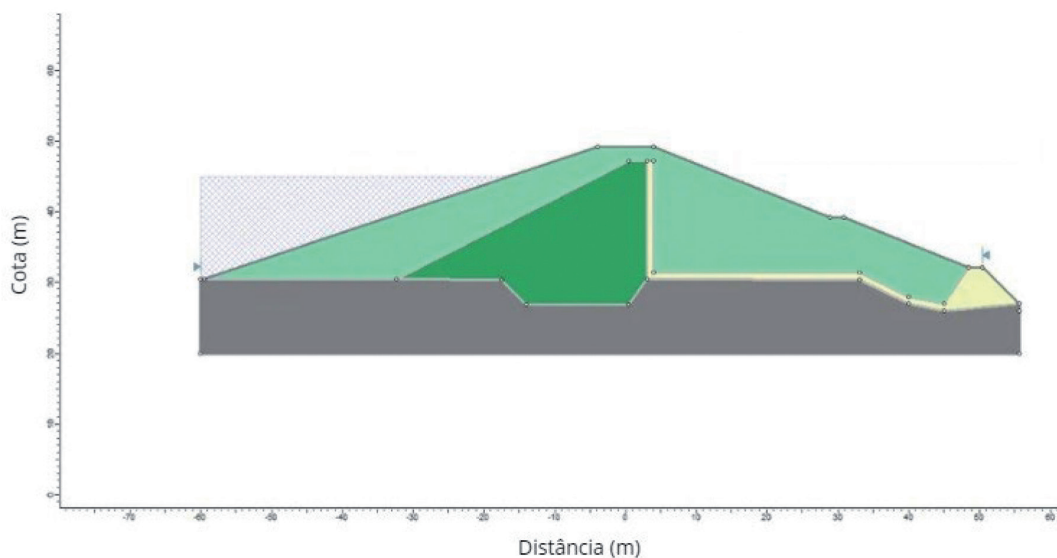


Figura 3 - Estrutura externa e interna da Barragem de Sítios Novos para a seção 60.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados.

Material	Cor	kN/m ³	Tipo de Resistência	Coesão (kPa)	Phi (*)	Phi b (*)	Pressão de entrada de ar
Jazida 1		18,6	Mohr-Coulomb	1	31,8	0	0
Jazida 2		18,8	Mohr-Coulomb	1	36,6	0	0
Areal 1		18	Mohr-Coulomb	1	34,2	0	0
Fundação		20	Mohr-Coulomb	1	35	0	0

Fonte: Elaborado pelos autores.

O modelo foi baseado na Estaca 62, a seção mais alta e com maiores gradientes hidráulicos monitorados da barragem. Usando os desenhos técnicos, foi criado o modelo externo da barragem, respeitando as medidas e a disposição interna dos materiais. Em seguida, foram adicionados os parâmetros geotécnicos, como peso específico, resistência (coesão e ângulo de atrito), e permeabilidade dos materiais. Ensaios geológicos e geotécnicos, como granulometria, limites de liquidez e plasticidade, e sondagens foram realizados para caracterizar os materiais terrosos e rochas usados na construção da barragem.

3.2 Processamento de dados

As etapas de processamento foram realizadas no software RADAN 7.0 da GSSI. No software, fo-

ram desenvolvidas duas rotinas de processamento, uma para os dados adquiridos no modo distância (perfis PL01 e PL02) e outra para os dados adquiridos no modo tempo (perfis PL03, PT01, PT02 e PT03), se distinguindo por uma etapa primária de compilação dos dados e normalização da distância, baseado nos dados topográficos adquiridos em campo.

O perfil PL03, tanto na aquisição em janeiro como na de maio, teve que ser adquirida em mais de um arquivo, devido a sua extensão e irregularidade da superfície do terreno. Iniciando o processamento, foi feito o merge dos arquivos das respectivas seções, utilizando a ferramenta *Append Files*, posteriormente foram ajustadas as escalas horizontais das seções coletadas no modo tempo, utilizando a ferramenta *Distance Normalization*. Após os ajustes, inicia-se o processamento pro-

priamente dito, que se dá pela correção do tempo zero, na qual é feito o correto posicionamento do tempo inicial do registro do perfil, retirando o retardo no sinal provocado por ondas aéreas. Em seguida é utilizado o filtro *Background Removal*, este calcula uma média das amostras (traço), este valor então é subtraído das amostras individuais. Este filtro suprime sinais consistentes e lineares, associados a ruídos de fundo ou de baixa frequência, por outro lado, realça variações horizontais. Outro filtro utilizado para melhorar os dados é o filtro FIR (*Finite Impulse Response*) essa técnica utiliza uma convolução ponderada para realçar ou atenuar componentes específicos da frequência.

Os coeficientes do filtro são convoluídos com os dados de GPR para produzir um sinal filtrado que realça reflexões de interesse e suprime componentes de fundo ou ruído. Antes do ganho, é realizado a deconvolução, que tem por objetivo atenuar reflexões múltiplas, reduzindo o efeito de espalhamento do sinal, restaurando a onda a uma forma semelhante a que tinha antes de sofrer convolução, seja pelo sistema de aquisição ou no próprio processamento. Este filtro aumenta a resolução temporal do sinal. Por fim é realizado o ganho, o filtro *Range Gain*, que modifica a ampli-

tude das reflexões, podendo ser feita a compensação da atenuação natural do sinal. Nos perfis foi utilizado o ganho do tipo linear.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Modelagem Geotécnica de Fluxo – Software Slide

Através da interpretação inicial da modelagem de fluxo interno da barragem, é possível notar que o nível de água apresenta o comportamento esperado para o seu fluxo. O nível de água no talude à montante, pré-filtro, sofre uma queda ao entrar em contato com o filtro da barragem, atingindo uma profundidade de 16 m. A partir do filtro, o nível de água vai seguindo o filtro horizontal, decaindo de forma gradual. Com a interpretação inicial, os piezômetros foram arranjados na posição e profundidade correta, para a seção 62, no modelo no Slide (Figura 4). A partir do ponto mais profundo do equipamento, foram estimados as poropressões nos mesmos locais das instrumentações de campo.

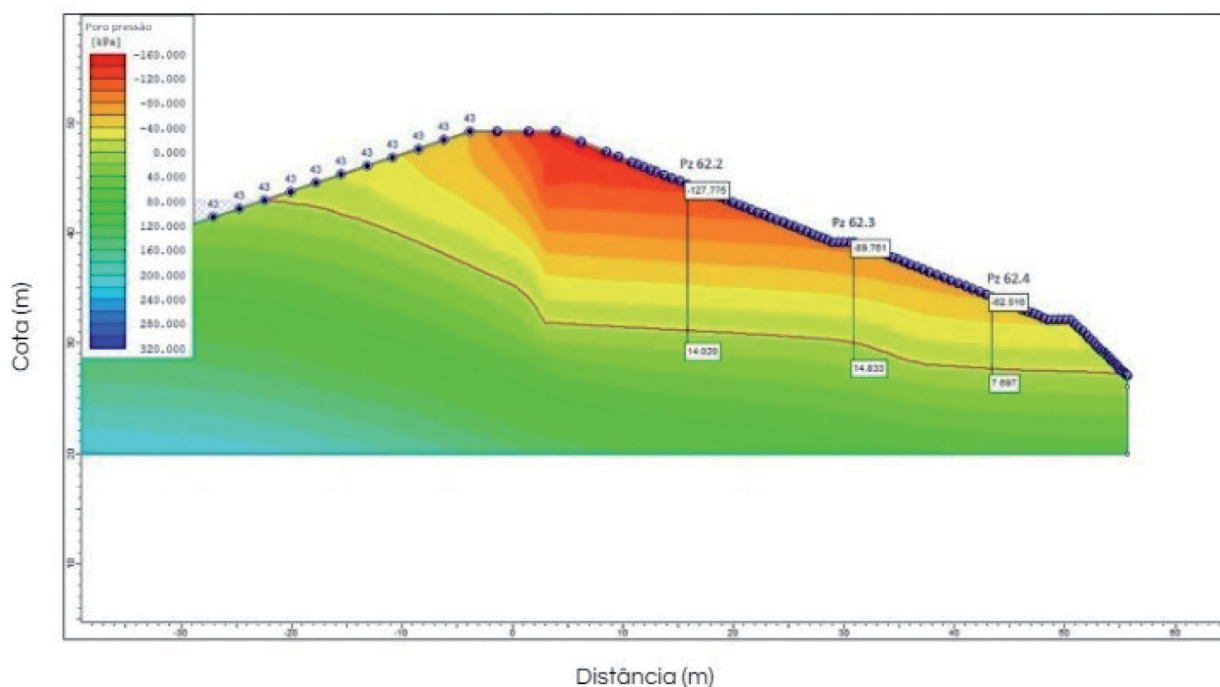


Figura 4 – Distribuição dos piezômetros na seção modelada para janeiro (cota 43).

Fonte: Elaborado pelos autores

A partir disso, foi possível realizar um comparativo dos valores das poropressões da instrumentação e da modelagem (Tabela 3), e das medidas de nível de água (que serão apresentadas com o levantamento geofísico). É possível notar variações (poropressão do piezômetro – poropressão da modelagem) que vão de 1,67 kPa a 17,72 kPa. Os piezômetros Pz 62.3 e PZ 62.4 são os que apre-

sentaram maior divergência dos dados da modelagem, que pode ser explicado pelo fato destes estarem localizados no limite da fundação ou na própria fundação do maciço, respectivamente. Sabe-se que os ensaios “in situ” para caracterizar as propriedades geotécnicas podem apresentar uma maior variabilidade por conta da própria variabilidade geológica do maciço de fundação.

Tabela 3 – Cargas piezométricas e condições de poropressão da seção 62.

Dia da Aquisição	Piezômetro	Carga Piezométrica (m)	Poropressão pela instrumentação (kPa)	Poropressão pela modelagem (kPa)	Diferença (kPa)
13 de Janeiro	PZ 62.2	0	0	14,02	-14,02
	PZ 62.3	0	0	14,83	-14,83
	PZ 62.4	2,59	25,41	7,69	17,42
25 de Maio	PZ 62.2	2,07	20,31	18,64	1,67
	PZ 62.3	0,46	4,51	16,93	-12,42
	PZ 62.4	2,86	28,06	10,91	17,15

Fonte: Elaborado pelos autores.

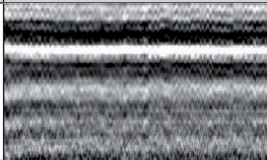
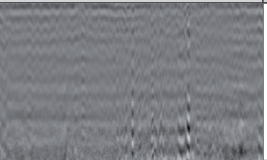
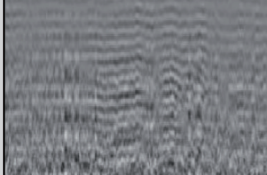

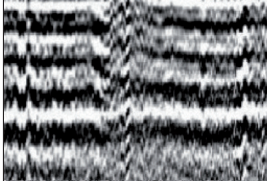
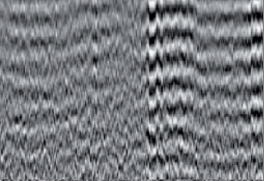
Ressalta-se ainda que, os valores de poropressão dos piezômetros acima do indicado na modelagem geotécnica, podem ser indicativos de redução nos fatores de segurança da estabilidade da barragem. Entretanto, para um melhor diagnóstico da barragem, é preciso ser realizadas retroanálises para quantificar estas reduções.

4.2 Análise dos radargramas

A análise dos perfis bidimensionais de GPR (radargramas) foi realizado de modo qualitativo, com base na diferenciação de padrões de reflexão e na identificação de refletores importantes.

O presente trabalho adotou uma metodologia interpretativa semelhante aos aplicados em estudos estratigráficos-sedimentológicos, devido ao material constituinte e ao caráter estratificado da barragem, visto que se trata de uma barragem zonada, que conta ainda com a presença de filtro e fundação de materiais distintos. A caracterização de padrões de reflexão em estudos estratigráficos-sedimentológicos, auxiliam na definição de fácies sedimentares, elementos deposicionais, e superfícies limitantes, além de eliminarem interpretações alternativas (Paula, 2019). A Figura 5 apresenta uma síntese dos padrões de reflexão interpretadas para Barragem Sítios Novos.

Figura 5 - Padrões de reflexão identificados na Barragem Sítio Novos.

Padrão de reflexão	Radargrama		Descrição	Interpretação
	40 MHz	70 MHz		
Pr1i			Refletores homogêneos, moderadamente contínuos de baixa amplitude.	Relacionado ao material areno argiloso (Jazida 1) não saturado.
Pr2i			Refletores subparalelos de baixa-média amplitude, moderadamente contínuos.	Relacionado ao material areno silto argiloso (Jazida 2) não saturado.
Prc			Refletores caóticos de média amplitude	Relacionado areno argiloso e areno silto argiloso saturado, aluvião e/ou rocha cristalina.

Fonte: Elaborado pelos autores.

As seções possuem de modo geral dois tipos de ruídos que não puderam ser totalmente eliminados na etapa de processamento, o primeiro corresponde a refletores plano-paralelos, que ocorrem na parte superior do perfil, esse ruído é comum em aquisições com antenas de baixa frequência. Já o segundo, diz respeito a ruídos verticalizados ocasionados por mudanças abruptas verticais da superfície de aquisição, este pode ser observado especialmente nos perfis adquiridos no modo tempo.

4.3 PL01 (crista)

O perfil PL-01 foi posicionado na crista da barragem, permitindo a análise das camadas superiores e da fundação (Figura 6). A caracterização dos materiais revelou a presença de uma camada superior de material areno-silto-argiloso, seguida por uma camada de material areno-argiloso, e a fundação composta por aluvião e/ou rochas metamórficas.

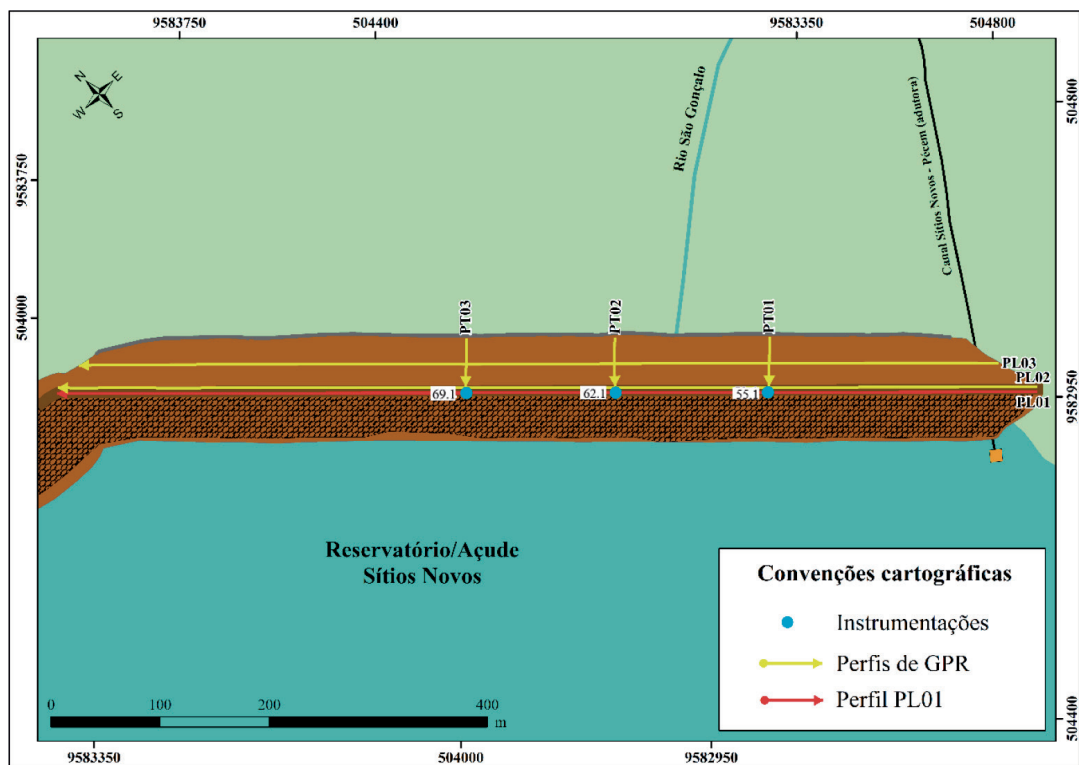


Figura 6 - Posição do perfil PL01.

Fonte: Elaborado pelos autores.

O perfil realizado com a antena de 40 MHz alcançou a profundidade de 45,5 m, enquanto o perfil adquirido com a antena de 70 MHz chegou apenas a 25 m. Analisando as constantes dielétricas, o silte apresenta valor 10, em condição de saturação com água, já a areia, sobre mesma condição, varia de 20 a 30. O valor de constante dielétrica obtido para o perfil PL01, por análise de hipérbole foi de 10. O perfil foi adquirido perpendicular às seções instrumentadas 55, 62 e 69, tendo como instrumento mais próximo o primeiro medidor de nível d'água de cada seção, estes são representados nos perfis interpretados, com suas respectivas medidas. No perfil adquirido em janeiro, foram identificados 3 padrões de reflexão (Figura 7), a primeira é o Pr1i, este compreende a parte mais superficial do perfil e tem uma profundidade variando de 2 a 2,6 m, porém alcança mais constantemente 2,2 m. Nele predomina um padrão de poucas reflexões, relativamente homogêneos e de baixa amplitude, sendo relacionado ao material areno-argiloso seco (Jazida 1).

Em seguida, é observado o padrão Pr2i, a superfície limítrofe deste com o padrão PR1i é

identificada por um refletor contínuo de média amplitude. A Pr2i é caracterizada por refletores subparalelos de média a baixa amplitude, sendo este relacionado ao material areno-silto-argiloso (Jazida 2), tendo a superfície limítrofe inferior mais variada que a PR1i, alcançando uma profundidade média aproximada de 12 m. O padrão Pr1i apresenta heterogeneidade vertical, possuindo diferenças entre a amplitude de sua parte superior e inferior, estas são limitadas por um refletor de média a alta amplitude, que assim como em estudos sedimentológicos, pode ser referente a um hiato construtivo, alterações do material, diferenças de compactação ou maior saturação. O segmento final do perfil é identificado por um padrão fortemente caótico de média amplitude, o PrC é relacionado a rocha cristalina, aluvião e especificamente nesse perfil, sua porção superior pode estar relacionada a zona de material areno-silto-argiloso saturado, não sendo possível fazer a distinção do material pelo perfil de GPR. Este padrão se estende até o final do perfil e apresenta uma espessura média aproximada de 33 m.

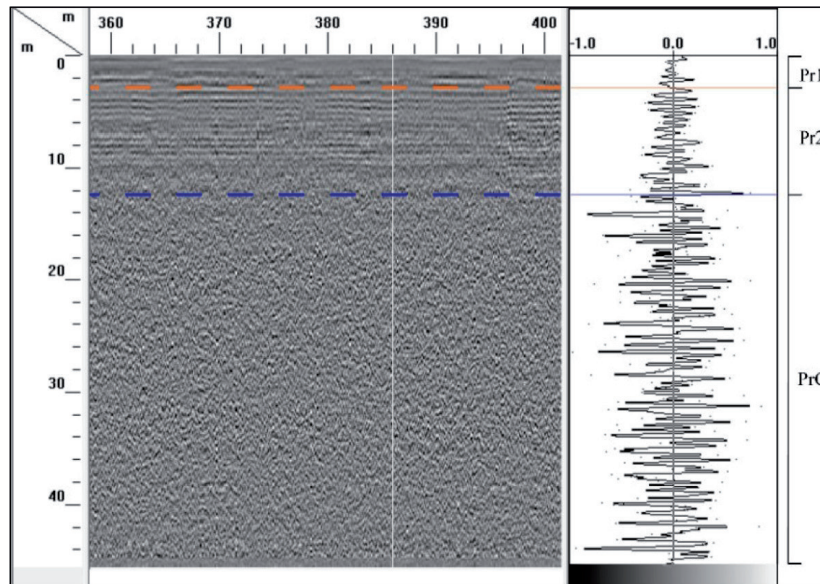


Figura 7 - Interpretação do padrão de reflexão do PL01-jan. (A) Radargrama processado; (B) Traço da posição 386 m (amplitude x tempo).

Fonte: Elaborado pelos autores.

O perfil adquirido em maio apresenta muitos ruídos plano-paralelos, dificultando sua interpretação, mas foram identificados três padrões de reflexão, conforme Figura 8. No segmento mais superficial tem-se o PR1i (profundidade média de 2 m), possui poucas reflexões e duas superfícies refletoras subparalelas de alta amplitude, provavelmente de ondas diretas, relacionado ao material areno-argiloso seco. Entre 2 e 10 m de profundidade, referente ao padrão Pr2i que apresenta

refletores de média amplitude, subparalelos e moderadamente contínuos, relacionados ao material areno-silto-argiloso. Existe uma heterogeneidade vertical, com refletores de média-baixa amplitude entre 2 e 3,3 m, e a porção inferior (até 10 m) é mais afetada por ruídos plano-paralelos. Após 10 m de profundidade, aumenta gradativamente os refletores caóticos o PrC. A porção superior ainda preserva alguns refletores subparalelos, enquanto a inferior é dominada por refletores caóticos.

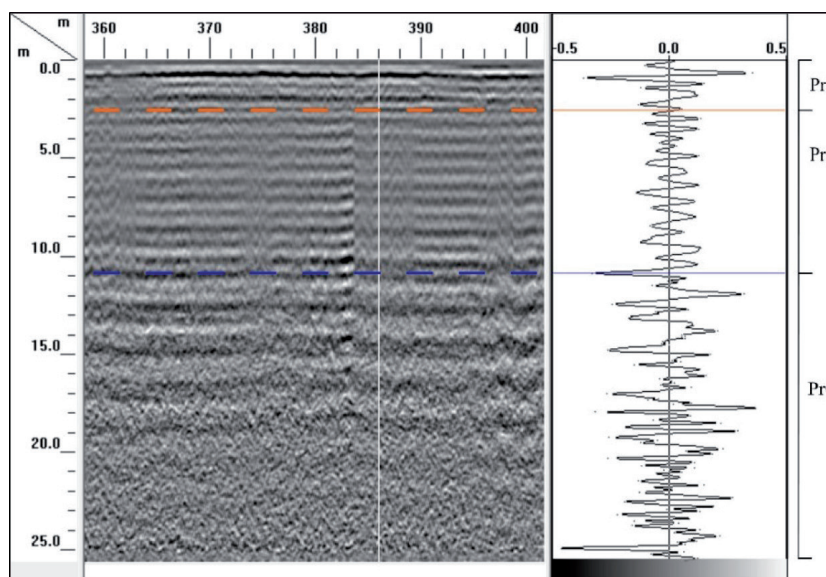


Figura 8 - Interpretação do padrão de reflexão do PL01-mai. (A) Radargrama processado; (B) Traço da posição 386 m (amplitude x tempo).

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os refletores caóticos da PrC ocorrem devido à dissipação da onda eletromagnética causada por um maior grau de saturação, que provoca atenuação na porção final. Esse padrão pode estar relacionado a rochas cristalinas ou ao enfraquecimento do sinal de GPR. A Figura 9 sintetiza o comparativo entre os valores do medidor de nível d'água (MNA), modelagem geotécnica (MG) e o GPR. Os dados adquiridos pela geofísica apresentaram-se

de modo geral, compatíveis com o esperado, tanto em comparação a medida da instrumentação e da modelagem geotécnica, bem como no comparativo temporal dos dados (janeiro e maio), onde esperava-se uma elevação do nível de água, apresentando variação entre 10,57% (NA.55.1) a 9,7% (NA.69.1) demonstrando desta forma uma boa uniformidade na evolução do nível d'água.

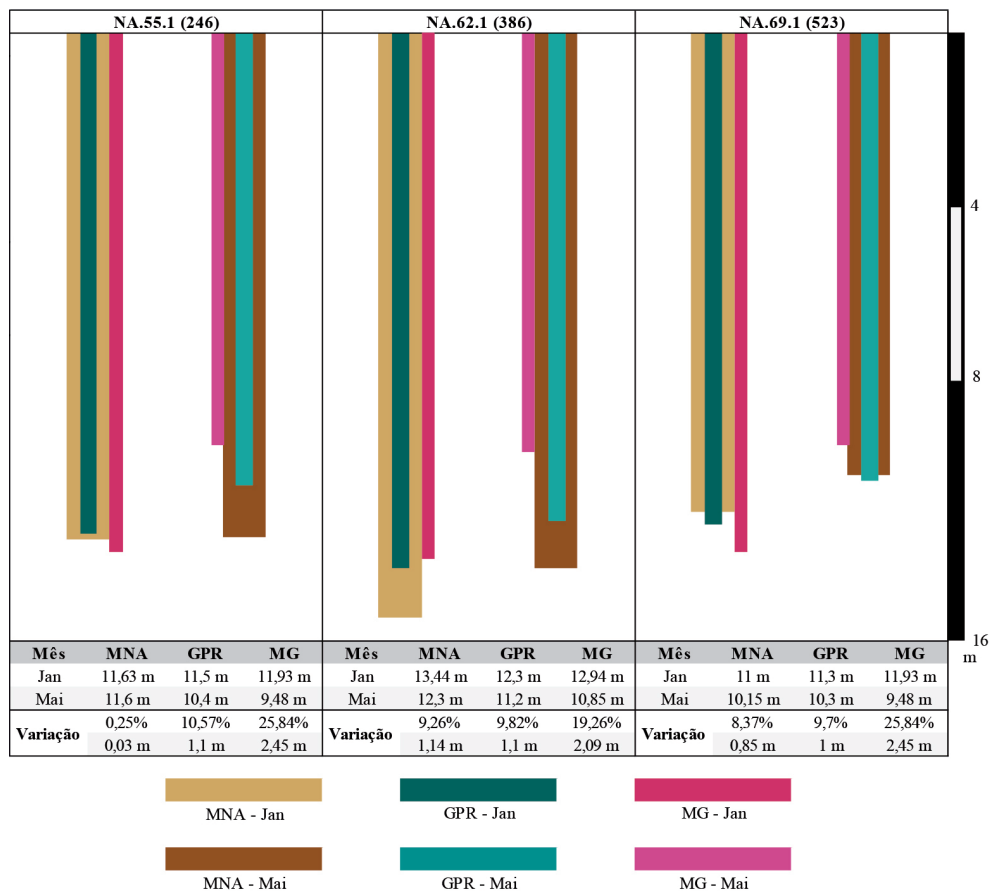


Figura 9 - Comparativo entre o nível d'água medido pela instrumentação, modelagem geotécnica e o inferido a partir do GPR, adquiridos na crista da barragem.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.4 PL02 (berma)

O perfil PL02, está posicionado acima da berma da barragem, do lado direito da canaleta de drenagem, tendo direção sudoeste para noroeste. Conforme observado na Figura 10 o perfil foi realizado sobre uma porção da barragem constituída predominantemente por material areno-argiloso (Jazida 01), tendo na porção inferior uma camada

de areia (filtro) e sotoposto a esse, a fundação formada por aluvião e/ou rochas metamórficas. O perfil realizado com a antena de 40 MHz alcançou a profundidade de 20,6 m, enquanto o perfil adquirido com a antena de 70 MHz chegou apenas a 11,7 m. Analisando as constantes dielétricas, a argila apresenta valor 40, em condição de saturação com água, já a areia, sobre mesma condição, varia de 20 a 30. O valor de constante dielétrica

obtido para o perfil PL02, por análise de hipérbole foi de 46. O perfil foi adquirido perpendicular às seções instrumentadas 55, 62 e 69, tendo como instrumento mais próximo o terceiro medidor de

nível d'água de cada seção, estes são representados nos perfis interpretados, com suas respectivas medidas.

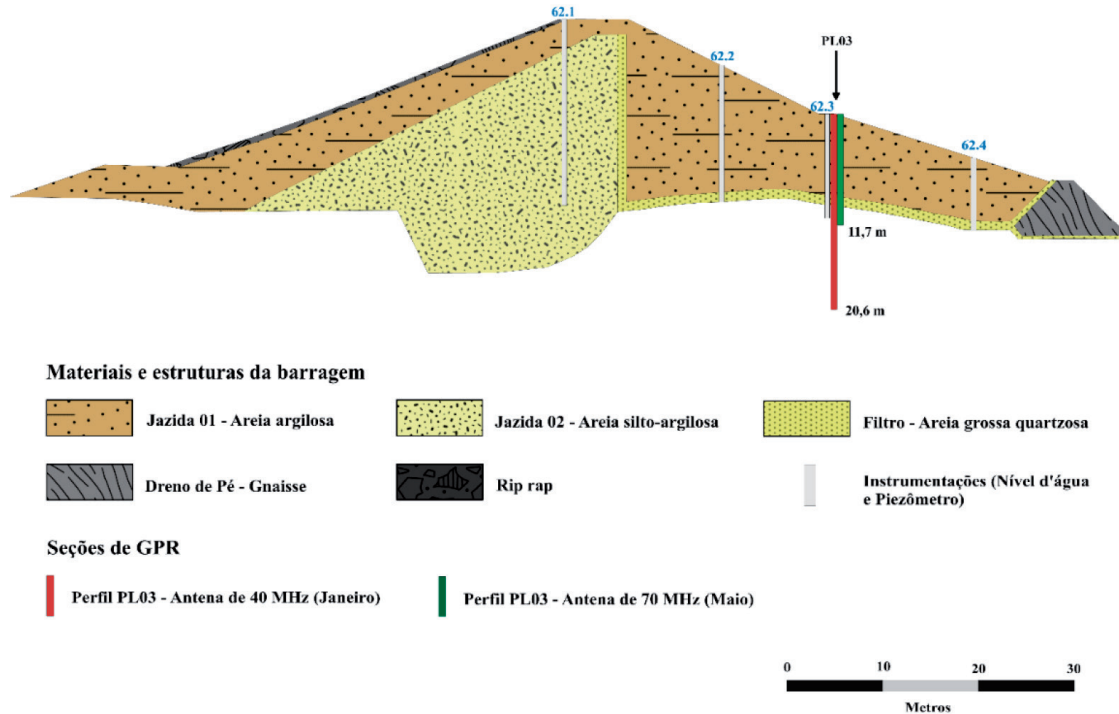


Figura 10 - Seção 62 da barragem, com a posição dos perfis PL03 e instrumentações.

Fonte: Elaborado pelos autores.

No perfil adquirido em janeiro, pode ser identificado 2 padrões de reflexão (Figura 11), o primeiro é o Pr1i, este compreende a parte mais superficial do perfil. Neste padrão, tem-se refletores relativamente homogêneos e de baixa amplitude, com predomínio de poucas reflexões, sendo bastante afetado por ruídos plano-paralelos. Este segmento pode ser relacionado ao material areno-argiloso não-saturado. O segmento inferior do Pr1i possui um aumento de refletores caóticos e

subparalelos, podendo ser relacionada a zona de transição, na qual ocorre saturação por capilaridade. O limite inferior é identificado por um refletor contínuo de alta amplitude, relacionado ao nível d'água. O restante do perfil é caracterizado com o padrão PrC, dado por refletores caóticos, este inicia-se em aproximadamente 8 m e se estende a até a profundidade máxima do perfil, o comportamento uniforme dos refletores não possibilita fazer distinção entre os materiais.

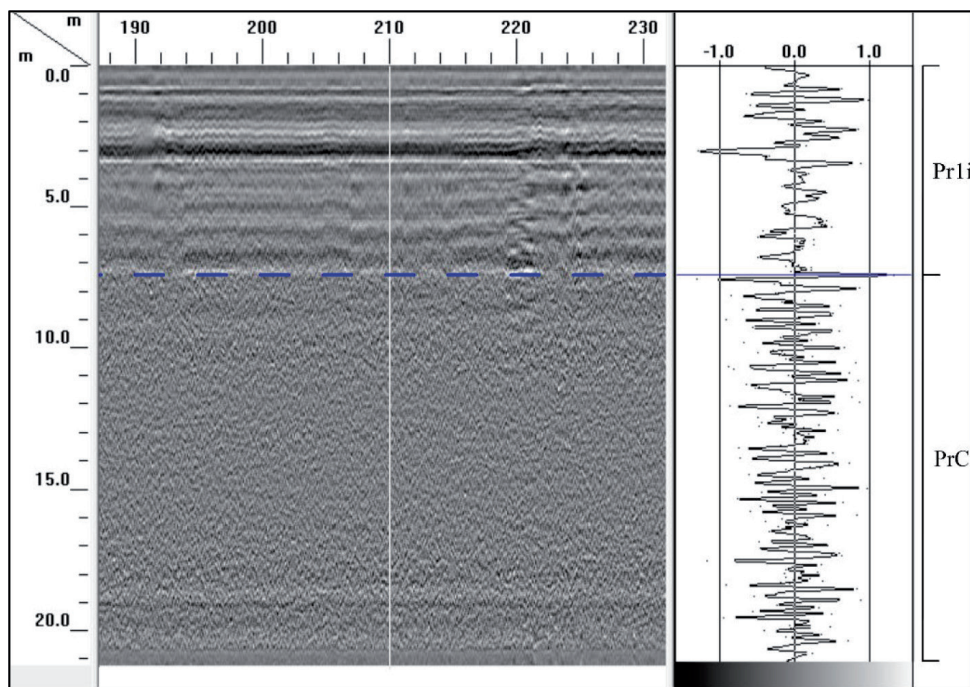


Figura 11 - Interpretação dos padrões de reflexão. (A) Radargrama processado; (B) Traço da posição 210 m (amplitude x tempo).

Fonte: Elaborado pelos autores.

No perfil adquirido em maio, também foram identificados 2 padrões de reflexão (Figura 12). Na porção mais superficial tem-se o Pr1i, caracterizado por poucas reflexões, este comportamento pode ser oriundo da atenuação do sinal dado pelo material argiloso, que possui maior condutividade e dissipa a onda eletromagnética. Assim como no perfil adquirido em janeiro, este apresenta uma zona de saturação por capilaridade, identificada pelo aumento de refletores caóticos. Neste perfil tal zona pode ser melhor delimitada do que no perfil adquirido no início do ano, isso se deve a resolução da antena utilizada (70 MHz). O segmento final do perfil predomina os refletores caóticos referentes ao padrão PrC, relacionado a uma porção do material arenoso saturado, aluvião e/ou rochas metamórficas constituintes da fundação. O contato entre os padrões Pr1i e PrC se dá por um refletor contínuo de alta amplitude, interpretado como o nível d'água. Este perfil obteve os melhores refletores relacionados ao NA, isto se deu devido ao material de maior granulometria

(areia) e ao seu nível de saturação, possivelmente alto, visto que se trata do filtro, além da melhor resolução da antena de 70 MHz, em relação a antena de 40 MHz.

Para os recortes do perfil PL02 com extensão de 100 m tendo como dispositivo central um medidor de nível d'água, as leituras dos medidores de nível da instrumentação 55,3, 62,3 e 69,3, apresentaram em janeiro, bem como em maio, valores zerados, ou seja, não foi detectado o nível d'água. Tais medidas são consideradas normais, pois segundos os projetos construtivos, a base dos medidores está localizada na fundação. A Figura 13 apresenta o recorte do perfil entre a posição 160 e 260 m, tendo na sua parte central (posição 210 m) a instrumentação 55,3, em janeiro o nível d'água inferido pelo GPR foi de 7,6 m, enquanto que o obtido em maio foi de 5,7 m. A modelagem obteve para janeiro a profundidade de 7,8 m, já para maio teve-se 7,25 m.

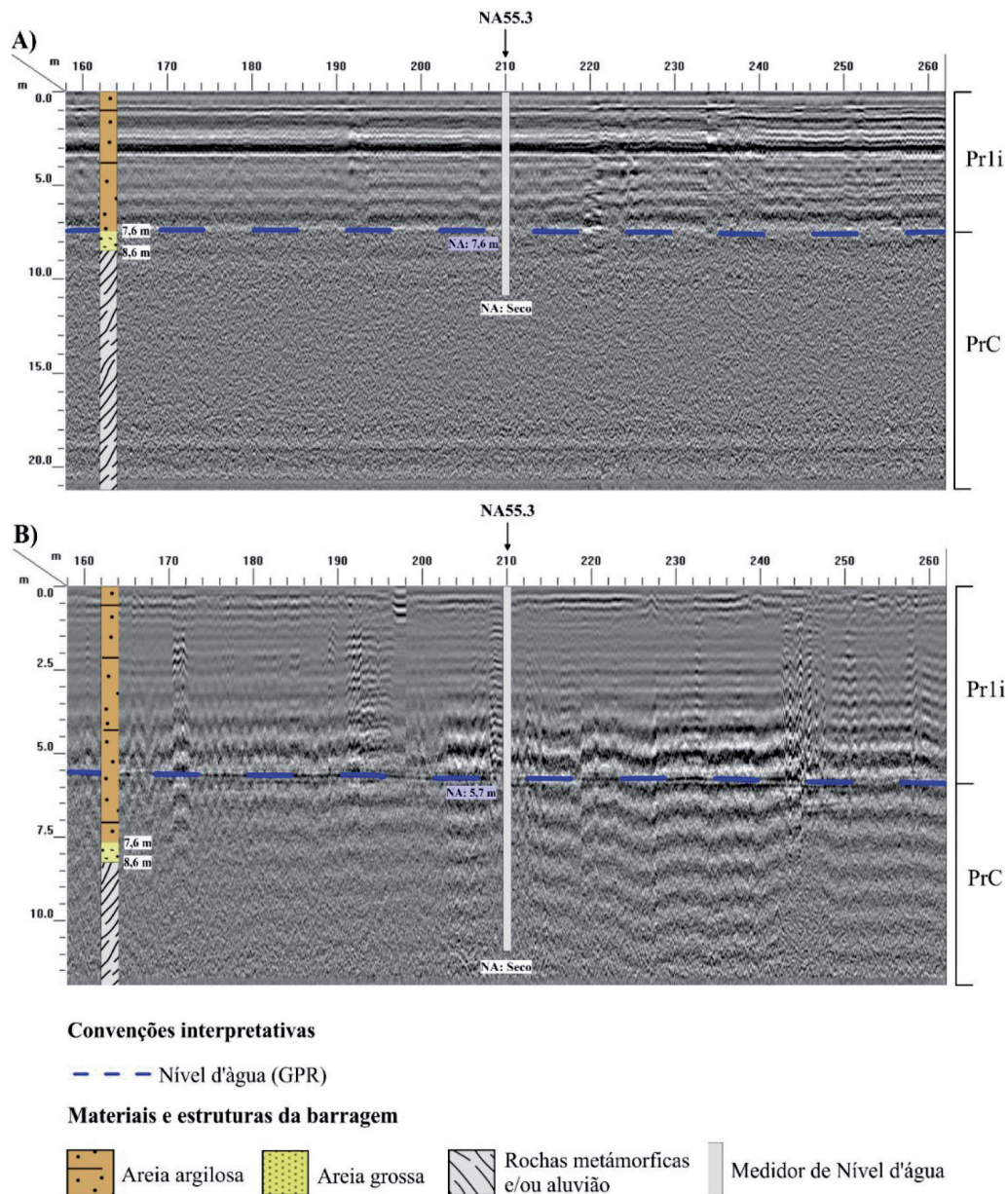


Figura 12 - Perfil PL03, entre a posição 160 e 260 m. A) Radargrama adquirido em janeiro, com a antena de 40 MHz; B) Radargrama adquirido em maio, com a antena de 70 MHz.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 13 sintetiza o comparativo entre os valores do nível d'água inferidos pelo GPR e os obtidos na modelagem geotécnica. Os dados apresentaram-se de modo geral dentro do esperado, embora não seja possível estabelecer um paralelo com as medições das instrumentações, pois apresentaram leituras zeradas (valores possíveis, visto que estão localizadas na fundação). No compara-

tivo temporal, as medições do GPR acompanharam a evolução do nível d'água, ou seja, indicam elevação da linha freática. O que se mostrou inesperado, pois o nível d'água está mensurado acima do filtro, o que indica uma possível anormalidade na percolação da água. Essa condição é corroborada pelas leituras da instrumentação 62,4, as quais também indicam o nível d'água acima do filtro.

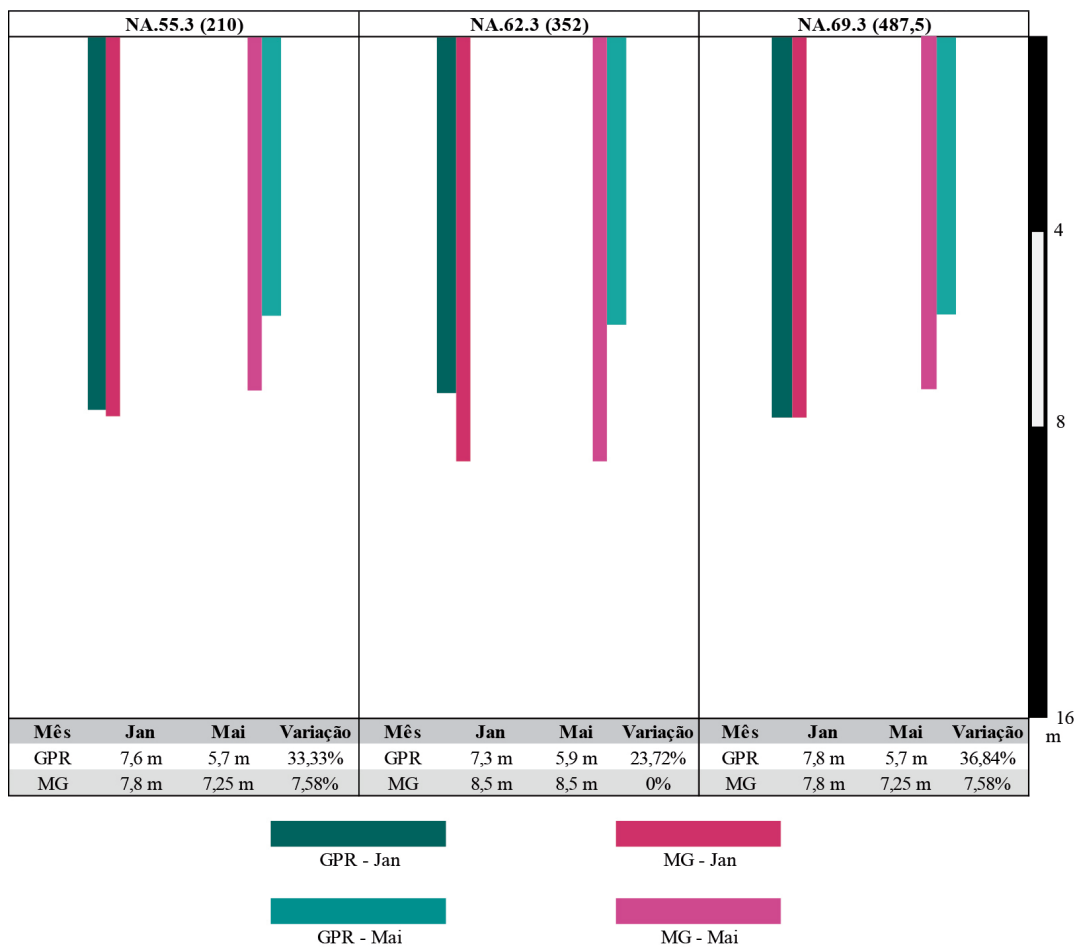


Figura 13 - Comparativo entre o nível d’água inferido pelo GPR e pela modelagem geotécnica, adquiridos na berma da barragem.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.4 Comparativo Geral dos Resultados

A análise comparativa possibilitou uma abordagem mais completa e precisa do monitoramento, podendo ser mensurado a acurácia das feições interpretadas a partir GPR, utilizando mé-

todos mais convencionais (instrumentação e modelagem). A Figura 14 apresenta uma síntese dos níveis d’água inferidos pelo GPR, e obtidos pelas instrumentações e modelagem geotécnica, podendo ser observado o contexto geral da percolação interna da água e coerência dos dados geofísicos.

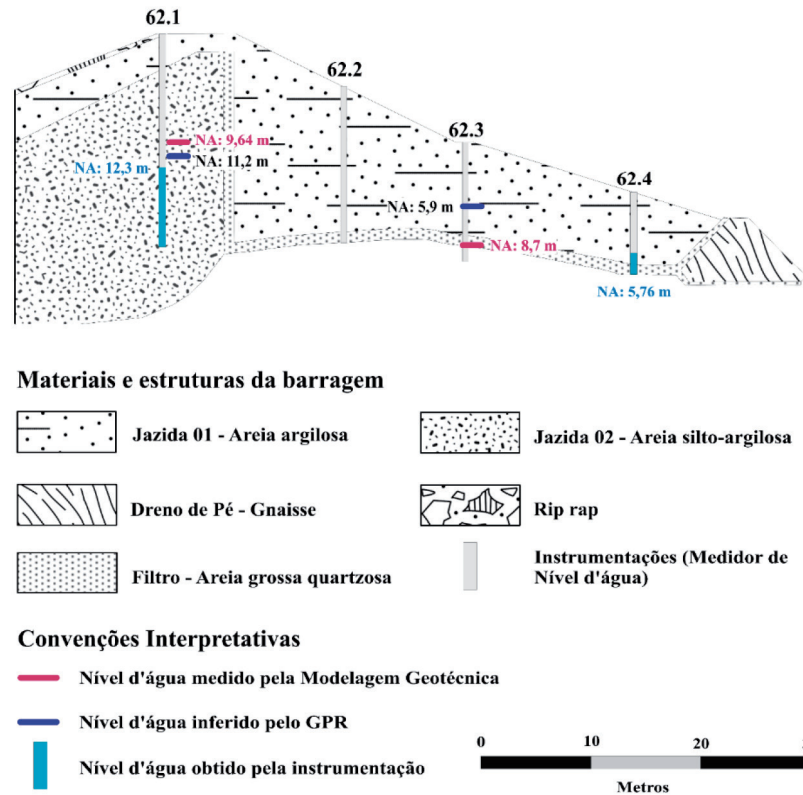


Figura 14 - Síntese dos níveis d'água obtidos e interpretados referentes a aquisição de maio, representados na seção 62.

Fonte: Elaborado pelos autores.

CONCLUSÕES

Os resultados e comparativos dos dados demonstram uma exitosa aplicabilidade do Ground Penetrating Radar, possibilitando a caracterização dos materiais e elementos das barragens, determinação do nível d'água e identificação de zona anômala. A interpretação dos levantamentos de GPR possibilitou diferenciar padrões de reflexão para cada zona da barragem. O padrão de refletores subparalelos está relacionado ao material areno-silto-argiloso, enquanto o padrão de poucas reflexões está associado ao material areno-argiloso. Esses padrões interpretados foram comparados com a geometria indicada no projeto construtivo, apresentando consonância, apesar de possíveis imprecisões topográficas e déficits no projeto. Ademais, também foi identificada a tomada d'água, representada por um grande refletor hiperbólico.

A determinação do nível d'água pelo GPR apresentou resultados coerentes com as medidas

diretas de campo, podendo ser distinguida em todos os perfis apresentados, caracterizada por refletores contínuos de alta amplitude ou zonas com domínio de refletores caóticos. Em alguns perfis, foram identificadas zonas de transição, onde a saturação ocorre por capilaridade. Foi identificada uma possível zona anômala no perfil PL03-mai, onde o nível d'água estava 2,8 m acima do medido pela modelagem geotécnica e 1,8 m do topo do filtro indicado no desenho construtivo. A zona anômala foi corroborada por medidas de instrumentação, indicando a necessidade de integrar esses dados com outros métodos, como eletrorresistividade ou medidas diretas de sondagem, para melhor determinação.

Avaliou-se também as limitações do método, como a dificuldade em superfícies irregulares ou muito inclinadas, além da atenuação do sinal em áreas saturadas e argilosas. Vale destacar também uma característica intrínseca ao método, a relação resolução e profundidade, visto que para se

chegar a maiores profundidades são utilizadas antenas de frequência menor, porém estas apresentam menor resolução vertical, o que pode ser um entrave em estudos de barragens de grande porte. O GPR possui uma promissora aplicação como método auxiliar na caracterização e inspeção de barragens, com destaque para barragens de terra de pequeno e médio porte, dado grande número de barragens deste tipo que não possuem instrumentações.

REFERÊNCIAS

- Aina A., Olurunfemi M.O., Ojo J.S. 1996. An integration of aeromagnetic and electrical resistivity methods in dam site investigation. *Geophysics* 61, 349–356.
- Batayneh A.T., Abdallah S.A.Z., Abdelruhman A.A. 2001. Geophysical investigations for the location of a proposed dam in Al Bishriyya (Al Aritayn) area, northeast Badia of Jordan. *Environmental Geology* 40, p. 918–922.
- Bedrosian P.A., Burton B.L., Powers M.H., Minsley B.J., Phillips J.D. 2012. Creek Dam, Truckee, California. *Journal of Applied Geophysics*, 77, p.7–20.
- BRASIL. Lei 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera dispositivos da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, da Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Acessado em 20 jan 2023.
- Buselli G. & Lu, K. 2001. Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods. *Journal of Applied Geophysics* 48:11–23.
- Canali G. V. 2002. Reflexões para a institucionalização de um sistema nacional de segurança de barragens. Notas trocadas com a equipe da Agência Nacional de Águas. Brasília.
- Cesário L. Barragem rompe e destrói estrada carroçável em Maranguape após fortes chuvas. O Povo. Fortaleza, 12 de abril de 2023. Disponível em: <https://www.opovo.com.br/noticias/ceara/maranguape/2023/04/12/barragem-rompe-e-destroi-estrada-carrocal-em-maranguape-apos-fortes-chuvas.html>. Acessado em 17 abr 2023.
- Cho I. K., Yeom J. Y. 2007. Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam. *Geophysics* 72, p. 31–38.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. 1997a. Projeto Executivo da Barragem Sítios Novos. Relatório Geral, Tomo I – Descrição Geral do Projeto. Fortaleza, Ceará: Secretaria dos Recursos Hídricos – SRH, 29 p.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. 1997b. Projeto Executivo da Barragem Sítios Novos. Relatório Geral, Tomo IV-1 – Desenhos. Fortaleza, Ceará: Secretaria dos Recursos Hídricos – SRH, 24 p.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. 1997c. Projeto Executivo da Barragem Sítios Novos. Relatório dos Estudos Básicos, Tomo II – Estudos Geológicos e Geotécnicos. Fortaleza, Ceará: Secretaria dos Recursos Hídricos – SRH, 45 p.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. 1999. As Built – Barragem Sítios Novos. Vol. I - Relatório de Execução. Fortaleza, Ceará: Secretaria dos Recursos Hídricos – SRH, 90 p.
- Cruz P.T. 2014. 100 Barragens Brasileiras. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 647 p.
- Demes F.O.C. 2013. Acompanhamento da implantação das medidas mitigadoras propostas para a recuperação das áreas degradadas na execução dos açudes públicos Aracoiaba e Sítios Novos, no Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 93 p.
- Freitas C. Barragens que romperam em Várzea Alegre e Cedro, no Ceará, não estavam cadas-

- tradas em sistema do governo. G1 CE. Fortaleza, 17 de março de 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2022/03/17/barragens-que-romperam-em-varzea-alegre-e-cedro-no-ceara-nao-estavam-cadastradas-em-sistema-do-governo.ghtml>>. Acessado em 19 mar 2023.
- Kim J., Yi M., Song Y., Seol S. J., Kim K. 2007. Application of geophysical methods to the safety analysis of an earth dam. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics - JEEG*, vol 12, n° 2, p. 221-235.
- Machado W. G. F. 2007. Monitoramento de barragens de contenção de rejeito da mineração. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo, 134 p.
- Mailani G. 2006. Monitoring of Tailing Dams with Geophysical Methods. Tese de Licenciatura, Department of Chemical Engineering and Geosciences, Luleå University of Technology, 84 p.
- Menescal R. A. A. 2009. Gestão da segurança de barragens no Brasil - proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, 221 p.
- Panthulu T.V., Krishnaiah, C., Shirke, J.M., 2001. Detection of seepage paths in earthdams using self-potential and electrical resistivity methods. *Engineering Geology*. 59, p. 281-295.
- Paula M. C. L. 2019. Estudo de radarfácies em plácemes auríferos na Baixada Cuiabana. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 82 p.
- Sampaio I., Freitas E. Barragem de açude rompe e água invade casas e comércios em Farias Brito, no interior do Ceará. G1 CE. Fortaleza, 09 de abril de 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/ce/ceara/cariri/noticia/2023/04/09/barragem-de-acude-rompe-e-agua-invade-casas-e-comercios-em-farias-brito-no-interior-do-ceara.ghtml>. Acessado em 17 abr 2023.
- Silveira J. F. A. 2016. Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 416p.
- Sjödahl P., Dahlin, T., Johansson, S., & Loke, M. H. 2008. Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. *Journal of Applied Geophysics*, 65(3-4), p. 155-164.
- Teixeira W. L. 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, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 159 p.
- VanTuyenD., Canh T., Weller A. 2000. Geophysical investigations of river dikes in Vietnam. *Eur. J. Environ. Eng. Geophys.* 4. p.195-206.
- Voronkov O.K., Kagan, A.A., Krivonogova N. F., Glagovsky V. B., Prokopovich V. S. 2004. Geophysical methods and identification of embankment dam parameters. *Procs.2nd International Conference on Site Characterization (ISC)*, Porto-Portugal p. 593-599.