

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente

**ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE PERCOLAÇÃO EM BARRAGEM DE TERRA A
PARTIR DO MÉTODO GEOFÍSICO DA ELETORRESISTIVIDADE**

Fernanda Barbosa Bertuluci

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro (SP)

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

FERNANDA BARBOSA BERTULUCI

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE PERCOLAÇÃO EM BARRAGEM DE TERRA A
PARTIR DO MÉTODO GEOFÍSICO DA ELETRORRESISTIVIDADE

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas do
Campus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro – SP
2020

B552a Bertuluci, Fernanda Barbosa
Análise das condições de percolação em barragem de terra a partir
do método geofísico da eletrorresistividade / Fernanda Barbosa
Bertuluci. -- Rio Claro, 2020
70 p. : il., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: César Augusto Moreira

1. Geofísica. 2. Barragem. 3. Eletrorresistividade. 4. Infiltração. 5.
Monitoramento. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE PERCOLAÇÃO EM BARRAGEM DE TERRA A
PARTIR DO MÉTODO GEOFÍSICO DA ELETORRESISTIVIDADE

FERNANDA BARBOSA BERTULUCI

Comissão Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira - Orientador
Departamento de Geologia Aplicada / Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP,
Campus de Rio Claro

Profa. Dra Anna Silvia Palcheco Peixoto
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia – UNESP,
Campus de Bauru

Profa. Dra. Livia Portes Innocente Helene
Departamento de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Fatec/Jahu, São Paulo

Conceito: Aprovada

Rio Claro/SP, 19 de junho de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades, experiências e aprendizados. Aos meus familiares e amigos pelo apoio e incentivo durante a minha jornada acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. César Augusto Moreira, pelos ensinamentos, paciência, acolhimento e dedicação.

Aos demais professores e funcionários da Universidade Estadual Paulista (UNESP) que contribuíram para o meu aprendizado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente por todo apoio e estrutura fornecida.

Agradeço às Indústrias Nucleares do Brasil - INB pelo acesso a área de estudo e auxílio de seus funcionários durante os trabalhos de campo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RESUMO

Barragens são construídas para contenção de água ou rejeitos e apresentam diversos benefícios para a sociedade. A constante manutenção dessas estruturas é imprescindível, uma vez que eventuais acidentes podem gerar danos catastróficos. Uma grande parte dos rompimentos são associados a uma percolação irregular de água pela barragem, que podem evoluir para processos de erosão interna. Para avaliar a estabilidade e a segurança de barragens, são realizadas vistorias periódicas, que incluem, tradicionalmente, inspeções visuais e instrumentações. Alguns métodos geofísicos apresentam potencial para auxiliar a instrumentação convencional a partir de investigações não destrutivas e de simples e rápida aquisição. Esse estudo aplica o método da eletrorresistividade como ferramenta indireta para verificar as condições de percolação de água e estabilidade em uma barragem de terra numa mina de urânio desativada, em Poços de Caldas – MG. A barragem consiste na última de uma série de barramentos resultantes do tratamento de água provenientes da mina. Para a aquisição de dados foi utilizada a técnica da tomografia elétrica e o arranjo Schlumberger, com espaçamento entre eletrodos de 2,5m. Os resultados são apresentados na forma de modelos de inversão 2D e interpolação 3D. Zonas de baixa resistividade foram reconhecidas e interpretadas como prováveis infiltrações na barragem. Os modelos sugerem que a percolação é eficientemente drenada pelo sistema de filtros e que não há evidência de processos que colocam a estabilidade da barragem em risco. Os resultados do estudo foram satisfatórios para os fins desejados e demonstram que métodos geofísicos constituem uma importante ferramenta complementar para o monitoramento de barragens.

Palavras-chave: barragem, monitoramento, infiltração, geofísica, eletrorresistividade

ABSTRACT

Dams are built to contain water or tailings and provide several benefits to society. The constant maintenance of these structures is essential, since eventual accidents can generate catastrophic damages. The main cause of ruptures are associated with abnormal seepage, which can evolve into internal erosion process. In order to evaluate the stability and safety of dams, periodic inspections are carried out, which typically includes visual inspections and instrumentation. Some geophysical methods have the potential to assist conventional instrumentation using non-destructive, simple and rapid acquisition investigations. This study applies the method of electric resistivity as an indirect tool to assess the conditions of water percolation and stability in an earth dam, localized in a deactivated uranium mine, in Poços de Caldas - MG. The dam is the final structure of the contention system of mine water treatment. The data were acquired using the technique of Electrical Resistivity Tomography and the Schlumberger array, with spacing between electrodes of 2.5m. The results are presented by 2D inversion models and 3D interpolation models. Low resistivity zones were recognized and interpreted as probable infiltrations through the dam. The models suggest that the seepage is efficiently drained by the designed zoned filters and there is no evidence of processes that threaten the stability of the dam. The results of the study were satisfactory for the desired purposes and demonstrate that geophysical methods constitute an important complementary tool for monitoring dams.

Keywords: dams, monitoring, seepage, geophysics, electric resistivity,

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da barragem Águas Claras.....	14
Figura 2 - Barragem Águas Claras em detalhe: A – Visão panorâmica pela crista da barragem. À direita, talude montante, com enrocamento (<i>rip-rap</i>), lago do reservatório e vertedouro em evidência. À esquerda, talude de jusante, com proteção vegetal, bacia de dissipação e área alagada; B – Vertedouro em arco de simples curvatura; D - Canal de restituição do sistema extravasor.....	16
Figura 3 - Arranjo geral em planta e seção transversal da barragem de captação Águas Claras, com evidência para os principais elementos da estrutura e curso hídrico original que foi desviado para a construção do maciço.	17
Figura 4 - Perfil construtivo da barragem Águas Claras com ilustração dos principais elementos.....	18
Figura 5 – Fotografias de detalhe da área alagada em porções da base do talude de jusante.....	19
Figura 6 - Mapa geológico e contexto hidrográfico do Planalto de Poços de Caldas, com localização da INB.	20
Figura 7 - Ilustrações do perfil construtivo de barragem de terra homogênea (a) e zonada (b).	21
Figura 8 - Ilustrações do perfil construtivo de barragens de enrocamento com núcleo central (a) e com núcleo inclinado (b).	22
Figura 9 - Ilustrações do perfil construtivo de barragens de concreto gravidade (a) e de concreto aliviada (b).	22
Figura 10 - Principais elementos construtivos de uma barragem de terra homogênea.	24
Figura 11 - Formação de piping por erosão regressiva.	26
Figura 12 - Erosão interna a partir do carreamento de finos.	26
Figura 13 - Processo de erosão interna por meio do alargamento das paredes das trincas e contatos.	27
Figura 14 - Exemplos de acidentes com rompimento de barragens: A - Rompimento de parte da estrutura da barragem Hills Dam (EUA, 1963), após infiltração irregular	

pela camada impermeabilizante de asfalto do talude montante; B – Ruptura a partir de processo de <i>piping</i> na barragem Fontenelle (EUA, 1965); C – Rompimento da barragem Teton Dam (EUA, 1976) em função de processo de <i>piping</i> no corpo da estrutura; D – Colapso da barragem Taum Sauk (EUA, 2005) a partir do processo de erosão interna.	27
Figura 15 - Anomalias verificadas em barragens de terra	30
Figura 16 - Condução de eletricidade em rochas e metais	33
Figura 17 - Fluxo de corrente num corpo cilíndrico.	34
Figura 18 - Fluxo de corrente elétrica na terra para um eletrodo isolado, com vista em perfil e em planta.	35
Figura 19 – Esquema de aquisição da resistividade por meio de um arranjo linear de quatro eletrodos, com os eletrodos de potencial M e N posicionados entre os eletrodos de corrente A e B.	36
Figura 20 – Sequência de aquisição para construir uma pseudoseção a partir da técnica da tomografia elétrica e Arranjo de eletrodos Schlumberger.	38
Figura 21 - Imagem de satélite com localização das linhas de aquisição de eletrorresistividade, área alagada no pé do talude de jusante e o curso fluvial que foi desviado para construção da barragem. As setas das linhas indicam o sentido do levantamento.....	42
Figura 22 - Detalhe da aquisição geofísica e equipamentos utilizados em campo, dentre eles o resistímetro, eletrodos, cabos e trenas.	43
Figura 23 - Esquema das linhas geofísicas 1 a 5, na porção NNE da barragem Águas Claras, com fotografias de referência. As setas indicam o sentido do levantamento.	47
Figura 24 - Modelos de inversão de resistividade das linhas 1,2, 3, 4 e 5. As áreas tracejadas nas seções indicam zonas de baixa resistividade.	48
Figura 25 - Esquema das linhas geofísicas 6 a 10, na porção central da barragem Águas Claras, com fotografia de referência. As setas indicam o sentido do levantamento.....	50

Figura 26 - Modelos de inversão de resistividade das linhas 6, 7, 8, 9 e 10. As áreas tracejadas nas seções indicam zonas de baixa resistividade.	51
Figura 27 - Esquema das linhas geofísicas 11 a 14, na porção SW da barragem Águas Claras, com fotografias de referência. As setas indicam o sentido do levantamento.	52
Figura 28 - Modelos de inversão de resistividade das linhas 11,12, 13 e 14. As áreas tracejadas nas seções indicam zonas de baixa resistividade.	53
Figura 29 – Modelos de visualização tridimensionais de resistividade	55
Figura 30 - Mapas de níveis com cortes em oito profundidades diferentes gerados a partir do modelo tridimensional e imagem de satélite com posições das linhas de referência.	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS.....	13
3. ÁREA DE ESTUDO	14
3.1 Localização e histórico da mina	14
3.2 Barragem Águas Claras.....	15
3.3 Aspectos fisiográficos e contexto geológico	19
4. REVISÃO DE BARRAGENS	21
4.1 Classificação de barragens	21
4.2 Elementos construtivos de barragens de terra	23
4.3 Problemas associados a barragens de terra	25
4.4 Segurança de barragens.....	28
5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA ELETORRESISTIVIDADE	32
5.1 Corrente elétrica e seu fluxo nos materiais	32
5.2 Resistência e resistividade elétricas	33
5.3 Fluxo de corrente na Terra	34
6. MÉTODO DE PESQUISA	36
6.1 Método da eletorresistividade	36
6.2 Técnica da tomografia elétrica e arranjo Schlumberger	38
7. GEOFÍSICA APLICADA A BARRAGENS.....	40
8. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	42
8.1 Aquisição	42
8.2 Processamento de Dados.....	43
9. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
9.1 Seções de resistividade.....	46
9.1.1 Seções de resistividade 1 a 5.....	46
9.1.2 Seções de resistividade 6 a 10.....	49

9.1.3 Seções de resistividade 11 a 14.....	52
9.2 Modelos de visualização 3D e mapas de níveis	54
10. CONCLUSÕES	60
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas situadas em um curso d' água para fins de contenção de líquidos ou de misturas de líquidos e sólidos, e compreendem o barramento e suas estruturas associadas (BRASIL, 2010).

As barragens são construídas há, pelo menos, 5.000 anos para atender as necessidades das civilizações (JANSEN, 1980) e são aplicadas nas mais diversas finalidades: armazenamento de água para abastecimento e irrigação, regularização de vazão, geração de energia, retenção de resíduos minerais ou industriais, navegação, recreação e turismo.

Apesar dos inúmeros benefícios, a construção dessas estruturas desencadeiam impactos negativos diretos e indiretos em níveis sociais e ambientais, incluindo o deslocamento de comunidades, a modificação da paisagem, destruição de ecossistemas, dentre outros especificados por Costa (2012). Além disso, as barragens podem apresentar expressivo poder de destruição em casos de falhas e rupturas dos maciços.

Os rompimentos de barragens podem ocorrer em função de diferentes mecanismos. Uma grande parte dos acidentes são associados a uma percolação irregular de água pelo maciço e/ou por sua fundação, que pode contribuir para a instabilidade e deslizamento do talude, ou levar ao rompimento gradual do barramento a partir de alteração, lixiviação e erosão no interior da estrutura (JOHNSON & ILLES, 1976).

No Brasil, desde 2011, são registrados cerca de três acidentes por ano, segundo último relatório publicado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2019). Destes acidentes, dois ganharam grande repercussão em razão da enorme dimensão dos impactos socioeconômicos e ambientais: em 2015, rompimento da Barragem do Fundão da Samarco Mineração S.A, em Mariana-MG e em 2019, o rompimento da barragem da mina do Córrego do Feijão da mineradora Vale, em Brumadinho-MG (IBAMA, 2016, 2019).

Esse histórico reforça a necessidade de avanço na gestão de risco e na adoção de medidas de prevenção e controle dessas estruturas. Estas ações, se devidamente implementadas, asseguram uma probabilidade de ocorrência de acidente reduzida ou praticamente nula, mas devem ser complementadas com medidas de defesa civil para

minorar as consequências de um possível rompimento, especialmente em casos associados a danos potenciais mais altos (ANA, 2016).

No cenário brasileiro, a Política Nacional de Segurança de Barragens, implantada em 2010 pela Lei nº 12.334, prevê como uma de suas exigências a realização de inspeções técnicas de segurança, de responsabilidade dos empreendedores, e com periodicidade estabelecida de acordo com a classificação de risco e dano potencial da barragem (ANA, 2016). Tais atividades de monitoramento incluem, tradicionalmente, a inspeção visual, que procura detectar anomalias como trincas, abatimentos localizados e surgências d'água, e a utilização de instrumentação, como medidores de nível, piezômetros, tubos telescópicos, inclinômetros, dentre outros (COSTA, 2012).

O monitoramento com uso de instrumentação e inspeção visual mostra resultados satisfatórios, mas pode apresentar restrições por questões técnicas ou operacionais, como leituras errôneas, instalações incorretas de equipamentos, dados pontuais e muito espaçados, e diagnósticos tardios (TEIXEIRA, 2013). Mesmo em estágios avançados, em que a percolação de água é denunciada por surgências à jusante, o caminho preferencial do fluxo não é bem detectado pelos métodos convencionais de investigação. Além disso, um grande número de barragens, em especial as de pequeno porte, não dispõem de instrumentação instalada (NRC, 1983).

Nesse cenário, alguns métodos geofísicos apresentam potencial de complementar o diagnóstico convencional da integridade física de barragens, com a vantagem de atuar como ferramenta de investigação não-destrutiva, de baixo custo, de rápida aquisição, móvel e de ampla amostragem espacial em profundidade.

Diversos estudos têm mostrado eficácia na utilização de investigações geofísicas em barragens, especialmente para identificar zonas de infiltração, localizar caminhos preferenciais de fluxo e obter informações sobre a estrutura subsuperficial do maciço. Para essas finalidades, se destacam os métodos da eletrorresistividade, potencial espontâneo e georradar (ABUZEID, 1994; ANI; AREWA, 2013; ALSAIGH *et al.*, 1994; AL-FARES, 2014; CHO; YOEM, 2007; BOLÈVE *et al.*, 2009; HUI; HAITAO, 2011; LIN *et al.*, 2013; ROZYCKI *et al.*, 2006; SJÖDAHL *et al.*, 2010).

O método da Eletrorresistividade visa a determinação da distribuição da resistividade elétrica em subsuperfície, a partir de uma fonte artificial de corrente elétrica (KEAREY *et al.*, 2002). A identificação de anomalias de baixa resistividade no contexto do maciço de barragens pode sugerir a presença de zonas de percolação e

auxiliar no diagnóstico de processos que desestabilizam a estrutura. Essa aplicação evidencia o potencial da atuação técnica dos ensaios em caráter de prevenção e monitoramento nas barragens, e de oferecer suporte à tomada de decisão quanto à execução de obras complementares.

Esse estudo busca a utilização do método da eletrorresistividade como ferramenta de análise das condições de percolação e estabilidade da barragem de terra Águas Claras, da mina de urânio Osamu Utsumi, situada no município de Caldas –MG. A estrutura é constituída de um maciço argiloso compactado e foi construída para regularização de vazão, com desvio e barramento do Ribeirão das Antas. A barragem possui um volume armazenado de 3,9 milhões de m³ e é classificada, segundo critérios da ANA, como de médio risco e alto dano potencial associado às proximidades, que inclui a cidade de Poços de Caldas – MG.

Um fator de relevância do estudo é a existência de uma área alagada em parte da posição frontal da barragem, que ocasiona o afogamento ou cobertura da área de escape do dreno interno da barragem. Embora evidências de instabilidade na estrutura não tenham sido detectadas por métodos convencionais, a demanda por níveis mais elevados de segurança exige um conjunto de ferramentas e procedimentos que possam complementar o diagnóstico. A barragem conta com um plano de monitoramento por piezômetros, mas seus dados não foram disponibilizados para compor essa análise. Por fim, resultados satisfatórios podem estimular a utilização de métodos geofísicos de forma continuada, em caráter de monitoramento na barragem.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é o reconhecimento das condições de percolação de água no interior de uma barragem de terra que represa água tratada proveniente de uma mina desativada, por meio do método geofísico da Eletorresistividade. O estudo busca também compreender a dinâmica de percolação no contato entre barragem e maciço rochoso sotoposto, nível em que ocorre a formação de lagoa frontal na barragem e que provoca o afogamento da saída do tapete drenante da barragem.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização e histórico da mina

A barragem em estudo pertence à Mina Osamu Utsumi (MOU), do Complexo Minerio-Industrial de Poços de Caldas (CIPC), sob encargo das Indústrias Nucleares do Brasil – INB. O complexo está localizado no Planalto de Poços de Caldas, mais especificamente no município de Caldas, porção sudoeste do estado de Minas Gerais (Figura 1). O planalto abrange ainda os municípios de Poços de Caldas, Andradas e Águas da Prata. A região é acessada por meio das rodovias federais BR-146, BR-267 e BR-459 e o principal acesso à unidade do CIPC é realizado a partir do km 20,5 da rodovia asfaltada que liga Poços de Caldas a Andradas.

Figura 1 – Localização da barragem Águas Claras.



Fonte: Google Earth.

O ciclo produtivo do CIPC iniciou em 1981, com a operação de lavra a céu aberto na mina Osamu Utsumi e o processamento físico e químico do urânio, que tinha como produto o diuranato de amônio (DUA), conhecido como *yellow cake*. Durante treze anos de operação não contínua, o CIPC produziu 1.242 toneladas de diuranato de amônio, gerou $44,8 \times 10^6$ m³ de estéreis rochosos e cerca de $2,39 \times 10^6$ m³ de rejeitos do beneficiamento químico, conhecidos como *tailings* (URÂNIO DO BRASIL, 1988).

Todo o CIPC/INB ocupa uma área de aproximadamente 15 km² onde estão situadas a Cava da MOU, diversas pilhas de estéril denominadas Bota Fora - BF, uma planta industrial de beneficiamento desativada, uma barragem de rejeitos, as bacias de contenção de águas ácidas utilizadas para barramento e bombeamento para a estação de tratamento, além de um reservatório de águas (ETA), denominado Águas Claras, que recebe os efluentes tratados na ETA (ALBERTI, 2017).

Em 1995, as atividades do CIPC foram encerradas em função do esgotamento da jazida e desde então a área está em processo de recuperação dentro de um plano de fechamento da instalação. O grande problema ambiental associado ao CIPC é a drenagem ácida da mina (DAM), causada pela oxidação natural dos sulfetos metálicos expostos na cava, pilha de estéreis e barragem de rejeitos em presença de água e oxigênio. Como resultado da DAM, há formação de ácido sulfúrico, redução do pH e dissolução de metais pesados (NASCIMENTO, 1998).

O tempo de duração da drenagem ácida a partir da pilha de estéril e da bacia de rejeitos da mina foi estimado em, no mínimo, 600 e 200 anos, respectivamente, o que implica na adoção de medidas permanentes de remediação (FERNANDES; FRANKLIN, 2001).

3.2 Barragem Águas Claras

A barragem Águas Claras está localizada na entrada principal da unidade, e consiste na última de uma série de barramentos resultantes do tratamento de águas provenientes da cava da mina desativada (Figuras 1 e 2).

Construída em 1979, a barragem tem como função a retenção de água e sua liberação de forma controlada para a Bacia do Rio das Antas. Apresenta um volume armazenado de 3,9 milhões de m³, uma área de drenagem de 51 km² e uma vazão máxima afluente de 490 m³/s.

Figura 2 - Barragem Águas Claras em detalhe: A – Visão panorâmica pela crista da barragem. À direita, talude montante, com enrocamento (*rip-rap*), lago do reservatório e vertedouro em evidência. À esquerda, talude de jusante, com proteção vegetal, bacia de dissipação e área alagada; B – Vertedouro em arco de simples curvatura; D - Canal de restituição do sistema extravasor.



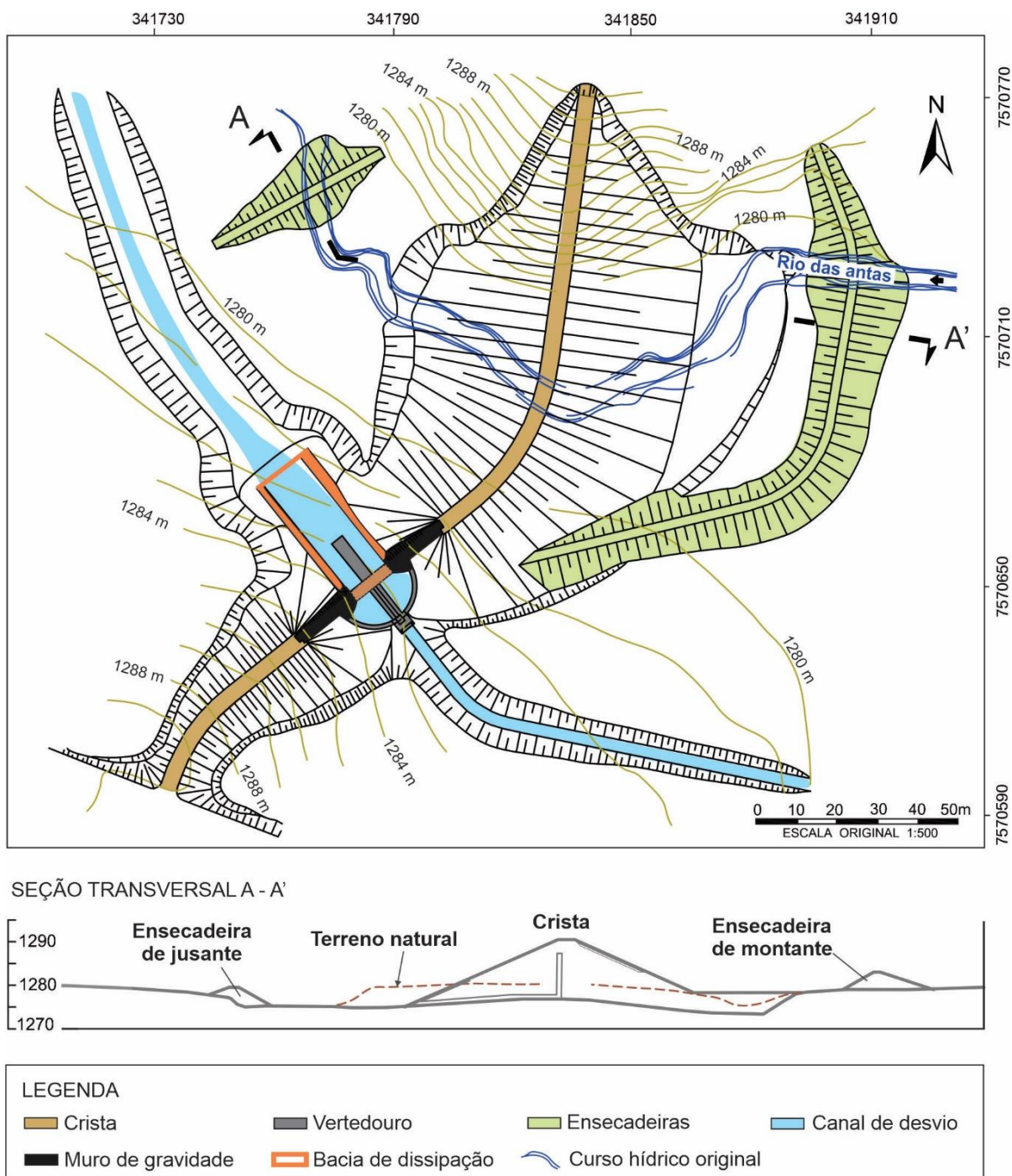
Fonte: Arquivo pessoal

O arranjo geral é composto de um barramento com eixo curvo, com 180 m de comprimento, concavidade voltada para jusante, com crista de 4 m de largura posicionada na altitude 1290 m e borda livre de 0,8 m (Figura 3). O corpo da estrutura é constituído por um maciço argiloso compactado, homogêneo, com 17 m de altura máxima.

O vertedouro é em soleira livre, em arco de simples curvatura, cilíndrico, de geratriz vertical e raio constante, construído em concreto massa. O descarregador de fundo é um prolongamento da estrutura do arco, também em concreto massa, com armadura de pele, e contém um poço de 0,80m x 0,80m, com 7,1m de profundidade para instalação da comporta.

A laje do fundo do canal tem uma camada superior de 0,50 m de espessura, armada à retração e uma camada inferior de aproximadamente 0,20 m de espessura mínima em concreto poroso, para regularização e drenagem. A camada superior é ancorada à rocha de fundação por ancoragens passivas.

Figura 3 - Arranjo geral em planta e seção transversal da barragem de captação Águas Claras, com evidência para os principais elementos da estrutura e curso hídrico original que foi desviado para a construção do maciço.

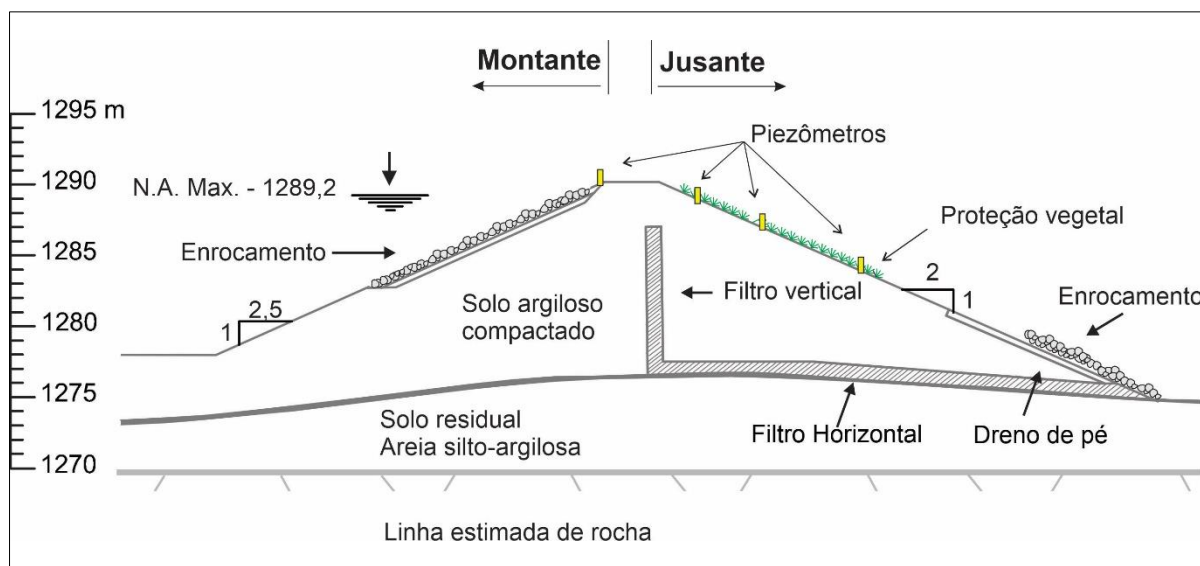


Fonte: Modificado de Nuclebrás (1979).

A barragem é dotada de sistema de drenagem interna composto por um filtro vertical contínuo de areia com 0,60 m de espessura, conectado a um dreno sub-horizontal, também contínuo de areia, com 0,50 m de espessura (Figura 4). Próximo

ao pé de jusante, numa extensão aproximada de 30 m, na parte mais baixa das fundações, foram executados, a cada 1,5 m, poços de alívio de areia, com diâmetro de 0,30 m, que atravessam a primeira camada de aterro compactado e a fundação em solo e alcançam o topo rochoso. Na extremidade jusante, há um dreno de pé com aproximadamente 4,0 m de altura, entre as elevações 1277 m e 1281 m.

Figura 4 - Perfil construtivo da barragem Águas Claras com ilustração dos principais elementos.



Fonte: Modificado de Nuclebrás (1979).

O plano de monitoramento e instrumentação da barragem é composto por 15 piezômetros do tipo Casagrande, dos quais um está inoperante. Há quatro seções de análise: uma próxima do sistema extravasor (margem direita deste), uma na porção central do maciço, uma próxima à ombreira direita e uma à esquerda do sistema extravasor e próximo da ombreira esquerda.

O talude de montante é geral, sem bermas e protegido com enrocamento (conjunto de blocos de rochas que inibem a erosão pelas ondas). O talude de jusante também é geral e sem bermas, protegido com grama e dispõe de canaletas de drenagem, de concreto pré-moldado, em meia cana em todo o contorno do pé do talude.

Na saída do dreno sub-horizontal o talude jusante é protegido com enrocamento e, nesse nível, em parte do talude, há a formação de uma área alagada que ocasiona o afogamento ou cobertura da área de escape do sistema de drenagem interna da barragem (Figura 5). Não foi esclarecido se a área alagada é uma feição planejada no projeto da barragem para desempenhar alguma função ou se foi

originada de forma não intencional a partir do represamento por resquícios da enseadeira originalmente utilizada na construção do barramento.

Figura 5 – Fotografias de detalhe da área alagada em porções da base do talude de jusante.



Fonte: Arquivo pessoal

3.3 Aspectos fisiográficos e contexto geológico

O contexto geológico da área é inserido no Complexo Alcalino de Poços de Caldas (CAPC), estrutura vulcânica circular datada do Mesozoico-Cenozoico (MOREIRA *et al.*, 2003). Sua altitude média é de 1.200 m, 500 m acima das regiões circunvizinhas. A estrutura é formada por diques anelares com relevo acentuado e escarpas íngremes, e está encaixada em rochas do embasamento (gnaisses, migmatitos e granulitos). No planalto, a presença de altos e baixos estruturais estão associados a falhamentos e ao abatimento de sua porção central, oriundos da associação de eventos tectônicos aos processos de intemperismo e hidrotermalismo. (SCHORSCHER, 1991).

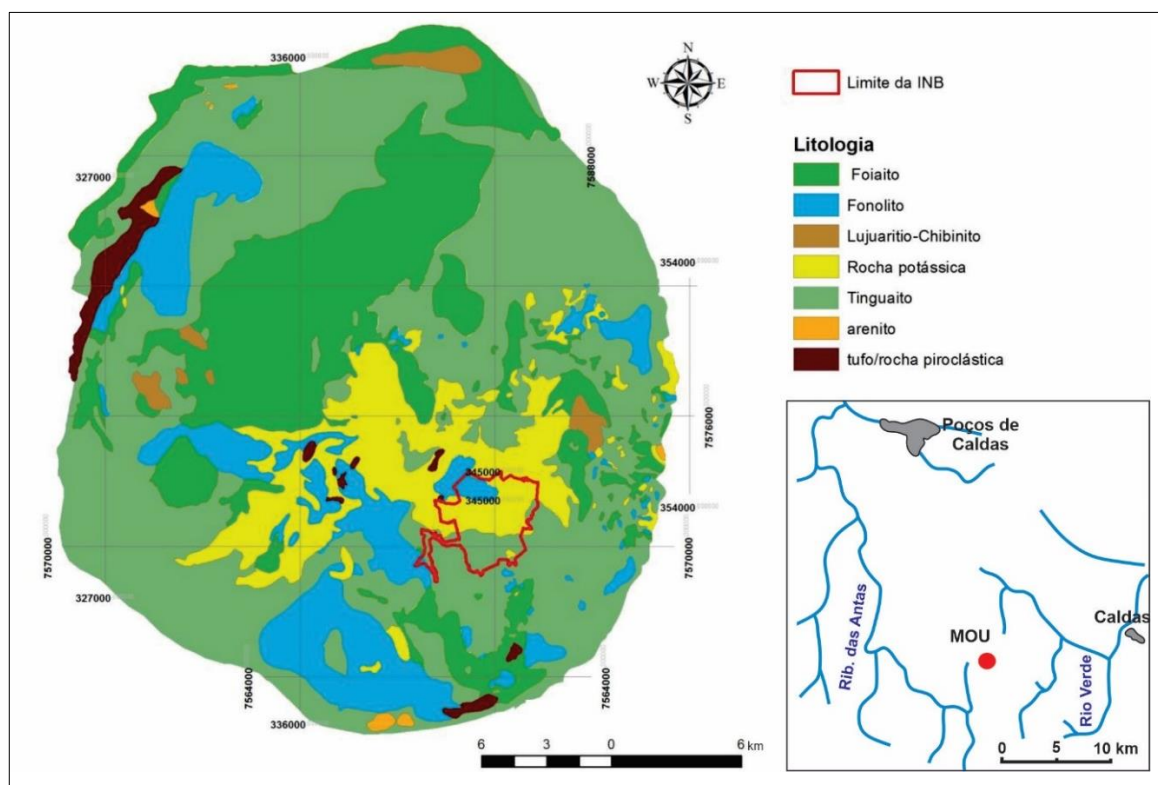
As rochas do CAPC são alcalinas, vulcânicas, subvulcânicas e plutônicas, predominantemente, tinguaíto, foiaíto, fonolito e nefelina sienito; além de rochas sedimentares argilo-arenosas (GORSKY; GORSKY, 1974; PARIS, 1988) (Figura 6). As jazidas do CAPC são produtos de atividade hidrotermal seguido de processos de intemperismo profundo e de laterização do solo favorecidos pelas condições climáticas, e apresentam mineralizações de elementos terras raras (ETR), bauxita, urânio, molibdênio, zircônio, ferro, manganês, argilas refratárias, entre outros (SHORSCHER; SHEA, 1992; FRAENKEL *et al.*, 1985). Um grande número de falhas e fraturas cortam todo o complexo e prolongam pelas encaixantes com direções predominantes ENE, NE e NW (ALMEIDA FILHO; PARADELLA, 1977).

Em relação à pedogênese, nos altos estruturais predominam os processos de laterização e/ou oxidação intensa, que resultam na formação de óxidos/hidróxidos de ferro, alumínio e titânio. Nos baixos, há formação de argilas do grupo das ilitas, esmectitas e montmorillonitas (JIMÉNEZ-RUEDA *et al.*, 1993).

A região apresenta um clima tropical de altitude, com as estações chuvosa e seca bem marcadas, e um elevado índice pluviométrico, com precipitação média de 1700 mm e mais de 120 dias de chuva por ano (CHAPMAN *et al.*, 1991). Quanto à hidrografia, o local do barramento faz parte da bacia do Rio das Antas, que é contígua à bacia do Rio Verde e separada desta por uma sela topográfica que constitui o divisor natural das águas na região da MOU.

Do ponto de vista hidrogeológico, a ocorrência de água subterrânea na região está condicionada ao grau de meteorização e de faturamento das rochas, uma vez que estas apresentam alta densidade, são compactas, não-porosas, pouco permeáveis e com capacidade aquífera muito reduzida. Assim, o armazenamento e a circulação significativa de água se restringe a zonas do manto de alteração e ao sistema de fraturas das rochas subjacentes (CRUZ; PEIXOTO, 1991).

Figura 6 - Mapa geológico e contexto hidrográfico do Planalto de Poços de Caldas, com localização da INB.



Fonte: Compilado de Fraenkel *et al.* (1985) adaptado por Alberti (2017) e Cipriani (2002)

4. REVISÃO DE BARRAGENS

4.1 Classificação de barragens

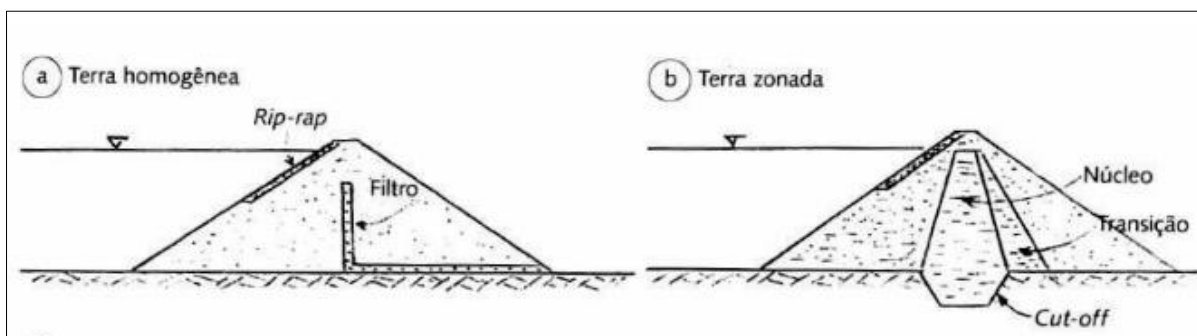
Dentre os diferentes critérios para a classificação de barragens, os mais utilizados referem ao uso, função e material de construção utilizado. A partir da definição da finalidade e dos condicionantes naturais do local de implantação da barragem, é determinado o tipo de estrutura adequado, sua dimensão e obras complementares.

Quanto à função, são subdivididas em barragens de regularização, cuja finalidade é acumular água nos períodos de cheia para utilizar nos períodos de déficit hídrico, e barragens de retenção, que são construídas para reter água de forma temporária e amortecer a onda de cheia, ou para acumular sedimentos, resíduos industriais e rejeitos de mineração (SZYMANSKI, 1999)

Em relação aos materiais de construção, as barragens podem ser classificadas como de terra, de enrocamento, de concreto e mistas.

As barragens de terra são construídas a partir do deslocamento e disposição de um material de empréstimo com acumulação e sucessiva compactação. São denominadas homogêneas quando há predominância de um único material e zonadas, quando apresentam materiais heterogêneos na composição do talude, em geral com um núcleo impermeável de material argiloso (MASSAD, 2010) (Figura 7).

Figura 7 - Ilustrações do perfil construtivo de barragem de terra homogênea (a) e zonada (b).

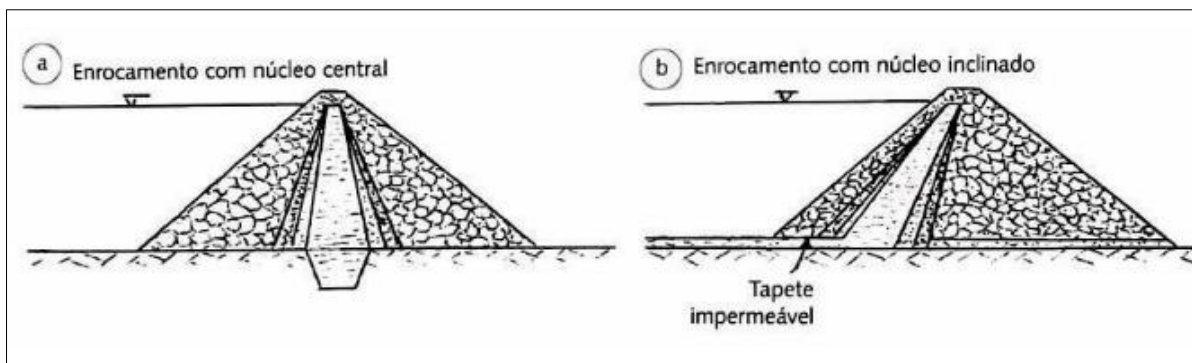


Fonte: Costa (2012)

As barragens de enrocamento são estruturas formadas por uma ou mais faces de blocos de rocha/concreto, com a finalidade de proteger o talude de agentes intempéricos. Por conta da alta permeabilidade do material rochoso, as barragens são

compostas por um núcleo impermeável central ou inclinado de material argiloso (MC DANIEL; BLAIR, 1987) (Figura 8).

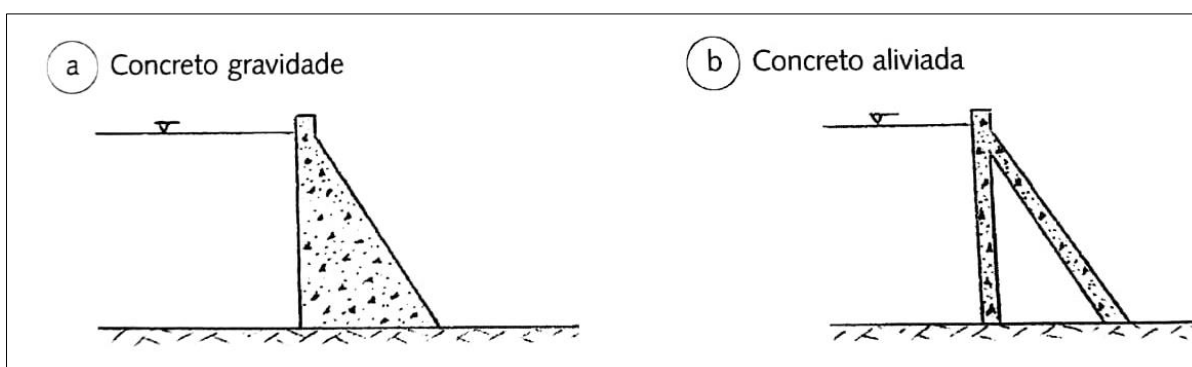
Figura 8 - Ilustrações do perfil construtivo de barragens de enrocamento com núcleo central (a) e com núcleo inclinado (b).



Fonte: Costa (2012)

Entre as barragens de concreto, a mais usual é a de gravidade. Nesse caso o corpo da barragem é constituído por um maciço de concreto, com pouca armação, cuja estabilidade é dada pelo seu peso próprio. Em função do grande volume de concreto, tais estruturas podem se tornar bastante dispendiosas, o que levou ao desenvolvimento de formas que minimizam a utilização do material e tiram vantagem do seu formato, como as barragens de gravidade aliviada, em contraforte e abóboda (COSTA, 2012) (Figura 9).

Figura 9 - Ilustrações do perfil construtivo de barragens de concreto gravidade (a) e de concreto aliviada (b).



Fonte: Costa (2012)

Por fim, a barragem será considerada mista quando ela for construída por diferentes materiais. Os tipos mais conhecidos são: terra/enrocamento; terra/concreto

e enrocamento/concreto. A seguir, serão detalhados os elementos construtivos e principais problemas relacionados às barragens de terra.

4.2 Elementos construtivos de barragens de terra

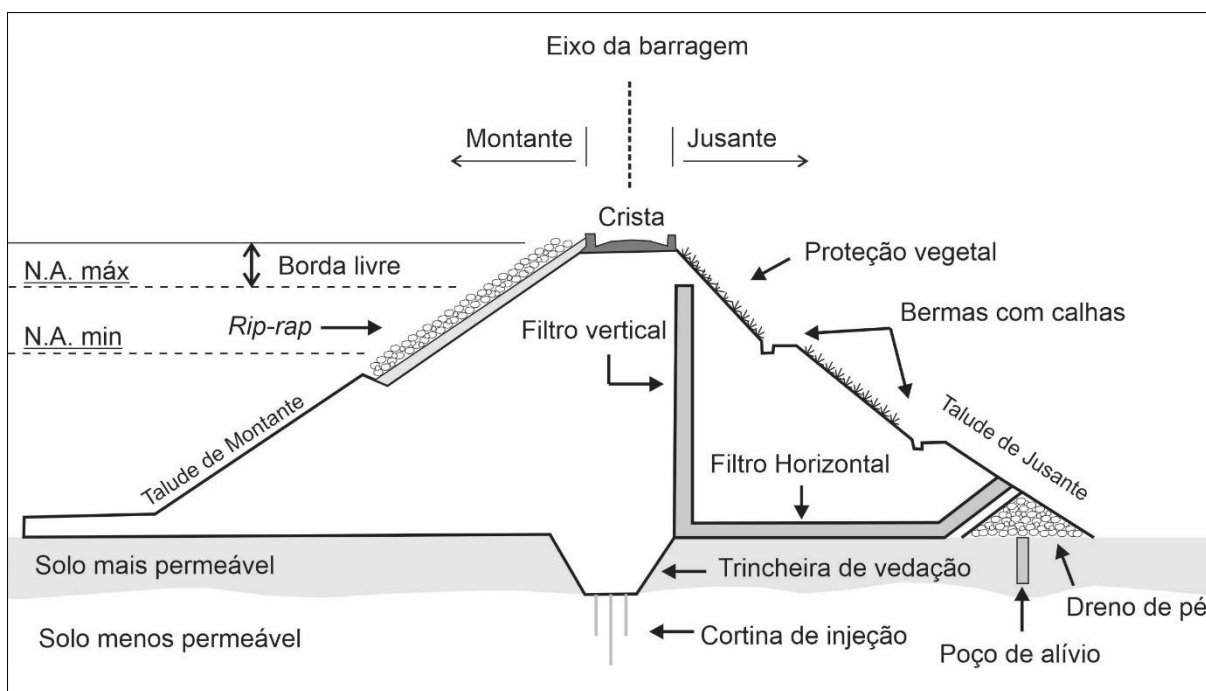
As barragens de terra são o tipo de estrutura mais utilizado, principalmente porque sua construção envolve o uso dos materiais localmente disponíveis, com mínimo de processamento, e porque apresentam requisitos topográficos e de fundação menos restritivos do que para os outros tipos de barragem. Seus solos possuem essencialmente granulometria fina com baixa permeabilidade e o comportamento do aterro é condicionado principalmente pela poropressão (MC DANIEL; BLAIR, 1987)

Os principais elementos construtivos das barragens de terra compõem uma zona de vedação (estanqueidade), uma zona resistente (estabilização) e uma zona de drenagem interna. Com base nesses três elementos principais, existem diversas organizações para disponibilizar os materiais de modo a compor a seção transversal da estrutura (FEEL *et al.*, 2005).

O elevado grau de estanqueidade do maciço deve ser garantido por seu material de construção, isto é, solos argilosos e pouco permeáveis no caso das barragens homogêneas, e núcleo impermeável no caso das zoneadas (MC DANIEL; BLAIR, 1987). Outros elementos que auxiliam nesta função são: tapetes impermeabilizantes, indicados quando a espessura do solo permeável é muito grande; injeções, que são caldas de cimento, bentonita ou aditivos químicos utilizados em substratos permeáveis ou no controle das fraturas rochosas para vedar e consolidar a fundação; e trincheiras impermeáveis, aplicáveis para a impermeabilização da camada de areia na fundação (FEEL *et al.*, 2005).

As zonas externas da barragem, por sua vez, devem garantir a estabilidade (resistência) da estrutura para as várias situações de carga. Dentre os elementos, estão o *rip-rap* ou enrocamento, conjunto de blocos de rochas que protegem contra a ação de ondas, chuvas, ventos; a vegetação, que tende a prevenir ações erosivas; e as bermas com calhas, que evitam deslocamento de material instável (GAIOTO, 2003) (Figura 10).

Figura 10 - Principais elementos construtivos de uma barragem de terra homogênea.



Fonte: Compilado de Fell *et al.* (2005); Miranda (2016); Massad (2010).

Uma vez que a porosidade e a permeabilidade são propriedades inerentes aos solos, as barragens de terra estão submetidas a algum valor de percolação. Para interceptar o fluxo de percolação e redirecioná-lo, é previsto a inserção de um sistema de drenagem, que evita a erosão interna e reduz as pressões intersticiais na porção de jusante (CARLSTEN *et al.*, 1995). Os principais elementos desse sistema são filtros verticais, filtros horizontais, drenos de pé, tapetes drenantes e poços de alívio (Figura 10).

Na seção de montante, portanto, deve ser buscado o máximo de vedação, tanto do maciço como da fundação, e na seção de jusante, deve ser facilitado o processo de drenagem, de forma controlada, do maciço e da fundação.

Outros elementos incluem a crista, superfície plana no topo da barragem normalmente usada como uma estrada para tráfego de veículos ou para facilitar a operação, inspeção e manutenção da barragem, e a borda livre (ou "folga"), distância vertical entre a crista e o nível das águas do reservatório, que objetiva a segurança contra o transbordamento. As estruturas extravasoras de barragens são constituídas por vertedouros de superfície, com ou sem comportas, para a evacuação de cheias, e por descargas de fundo para o esvaziamento do reservatório.

4.3 Problemas associados a barragens de terra

Os principais problemas que ocorrem em barragens podem ser associados a falhas de projetos, problemas operacionais e/ ou manutenção inadequada. A maior proporção dos acidentes ocorre nos primeiros 10 anos, em especial, no primeiro ano após o comissionamento, quando a estrutura é submetida aos esforços solicitantes (ICOLD, 1995). As circunstâncias e processos que levam à ruptura de uma barragem são de origem variada e podem corresponder a um fator isolado ou à combinação de mais de um (MASCARENHAS, 1990).

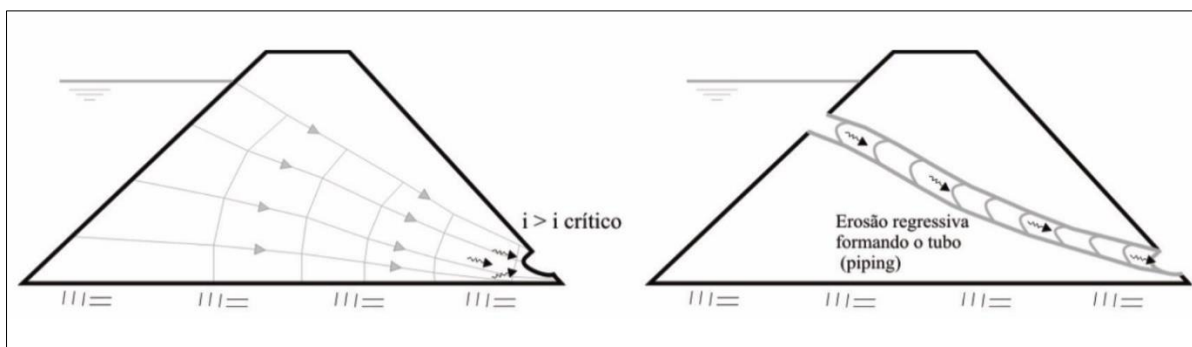
As barragens de terra concentram a maioria dos acidentes, o que, em parte, tem relação com o grande número de estruturas deste tipo existente (SERAFIM, 1981). Essas barragens são mais susceptíveis a rompimentos por mecanismos como o galgamento, a erosão interna e escorregamento de taludes (CIGB, 2011).

O galgamento é a passagem da água do reservatório por cima da barragem. O evento é seguido de carreamento de materiais e desprendimento dos blocos na crista e no talude jusante, o que deixa grandes marcas de erosão e pode levar à ruptura de toda a estrutura (DSO, 1998). O galgamento pode ser originado por fatores como projeto inadequado do sistema extravasor, bloqueio dos vertedouros, eventos de cheia, ou formação de onda dentro do reservatório, provocada por sismos, pelo deslizamento de uma grande quantidade de terra das encostas ou pelo rompimento de outra barragem à montante (COLLISCHONN, 1997).

A erosão tubular regressiva (*piping*) é uma das formas mais comuns de erosão interna e ocorre quando a água do reservatório que flui através dos poros dos solos da fundação ou do maciço exerce uma força de arraste capaz de remover as partículas e movê-las até o ponto de surgência. Isto causa uma erosão progressiva para montante, que forma um tubo através da barragem ou da fundação, e que aumenta com a remoção por erosão do solo adjacente (MARQUES FILHO; GERALDO, 1998) (Figura 11).

Alguns fatores condicionantes ao *piping* incluem a ausência de filtros e elementos drenantes internos, o grau de compactação do maciço, presença de fundações arenosas e ausência de transições adequadas entre solos e materiais granulares (MASSAD, 2010).

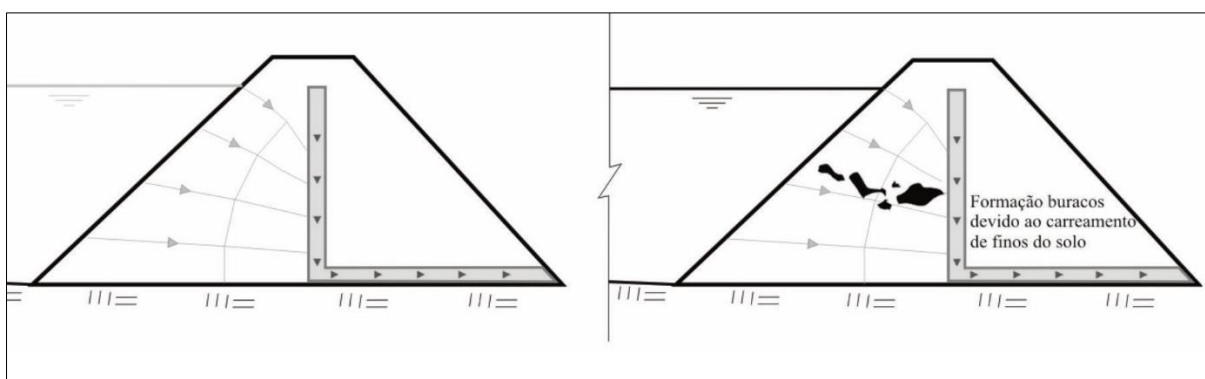
Figura 11 - Formação de piping por erosão regressiva.



Fonte: Perini (2009)

O carregamento de finos constitui outro processo erosivo comum em barragens e ocorre geralmente quando os materiais utilizados são mal graduados e permitem que solos finos escapem por uma matriz granular (PERINI, 2009) (Figura 12).

Figura 12 - Erosão interna a partir do carregamento de finos.

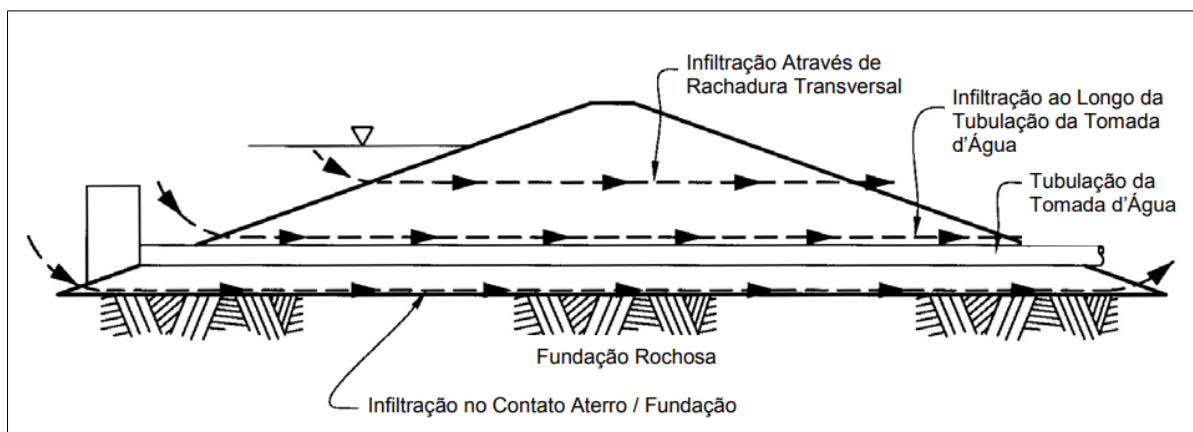


Fonte: Perini (2009)

A erosão interna pode ocorrer também a partir de infiltrações irregulares ao longo de trajetórias já estabelecidas, tais como: fissuras no maciço ou fundação transversais à barragem; contatos entre o solo do maciço e rocha; e entre solo do maciço e estruturas auxiliares (MIRANDA, 2016). Essas descontinuidades permitem a formação de um fluxo concentrado, que passa a erodir o solo e causar o alargamento do caminho de água (Figura 13).

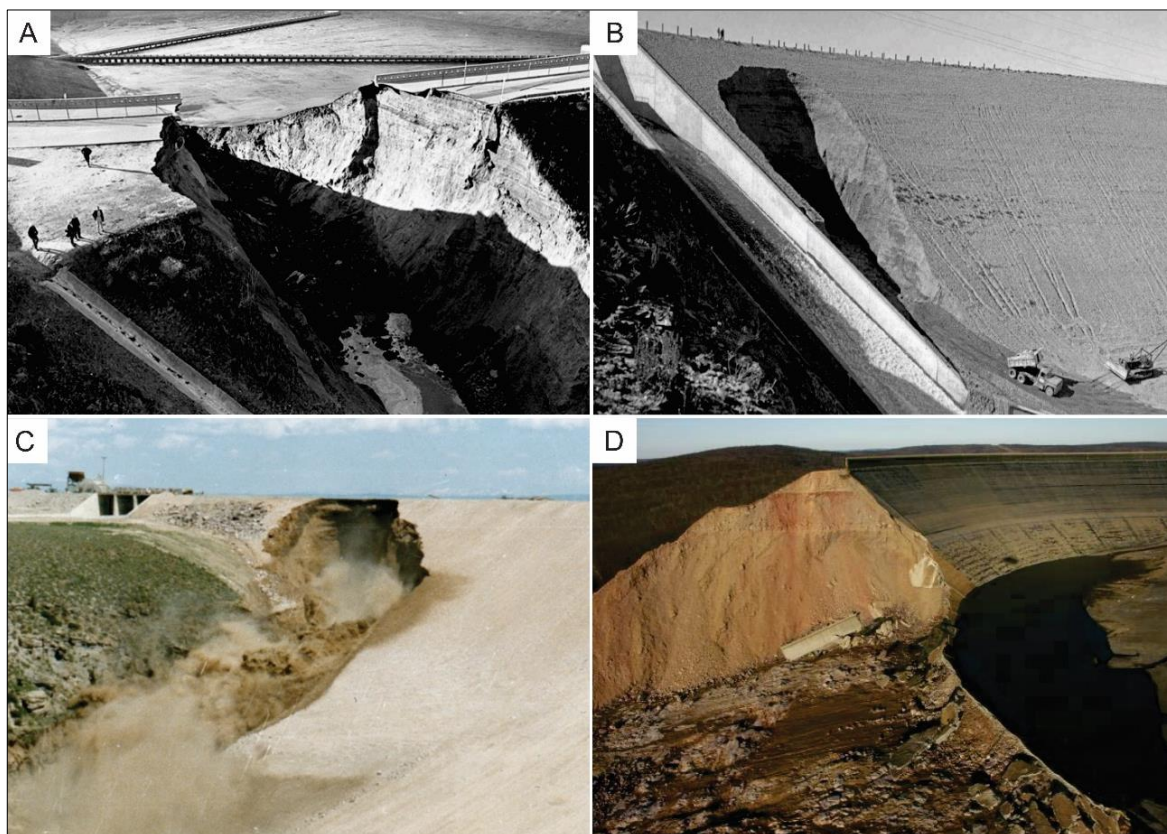
A Figura 14 ilustra alguns episódios históricos de acidentes em barragens de terra a partir de processos erosivos.

Figura 13 - Processo de erosão interna por meio do alargamento das paredes das trincas e contatos.



Fonte: Miranda (2016)

Figura 14 - Exemplos de acidentes com rompimento de barragens: A - Rompimento de parte da estrutura da barragem Hills Dam (EUA, 1963), após infiltração irregular pela camada impermeabilizante de asfalto do talude montante; B – Ruptura a partir de processo de *piping* na barragem Fontenelle (EUA, 1965); C – Rompimento da barragem Teton Dam (EUA, 1976) em função de processo de *piping* no corpo da estrutura; D – Colapso da barragem Taum Sauk (EUA, 2005) a partir do processo de erosão interna.



Fonte: VandenBerge *et al.* (2011); Baker (2011); Barnes (1992); Hollenkamp *et al.* (2011).

Os deslizamentos de taludes, por sua vez, ocorrem quando as tensões cisalhantes ultrapassam a resistência média dos materiais e podem ser causados pelo

rebaixamento rápido do reservatório, subpressão elevada na fundação, materiais de baixa resistência, escavação no pé do talude, geometrias internas desfavoráveis e abalos sísmicos (MARQUES FILHO; GERALDO, 1998). A ação da água é uma das maiores responsáveis pela instabilidade taludes em barragens. Com o desenvolvimento de pressões neutras, a resistência efetiva do solo tende a diminuir, e a saturação do talude intensifica o peso específico do solo e a componente da força atuante na direção do escorregamento. De acordo com Foster *et al.* (2000) a maior frequência de falhas e acidentes ocorreu em barragens homogêneas ou zoneadas sem um eficiente sistema de controle de poropressões, formado apenas por um filtro na fundação, ou por somente enrocamento de pé.

4.4 Segurança de barragens

4.4.1 Legislação vigente e cenário brasileiro

A segurança de barragens é um tema que ganhou espaço e preocupação por parte de governos, empreendedores e órgãos fiscalizadores de diversos países após ocorrência de grandes acidentes ao redor do mundo, principalmente a partir da década de 50 (BALBI, 2008). Desde então, a ICOLD (Comissão Internacional de Grandes Barragens) passou a investir vigorosamente em um programa de segurança de barragens em escala global e diversas nações implantaram políticas de segurança ou atualizaram suas regulamentações (VEROL, 2010).

No Brasil, a legislação específica para o setor foi estabelecida somente em 2010, com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), embora já existissem estudos e documentos orientadores, como o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL, 2002) e o Guia Básico de Segurança de Barragens (CBDB, 1999). Esta Lei, entretanto, é aplicável apenas a barragens enquadradas em pelo menos um dos itens a seguir, segundo o artigo primeiro: *“(i) altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros); (ii) capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos); (iii) reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis e; (iv) categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.”* (BRASIL, 2010).

Dentre os objetivos da PNSB, estão o de garantir a observância de padrões de segurança de barragens para reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências; criar condições para ampliação do universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança; reunir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos, entre outros (BRASIL, 2010).

Embora o respaldo legal represente um avanço no cenário brasileiro, ainda são inúmeras as barragens, entre pequenas, médias e grandes, que não contam com um sistema de manutenção adequado e, muito menos, com um programa de gestão de segurança (VEROL, 2010). Além disso, existe um passivo de informações básicas sobre as barragens existentes no país. Segundo último Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2019), das 17.604 barragens cadastradas, 61% não dispõem de dados suficientes para dizer se elas se submetem ou não à PNSB e apenas 7.386 estão regularizadas, isto é, possuem algum tipo de autorização na forma de outorga, concessão, licença, entre outros.

4.4.2 Monitoramento de barragens

A segurança de uma barragem deve ser considerada nas suas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento, primeiro vertimento, operação, desativação e de seus usos futuros (BRASIL, 2010). Para garantir as necessárias condições de segurança ao longo de sua vida útil, devem ser adotadas medidas de prevenção e controle. Uma dessas medidas implica na realização de inspeções técnicas regulares, cuja periodicidade é estabelecida de acordo com a classificação de risco e dano potencial associado.

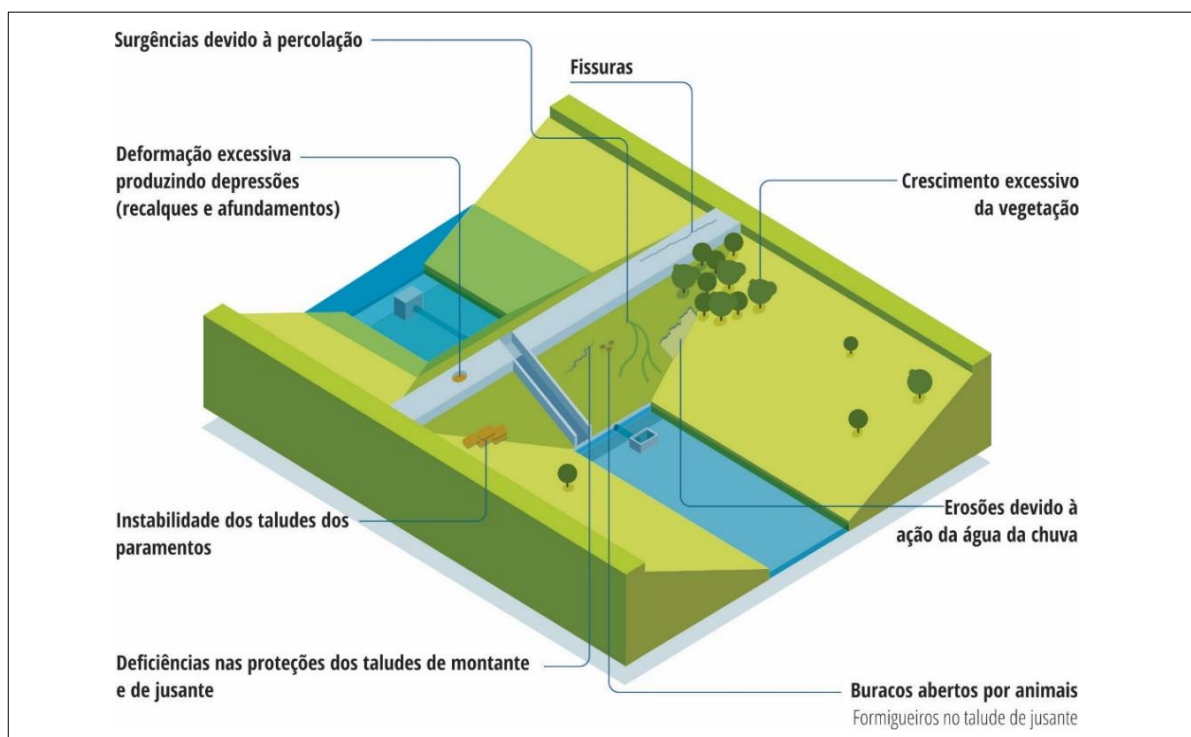
As inspeções técnicas têm o objetivo de avaliar as condições físicas das partes integrantes da estrutura, de modo a identificar e monitorar anomalias que afetem potencialmente sua segurança. Quando bem executadas, essas atividades de monitoramento apontam, com a devida antecedência ou urgência, a necessidade de reabilitar as barragens que estejam em perigo ou risco de rompimento (ANA, 2016).

O monitoramento em barragens é realizado, tradicionalmente, a partir de inspeções visuais e instrumentação de auscultação (PENMAN *et al.*, 1999). A instrumentação consiste no conjunto de equipamentos, em geral instalados na estrutura, que quantificam parâmetros como tensão, pressão, fluxo, deslocamento,

temperatura, níveis da água e precipitação (PENMAN *et al.*, 1999). Os dados obtidos, posteriormente analisados e interpretados, auxiliam na avaliação das condições de segurança do barramento. Em barragens de terra, os principais instrumentos utilizados são inclinômetros, piezômetros, tubos telescópicos e medidores de nível, de vazão e de recalques (COSTA, 2012).

A inspeção visual consiste no caminhamento ao longo dos taludes e crista da barragem de modo a observar todos os elementos da estrutura e o estado geral dos instrumentos de auscultação (BRASIL, 2002). O inspetor devidamente qualificado registra condições anormais ou incomuns manifestadas em qualquer ponto visível que possam comprometer a segurança da barragem. Em barragens de terra, as principais anomalias são observadas na forma de recalques, fissuras, abatimentos, erosão, ravinamento, presença de buraco de animais, crescimento excessivo da vegetação, deterioração ou obstrução das estruturas hidráulicas, percolação, surgências e borda livre insuficiente (ANA, 2016) (Figura 15).

Figura 15 - Anomalias verificadas em barragens de terra



Fonte: ANA (2019)

Ainda que as técnicas de monitoramento convencionais, quando bem efetuadas, mostrem resultados satisfatórios no diagnóstico das condições de

segurança de barragens, existem algumas limitações e considerações sobre esses métodos. A instrumentação, por exemplo, produz dados pontuais e muito espaçados, quando comparados às dimensões do maciço (PENMAN, 1999). Outros fatores, tais como envelhecimento de equipamentos, a falta de sensibilidade suficiente, e manutenção inadequada, podem causar leituras errôneas e prejudicar a detecção de anomalias (SILVEIRA, 2006).

Por sua vez, a inspeção visual é subjetiva, depende do conhecimento do profissional e está sujeita a erros de interpretação ou omissão. Além disso, apresenta limitação da visão ao comportamento externo à estrutura. Portanto, mesmo se bem instrumentada e corretamente inspecionada visualmente, uma barragem ainda possui setores onde a informação sobre o desempenho é insuficiente ou inexistente (TEIXEIRA, 2013).

Em vista das limitações apresentadas sobre os métodos convencionais de inspeção e do aumento da demanda por níveis mais elevados de segurança, a aplicação de outros procedimentos deve ser considerada de modo a complementar as técnicas de monitoramento. Nesse contexto, alguns métodos geofísicos apresentam potencial de atuar como ferramenta de investigação indireta, de baixo custo, móvel e que produz dados com abrangência maior e em diversas escalas.

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA ELETRORRESISTIVIDADE

A geofísica é um ramo da Geociências que visa a investigação das estruturas subsuperficiais a partir da aquisição de propriedades físicas intrínsecas do meio subterrâneo heterogêneo (MILSOM; ERIKSEN, 2011). Existe uma gama de métodos e técnicas desenvolvidos para a obtenção e identificação do contraste de diferentes propriedades físicas. No presente estudo foi empregado o método da eletrorresistividade para obter a distribuição da resistividade no interior do corpo da barragem e da fundação, de modo a auxiliar no diagnóstico das condições de percolação de água na estrutura.

O método da eletrorresistividade é fundamentado no estudo da variação do potencial elétrico e determinação da resistividade dos materiais (TELFORD *et al.*, 1990). O princípio de funcionamento obedece aos conceitos físicos da eletricidade, que são pormenorizados a seguir.

5.1 Corrente elétrica e seu fluxo nos materiais

A corrente elétrica consiste na movimentação ordenada de cargas através da área da seção de um condutor (TIPLER, 1999). Para que tal deslocamento ocorra, é necessária a existência de partículas livres – íons ou elétrons – e de uma diferença de potencial entre duas extremidades.

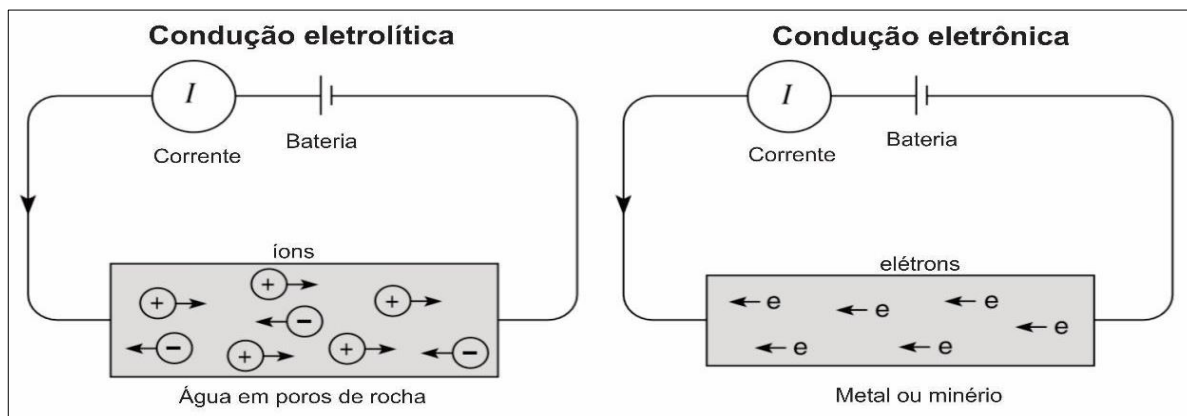
Em solos e rochas, os principais mecanismos de propagação dessas correntes elétricas ocorrem na forma da condução eletrônica e da condução eletrolítica (ORELLANA, 1972) (Figura 16).

A condução eletrônica consiste no deslocamento de elétrons livres na matriz de rochas constituídas por minerais condutores, que contêm grande quantidade de elétrons móveis disponíveis em suas estruturas na forma de nuvens eletrônicas (ROBINSON, 1988). A condução eletrônica no meio geológico é especialmente atribuída aos metais nativos, sulfetos, óxidos e ao carbono quando na forma de grafita (ORELLANA, 1972).

Na condução eletrolítica ocorre o deslocamento dos íons dissolvidos na água contidas nos poros de rochas, sedimentos inconsolidados ou em fissuras. Assim, de forma simplificada, a condutividade desses materiais varia em função crescente do

conteúdo de água presente, da salinidade e da conectividade entre os poros (KEAREY *et al.*, 2002).

Figura 16 - Condução de eletricidade em rochas e metais



Fonte: Musset; Khan (2000)

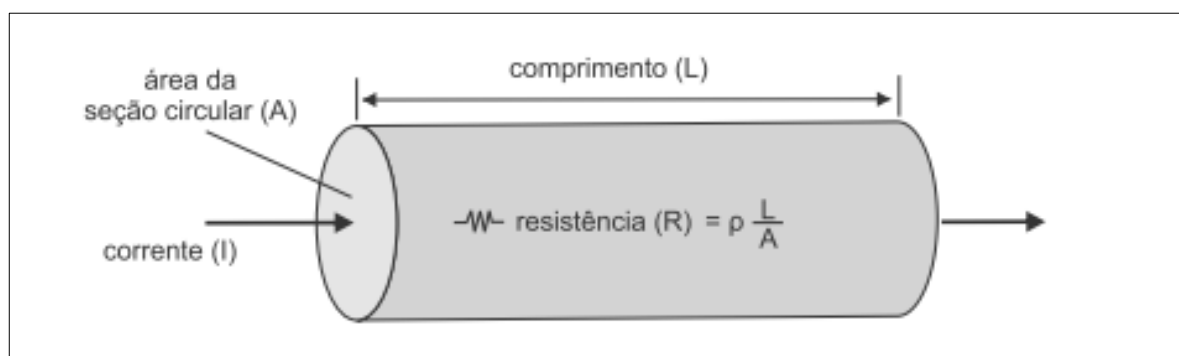
Em casos onde as cargas elétricas não se movem livremente no interior de um material, este é denominado isolante, como a maioria dos minerais silicáticos.

5.2 Resistência e resistividade elétricas

A resistência elétrica (R), expressa em ohms, consiste na capacidade que um corpo possui de se opor à passagem de uma corrente, e varia em função da diferença de potencial (V), medida em volts, e da corrente (i) que atravessa o material, medida em amperes (HALLIDAY *et al.*, 1993). Essa relação de proporcionalidade é regrada pela Lei de Ohm, expressa pela equação:

$$V = i \cdot R \quad (1)$$

Em grande parte dos condutores, a resistência é uma constante, isto é, a intensidade da corrente elétrica é diretamente proporcional à tensão aplicada (MUSSETT; KHAN, 2000). Para esses corpos, chamados condutores ôhmicos, a resistência elétrica é dependente de três fatores relacionados ao corpo condutor: comprimento (L), expressa em metros, área de seção transversal (A), expressa em metros quadrados, e resistividade (ρ), medida em ohm-metro (Figura 17).

Figura 17 - Fluxo de corrente num corpo cilíndrico.

Fonte: Knödel *et al.* (2008).

Essa relação é expressa conforme a equação:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (2)$$

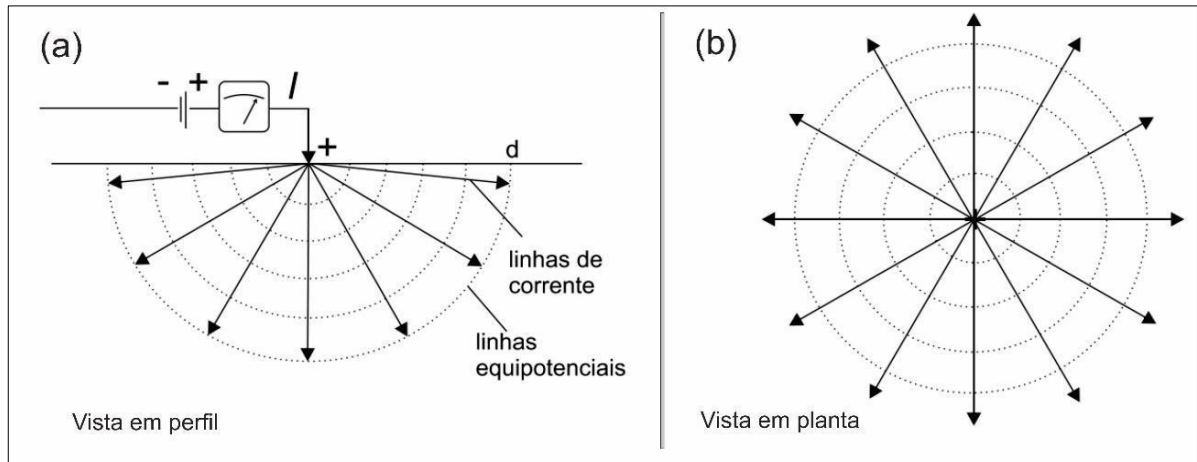
A resistividade, por sua vez, está relacionada ao material do condutor e é independente de sua forma. A propriedade varia conforme a estrutura atômica das substâncias e da temperatura e é obtida ao aplicar um fator de correção, denominado fator geométrico (K), sobre a resistência medida. No caso de um corpo cilíndrico, o fator de correção é dado pela razão entre área de sua seção transversal e o seu comprimento. Assim, a resistividade pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$\rho = R \frac{A}{L} = RK \quad (3)$$

5.3 Fluxo de corrente na Terra

Na Terra, a corrente elétrica não flui por um único caminho, como no caso do condutor da Figura 17. Ao introduzir uma corrente elétrica no meio a partir de uma fonte posicionada na superfície do terreno, a corrente irá fluir apenas no semi-espaco inferior. Assim, no caso de uma subsuperfície homogênea e isotrópica, o potencial elétrico diminui radialmente, enquanto as linhas de fluxo de corrente são estabelecidas em direções perpendiculares, no sentido do maior para o menor potencial elétrico (Figura 18).

Figura 18 - Fluxo de corrente elétrica na terra para um eletrodo isolado, com vista em perfil e em planta.



Fonte: Dentith e Mudge (2014)

Nesse caso, a resistência do meio pode ser obtida ao aplicar a Equação 2 no semi-espço:

$$R = \rho \frac{d}{2\pi d^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d} \right) \quad (4)$$

Em que d corresponde ao raio do semicírculo (distância entre a fonte de corrente e o ponto no qual o potencial é medido) e $2\pi d^2$ corresponde à área da superfície semi-esférica. A diferença de potencial causada pela corrente elétrica através de uma superfície semi-esférica será, de acordo com a Lei de Ohm (Equação 1), dada por:

$$V = iR = i \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d} \right) \quad (5)$$

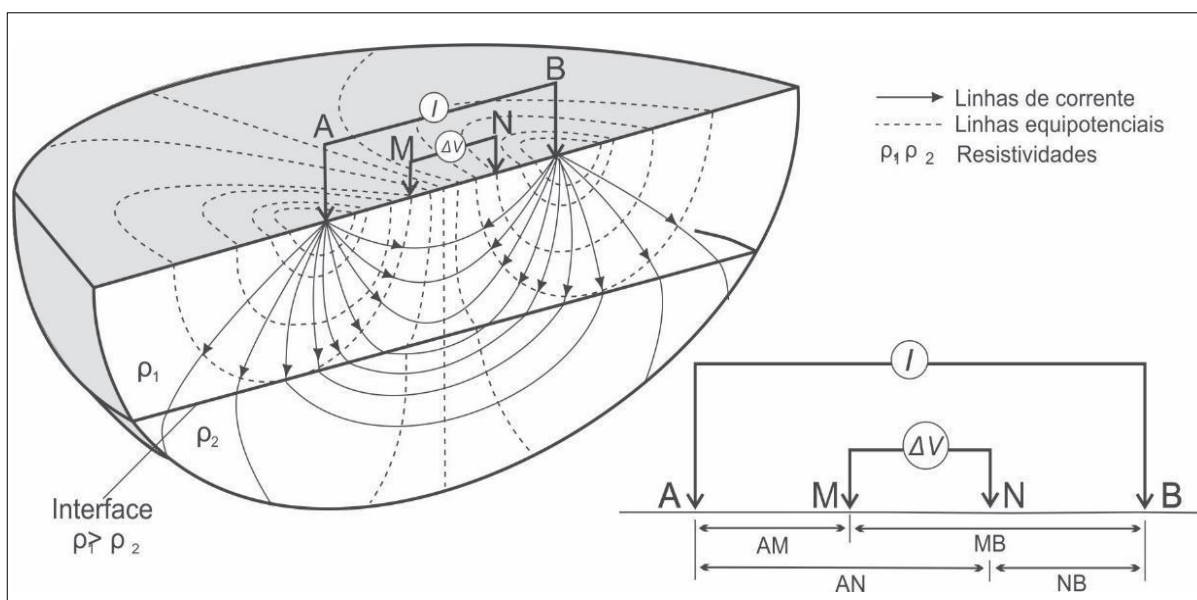
6. MÉTODO DE PESQUISA

6.1 Método da eletrorresistividade

O método da eletrorresistividade tem por finalidade a determinação da distribuição da resistividade elétrica em subsuperfície, a partir de uma fonte artificial de corrente elétrica (KEAREY *et al.*, 2002). Existem variadas técnicas de aquisição e arranjos de campo disponíveis para diferentes objetivos de investigação. Para o levantamento geofísico deste estudo, foi utilizada a técnica da tomografia elétrica de resistividade e disposição de eletrodos conforme o arranjo Schlumberger.

Nesta configuração, as correntes elétricas geradas artificialmente são introduzidas no solo por intermédio de um par de eletrodos A e B. As diferenças de potencial resultantes são medidas em pontos no terreno por meio de um outro par de eletrodos, M e N, na área de influência do campo elétrico (KEAREY *et al.*, 2002) (Figura 19).

Figura 19 – Esquema de aquisição da resistividade por meio de um arranjo linear de quatro eletrodos, com os eletrodos de potencial M e N posicionados entre os eletrodos de corrente A e B.



Fonte: Adaptado de Knödel *et al.* (2008).

A equação 5 expressa separadamente os efeitos da movimentação da corrente para um eletrodo. Para encontrar o potencial elétrico V num ponto qualquer do terreno entre os dois eletrodos é necessário considerar as contribuições de ambos e combinar

as duas equações. Desta forma, o potencial elétrico num ponto do terreno entre os dois eletrodos de corrente será:

$$V = i \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad (6)$$

Os potenciais gerados nos eletrodos M e N podem ser obtidos a partir da Equação 6, expressos como:

$$V_M = i \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad \text{e} \quad V_N = i \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (7)$$

Assim, a diferença de potencial medida no equipamento para determinada posição dos eletrodos MN é dada por:

$$V_{MN} = i \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (8)$$

Portanto, o cálculo da resistividade depende da intensidade de corrente que percorre o subsolo (i), da geometria da disposição dos eletrodos (K) e da diferença de potencial (V_{MN}) medido pelos eletrodos receptores. A resistividade pode, então, ser expressa pela equação:

$$\rho = \frac{V_{MN}}{i} K, \quad \text{onde} \quad K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$$

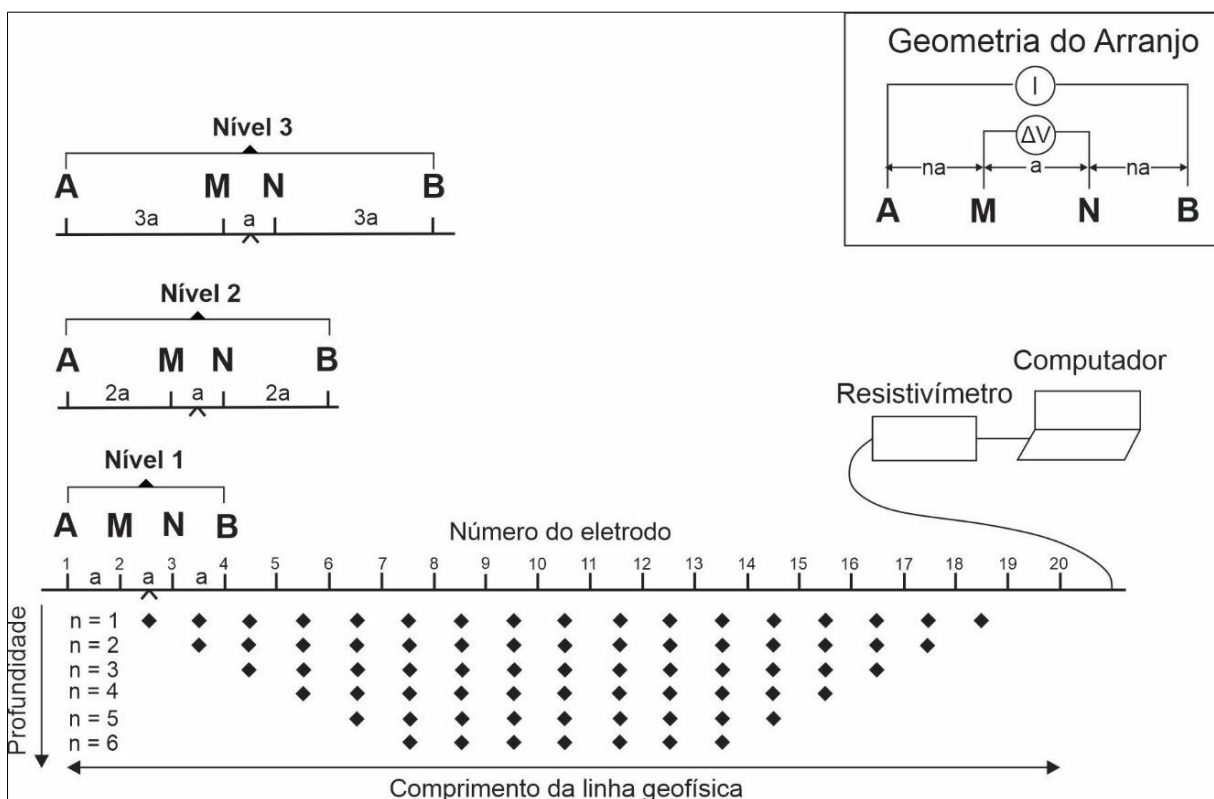
É importante ressaltar que para a fundamentação teórica do método é suposto um meio isotrópico e homogêneo, ao passo que o meio geológico é essencialmente heterogêneo e anisotrópico. Logo, o valor medido, denominado resistividade aparente, não define a distribuição real das resistividades, mas um conjunto da interferência das resistividades dos diversos componentes geológicos do meio físico subsuperficial.

6.2 Técnica da tomografia elétrica e arranjo Schlumberger

A tomografia elétrica de resistividade é considerada uma das principais técnicas de aplicação no auxílio do diagnóstico de infiltrações em barragens (LIN *et al.*, 2013). Essa técnica possibilita obter a variação lateral ao longo de perfis em diferentes profundidades, a partir de determinado arranjo de eletrodos (KNÖDEL *et al.*, 2008).

Na configuração usada neste estudo, o conjunto de eletrodos é disposto conforme o arranjo Schlumberger, indicado para alvos que necessitam de resolução vertical e lateral (MILSOM; ERIKSEN, 2011). O arranjo utiliza um par de eletrodos de potencial (M e N) de distância fixa “a” no centro do conjunto e um par de eletrodos de corrente (A e B) nas extremidades. Os eletrodos de corrente são simetricamente afastados do centro no decorrer do levantamento e, consequentemente, os dados são obtidos em maiores níveis de profundidade (ORELLANA, 1972) (Figura 20).

Figura 20 – Sequência de aquisição para construir uma pseudoseção a partir da técnica da tomografia elétrica e Arranjo de eletrodos Schlumberger.



Fonte: Adaptado de Geotomo (2003)

A sequência de aquisição do ensaio é ilustrada pela Figura 20. No primeiro nível de investigação ($n=1$), o espaçamento $AM=NB$ é igual a “a” e o conjunto de eletrodos é movimentado lateralmente de forma a captar as variações da resistividade no mesmo nível de profundidade. No segundo nível de investigação ($n=2$), as medidas são obtidas em maior profundidade, pois o espaçamento AM e NB aumenta (é igual a “2a”), e essa nova configuração é movimentada lateralmente. O processo segue sucessivamente com aumento do espaçamento AM e NB e deslocamento lateral do conjunto. Como resultado, é obtida uma aquisição bidimensional da superfície ao longo de um perfil. Podem ser realizados diversos perfis de aquisição e seus resultados interpolados para a obtenção de modelos de visualização 3D.

Com avanço da eletrônica, houve significativo aumento da capacidade de processamento de dados com redução de tamanho, peso, e consumo de energia dos equipamentos eletrônicos, além da disponibilização de sistemas multicanais com comutação automática (TEIXEIRA, 2013). Com esses novos sistemas, a aquisição da resistividade é realizada a partir de um conjunto de eletrodos igualmente espaçados entre si e fixos, interligados a um resistivímetro multicanal por um cabo multi-condutor (Figura 20). O resistivímetro, acionado por um computador, é capaz de controlar as medições de forma automática e simultaneamente para mais de uma configuração de eletrodos sem intervenção do operador. Assim, em poucas horas é possível realizar perfis de resistividade elétrica com grande densidade de leituras (REYNOLDS, 2011).

7. GEOFÍSICA APLICADA A BARRAGENS

Diversos estudos têm mostrado eficácia na aplicação de alguns métodos geofísicos na inspeção de barragens. Na investigação sobre percolação anômala (*seepage*) e surgências, os trabalhos de Abuzeid (1994), Nasser (1994), Sjödaahl *et al.* (2008), Cho; Yoem (2007), Sjödaahl *et al.* (2010), Ani; Arewa (2013), Lin *et al.* (2013), Al-Fares (2014), Loperte *et al.* (2015), Adewoyin *et al.* (2017) utilizaram resistividade elétrica; AlSaigh *et al.* (1994), Rozycki *et al.* (2006), Bolève *et al.* (2009), Moore *et al.* (2011) utilizaram potencial espontâneo; Carlsten *et al.* (1995), Hui; Haitao (2011), Loperte *et al.* (2011) utilizaram georradar; Hickey; Duddu (2007), e Osazuwa *et al.* (2008) utilizaram métodos sísmicos. Outras pesquisas utilizaram métodos geofísicos de forma integrada (PANTHULU *et al.*, 2001; OH *et al.*, 2003; CARNEVALE; HAGER, 2008; MINSLEY *et al.*, 2011; MUSTAFA *et al.*, 2012; IKARD *et al.*, 2015; LOPERTE *et al.*, 2016).

O método da eletrorresistividade é um dos que mais se destacam pela eficácia na inspeção de barragens (SOUZA; GANDOLFO, 2016). O sucesso desse método pode ser atribuído à sua sensibilidade em detectar a variação do teor de umidade no interior da estrutura e identificar zonas percolação, que são associadas à diminuição da resistividade elétrica (LIN *et al.*, 2013; LOPERTE *et al.*, 2015). O contraste de propriedades é evidenciado uma vez que materiais como rocha e solo secos que compõem o barramento se comportam como isolantes elétricos, ao passo que caminhos de fluxo de água ou zonas de umidade eventualmente existentes se comportam como condutores elétricos. Alguns estudos que utilizaram esse método são pormenorizados a seguir.

Na barragem de terra Abu Baara, situada no noroeste da Síria, Al-Fares (2014) aplicou a técnica da tomografia elétrica com o objetivo de delinear potenciais caminhos preferenciais de fluxo na subsuperfície próxima ao corpo da estrutura. Problemas com infiltração foram reconhecidos desde o seu primeiro enchimento, quando foi notada uma grande diminuição do nível de água do reservatório. Foram realizadas duas linhas de aquisição no pé dos taludes de jusante e montante e os resultados dos ensaios foram apresentados na forma de duas seções de resistividade. Com os dados, foi possível observar zonas de baixa resistividade, que foram associadas à presença de água, e identificar fatores que elevam o processo de

infiltração pela fundação, como o substrato rochoso fraturado e a presença de cavidades e descontinuidades.

O estudo de Loperte *et al.* (2015) utilizou a técnica da tomografia elétrica para a detecção e caracterização de infiltrações no interior da barragem Monte Cotugno, a maior barragem de terra da Europa, situada no sul da Itália. O levantamento foi motivado pela presença de fraturas visíveis na face impermeável do talude montante da barragem. Os perfis de eletrorresistividade foram levantados na crista do maciço e evidenciaram a presença de zonas de baixa resistividade, que foram associadas à ocorrência de água. Dados de sondagens apontaram a saturação do solo em regiões identificadas como de baixa resistividade e confirmaram a eficácia do método utilizado.

Na barragem de terra Hsin-Shan, situada no norte de Taiwan, o estudo de Lin *et al.* (2013) aplicou a técnica da tomografia elétrica para investigar as origens de surgências observadas na estrutura. Os perfis foram levantados no pilar esquerdo, na crista, e no talude jusante. Um ponto interessante é que foram realizados repetidos levantamentos mensalmente em uma das linhas para verificar a variação da resistividade também no espaço de tempo. Os resultados evidenciaram zonas de baixa resistividade, apontadas como possíveis caminhos de fluxo. Essas zonas não apresentaram grande variação de resistividade ao longo do tempo analisado, independentemente da variação da precipitação, o que corrobora com o pressuposto de que as zonas de baixa resistividade indicam zonas preferenciais de infiltração.

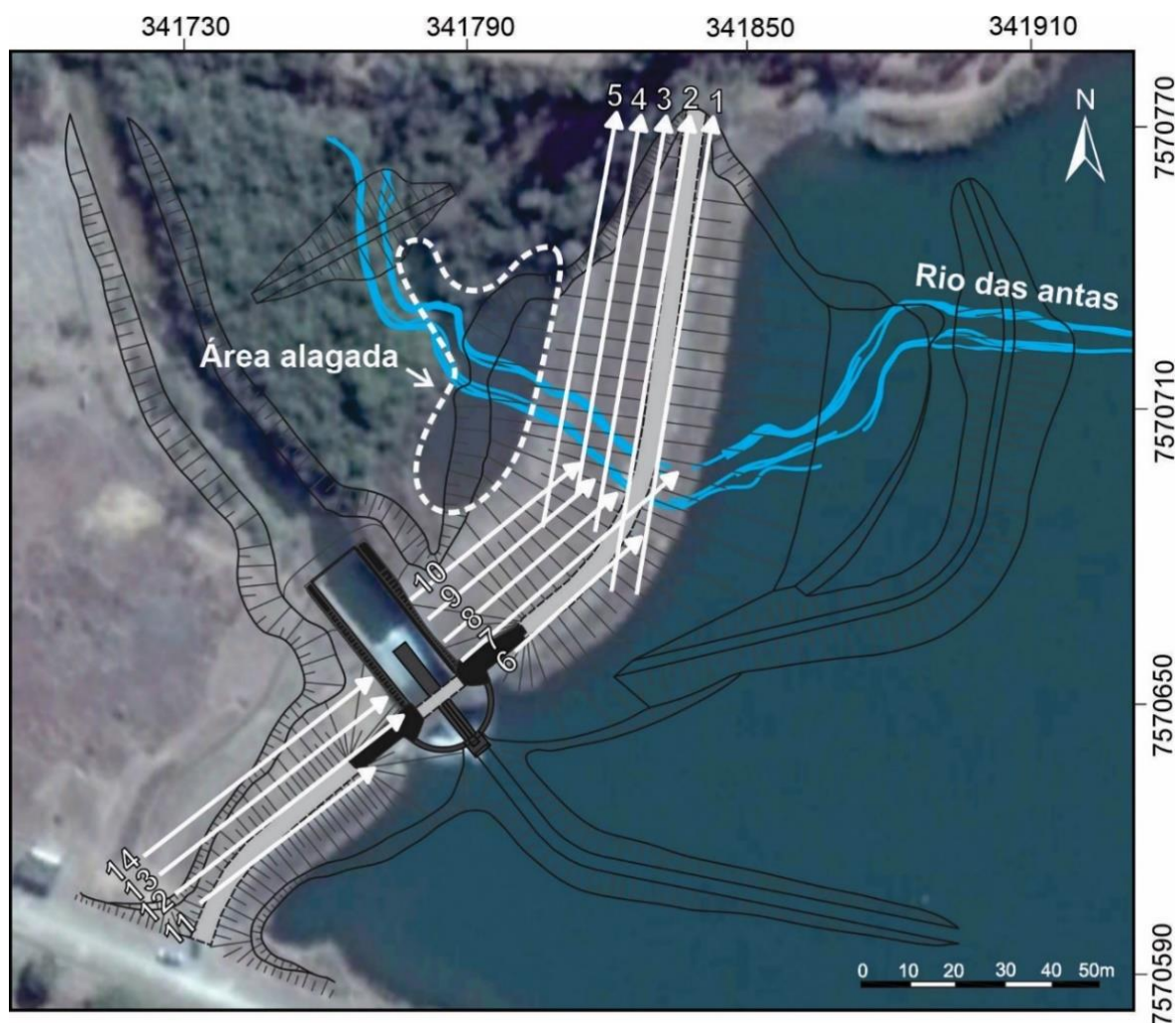
Embora os estudos realizados até então sejam, em sua grande maioria, pontuais, sem continuidade no espaço de tempo, os resultados evidenciam o potencial da atuação técnica dos ensaios em caráter de prevenção e monitoramento nas barragens.

8. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

8.1 Aquisição

Os dados de resistividade foram coletados em dois dias de levantamento na barragem Águas Claras, com uso da técnica da tomografia elétrica e disposição de campo conforme arranjo Schlumberger. Foram realizadas ao todo 14 linhas geofísicas, ao longo de algumas porções do talude montante, da crista e do talude jusante, de tal maneira a cobrir todo o comprimento da estrutura (Figura 21).

Figura 21 - Imagem de satélite com localização das linhas de aquisição de eletrorresistividade, área alagada no pé do talude de jusante e o curso fluvial que foi desviado para construção da barragem. As setas das linhas indicam o sentido do levantamento.



O levantamento foi dividido em três conjuntos nos quais as linhas foram dispostas paralelamente com espaçamento de 5 m. O comprimento das linhas variou de 35 a 100 m e os eletrodos foram dispostos com espaçamento de 2,5 m.

Para aquisição dos dados foi utilizado o resistivímetro Terrameter LS (Figura 22), fabricado pela sueca ABEM Instrument, e que consiste em um único modelo de transmissão e recepção de sinais, com potência de 250 W, resolução de $1\mu\text{V}$ e corrente máxima de 2,5 A. Este equipamento possibilita a realização de ensaios de potencial espontâneo (SP), eletrorresistividade (ER) e polarização induzida (IP) por meio de ciclos periódicos de corrente alternada de baixa frequência, cálculo automático da resistência de contato e do desvio padrão do conjunto de medidas, procedimento que permite a filtragem de ruídos durante a aquisição (ABEM, 2012).

Figura 22 - Detalhe da aquisição geofísica e equipamentos utilizados em campo, dentre eles o resistivímetro, eletrodos, cabos e trenas.



Fonte: Arquivo pessoal

8.2 Processamento de Dados

8.2.1 Modelos de inversão 2D

Os dados geofísicos coletados foram armazenados na forma de arquivos de extensão *.dat* e, inicialmente, tabelados no programa Surfer (Golden Software), para

uma “edição pré-processamento”, que descarta dados ruidosos com valores discrepantes (GANDOLFO, 2007). Posteriormente, foram processados no programa Res2dinv, versão 3.4, desenvolvido pela Geotomo software.

A partir dos dados de entrada, o programa determina, inicialmente, um modelo bidimensional na forma de pseudo-seções de resistividade aparente, onde cada ponto investigado na subsuperfície possui uma posição e profundidade teórica específica de acordo com o espaçamento e arranjo de eletrodos utilizados na investigação (GRIFFITHS; BARKER, 1993).

No entanto, as pseudo-seções refletem qualitativamente a distribuição espacial das resistividades elétricas aparentes em subsuperfície e não possuem correspondência com a verdadeira posição e geometria das estruturas subsuperficiais (GANDOLFO, 2007). Dessa maneira, é necessário o emprego do método da inversão, técnica de modelagem numérica que adequa os valores e possibilita uma interpretação quantitativa.

O tipo de inversão utilizado nesse trabalho é denominado inversão por suavização (*smooth inversion*), baseado no método matemático dos mínimos quadrados, que possui como objetivo minimizar a soma dos quadrados dos erros entre a resposta do modelo e as observações (LOKE; BARKER, 1996). A partir deste método, o programa reconhece a subsuperfície terrestre como blocos retangulares que possuem valores constantes para o parâmetro investigado a partir do ajustamento das medidas de campo.

Com a otimização, o modelo inicial é modificado de forma iterativa para reduzir a diferença entre os valores de resistividade medidos e calculados (LOKE, 2000). Essa diferença é demonstrada pelo RMS (Root Mean Squared, medida estatística comparável ao conceito de desvio padrão, expressa pela raiz quadrada da média aritmética das diferenças entre os dados medidos e os valores calculados, elevadas ao quadrado (LOKE; BARKER, 1996).

O modelo de inversão incorpora as informações de topografia inseridas, para cada uma das linhas, e os resultados finais são apresentados sob a forma de seções de resistividade em termos de distância *versus* profundidade, com escala gráfica logarítmica e intervalos de interpolação de valores de cor.

8.2.2 Modelos de visualização 3D

Após a inversão 2D, os dados de cada seção de resistividade foram exportados pelo programa Res2Dinv em arquivo *.dat* e reunidos em uma planilha única, com as coordenadas geográficas das leituras ao longo das linhas, a profundidade modelada pela inversão e o valor da resistividade elétrica como variáveis.

Esse arquivo foi importado no programa Oasis Montaj, da plataforma Geosoft, e os dados interpolados, com o uso do método estatístico da krigagem, para a geração de modelos de visualização 3D, numa rotina de etapa básicas adotadas em pesquisa mineral. Os produtos denominados "modelos de visualização 3D" neste estudo diferem dos modelos de inversão 3D legítimos, que utilizam técnicas de aquisição e de processamento específicos para este fim.

A interpolação consiste em um procedimento matemático que, baseado em uma malha amostral, busca o ajuste de uma função que melhor representa a área e os pontos não amostrados (LAM, 1983). A qualidade da resolução da malha de amostragem varia conforme o espaçamento entre os pontos de medição. Os dados são tabelados e modelados em termos bidimensionais e posteriormente interpolados em termos tridimensionais. Cada ponto do modelo 3D final é transformado num bloco, com dimensões condicionadas a critérios estatísticos e de malha amostral, ao qual é atribuído um valor para o parâmetro de resistividade aparente (MOON *et al.*, 2006).

O método da krigagem utilizado constitui um processo de estimativa, por médias móveis, de valores de variáveis distribuídas no espaço adjacente, a partir de valores amostrados. O método obedece aos critérios de não tendenciosidade, isto é, a diferença entre os valores estimados e observados deve ser nula para o mesmo ponto e variância mínima (LANDIM, 1998; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Posteriormente, foram gerados mapas de níveis para a variável resistividade, a partir da re-interpolação dos modelos de visualização 3D com aplicação do método da mínima curvatura. O algoritmo da mínima curvatura efetua cálculos de derivação repetidamente até que seja alcançada uma diferença entre os valores amostrados e os estimados, especificada pelo usuário, ou até que um número máximo de interações seja alcançado (LANDIM, 1998). Foram criados 8 mapas de níveis, a partir da cota 1289 m, com espaçamento entre níveis de 4 m.

9. RESULTADOS E DISCUSSÕES

9.1 Seções de resistividade

Nas seções de resistividade 1 a 14 (Figuras 24, 26 e 28), os eixos representam as extensões laterais das linhas e as cotas altimétricas, em metros. Em função da variação do comprimento das seções, foram adotados números ao longo do eixo horizontal que representam posições de estacas (eletrodos), a fim de auxiliar a referência espacial ao longo do texto. Os valores de resistividade são ilustrados em tonalidades variadas, em que as cores frias estão associadas a valores de baixa resistividade e as cores quentes indicam valores de alta resistividade. A escala gráfica foi padronizada para todas as seções de modo a facilitar a análise dos dados.

A profundidade atingida pelo estudo variou de 8 a 20 metros, a depender do comprimento de cada linha. No conjunto, foram obtidas medidas entre as cotas de 1289 e 1257 metros, o que foi suficiente para cobrir o maciço da barragem e porções do substrato rochoso subjacente.

A partir dos modelos de inversão, foi possível identificar zonas de alto contraste de resistividade em subsuperfície, com destaque para anomalias de baixa resistividade ($< 100 \Omega.m$), que no contexto do maciço, podem ter associação com a presença de infiltrações. Os valores são semelhantes aos obtidos por Al-Fares (2014), Lin *et al.* (2013) e Loperte *et al.* (2015) que verificaram anomalias de baixa resistividade em barragens de terra e interpretaram as mesmas como zonas saturadas. A seguir, foram descritas e detalhadas as seções de eletrorresistividade 1 a 14.

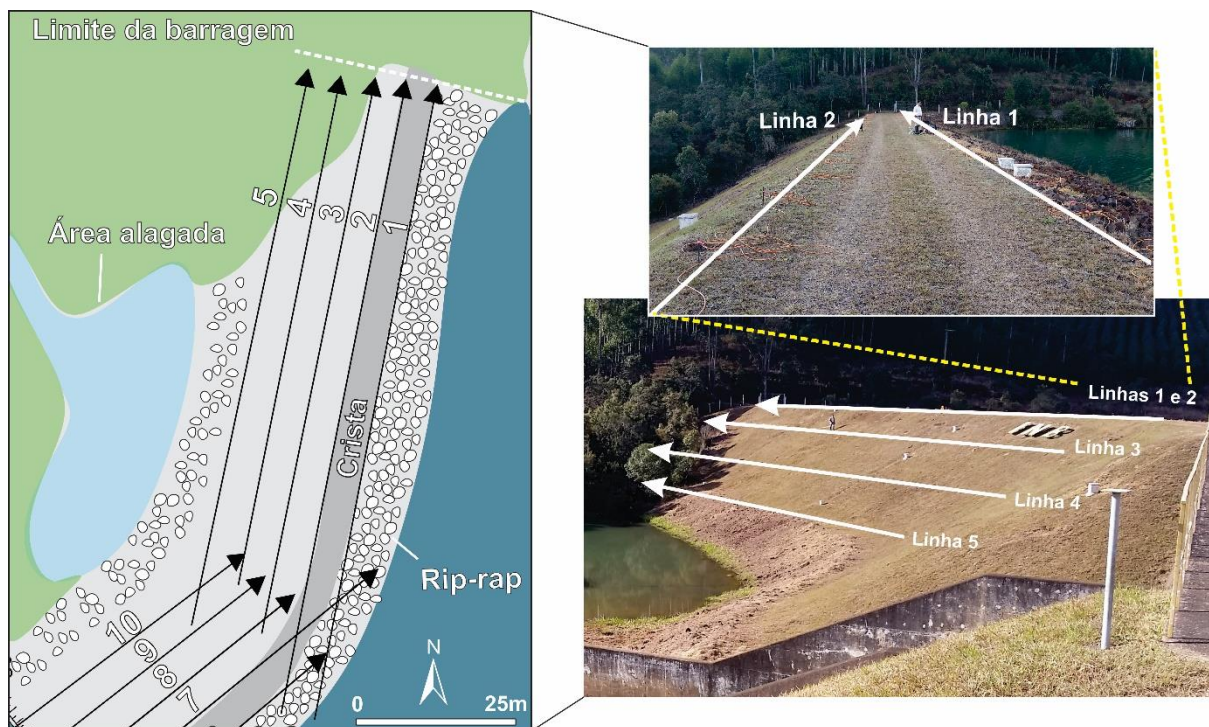
9.1.1 Seções de resistividade 1 a 5

As seções 1 a 5 correspondem à porção NNE da barragem e exibem, cada uma, um relevo relativamente plano (Figura 23). O comprimento dos perfis variou de 80 a 100 m, e a profundidade alcançada, de 15 a 20 m.

As seções 1 e 2 foram levantadas, em grande parte, na lateral da crista da barragem, e, em seus metros iniciais, na área do enrocamento de proteção do talude montante (*rip-rap*). As seções 3, 4 e 5 foram adquiridas ao longo do talude jusante.

Vale resultar que esse conjunto está posicionado adjacente à área alagada na parte frontal da barragem.

Figura 23 - Esquema das linhas geofísicas 1 a 5, na porção NNE da barragem Águas Claras, com fotografias de referência. As setas indicam o sentido do levantamento.



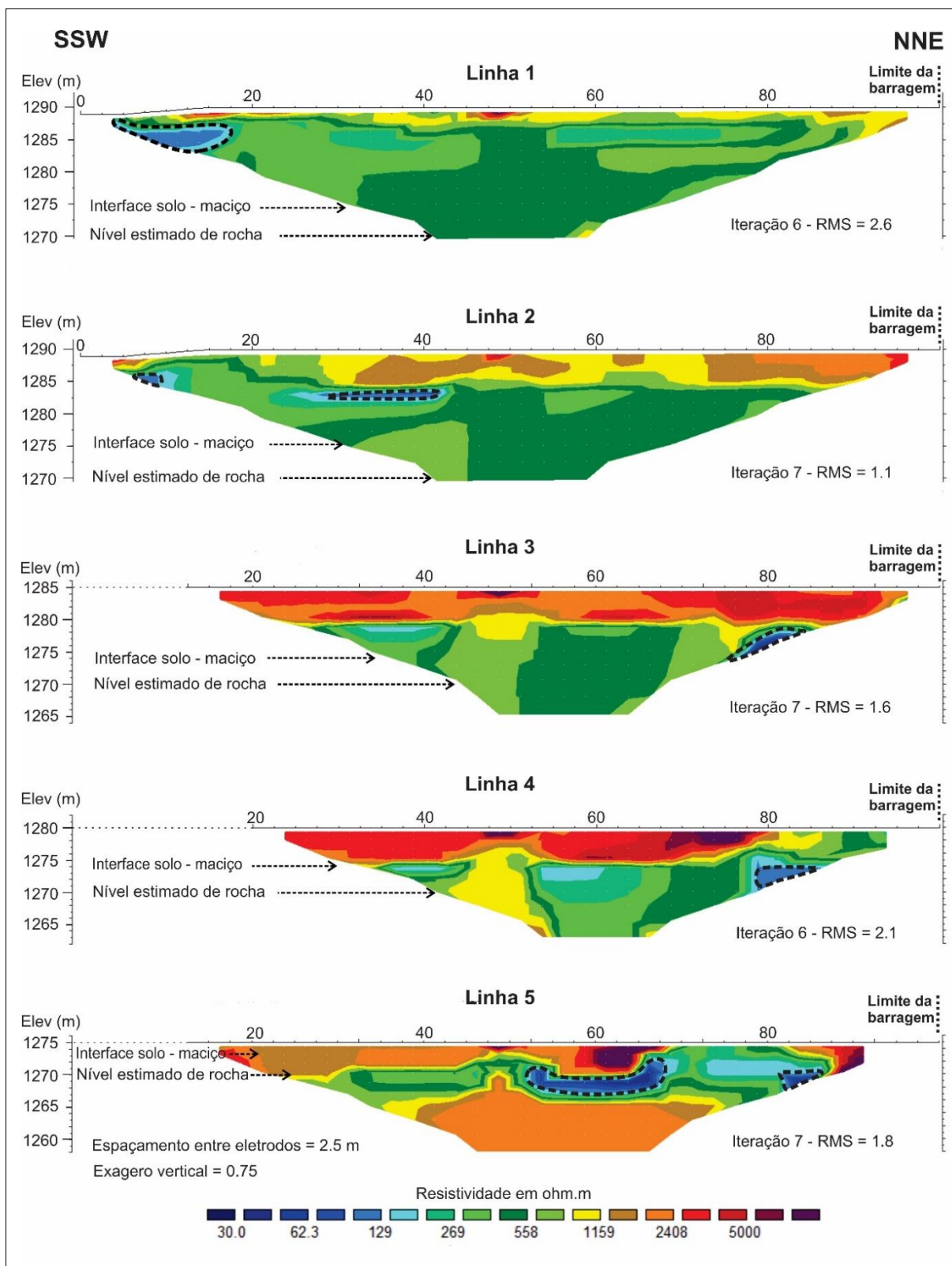
De forma geral, nas seções dessa região ocorrem valores médios a altos de resistividade ($200 \, \Omega \cdot m$ - $2.500 \, \Omega \cdot m$), com pontuais zonas de baixa resistividade ($30 \, \Omega \cdot m$ - $100 \, \Omega \cdot m$), que são destacadas na Figura 24.

Na seção 1 ocorre uma zona de baixa resistividade entre as estacas 0 e 20 m, região correspondente ao enrocamento do talude montante. Essa zona apresenta continuidade lateral em menor escala na seção 2 e sugere saturação do solo por infiltração nas proximidades do reservatório.

A seção 2 exhibe também, no interior do maciço, uma zona de baixa resistividade de pouca espessura (em torno de um metro) entre as estacas 20 e 40m, que aparece nas linhas 3 e 4 de forma mais discreta.

As seções 3 e 4 são bastante similares e apresentam uma zona de baixa resistividade na extremidade NNE, na interface solo-macijo, com continuidade até a seção 5. Esta última exhibe também uma marcante zona de baixa resistividade em sua porção central, de aproximadamente 3 metros de espessura, no nível estimado de rocha.

Figura 24 - Modelos de inversão de resistividade das linhas 1,2, 3, 4 e 5. As áreas tracejadas nas seções indicam zonas de baixa resistividade.



Esse conjunto de perfis intercepta o antigo caminho de fluxo do Rio das Antas, que foi desviado para a construção da estrutura, mas não há evidências de estruturas fluviais remanescentes que contribuam para a presença de zonas de baixa resistividade identificadas abaixo do maciço, nas porções centrais das seções 4 e 5. É plausível relacionar essas zonas a uma infiltração em profundidade provinda da própria área alagada adjacente ao pé do talude jusante, ou mesmo, à descarga do tapete drenante.

As zonas de baixa resistividade dos modelos 1 a 5 ocorrem, em sua grande maioria, nas bordas das seções. A interpretação dos resultados deve considerar a possibilidade destas zonas corresponderem a erros de processamento denominados “efeito de borda”, em especial quando apresentam poucos pontos de medida. Isso porque instabilidades no processo iterativo podem produzir valores muito baixos (ou altos) de resistividade nas bordas da seção ou na superfície. O aparecimento destes artefatos é muito comum e podem ocorrer mesmo em um modelo com R.M.S. baixo (MAIA; CASTILHO, 2006).

Nas seções levantadas sobre o talude jusante (linhas 3, 4 e 5), os níveis mais rasos exibem resistividades mais altas, o que sugere baixo teor de umidade em suas porções superficiais e efetividade dos elementos drenantes no interior da estrutura.

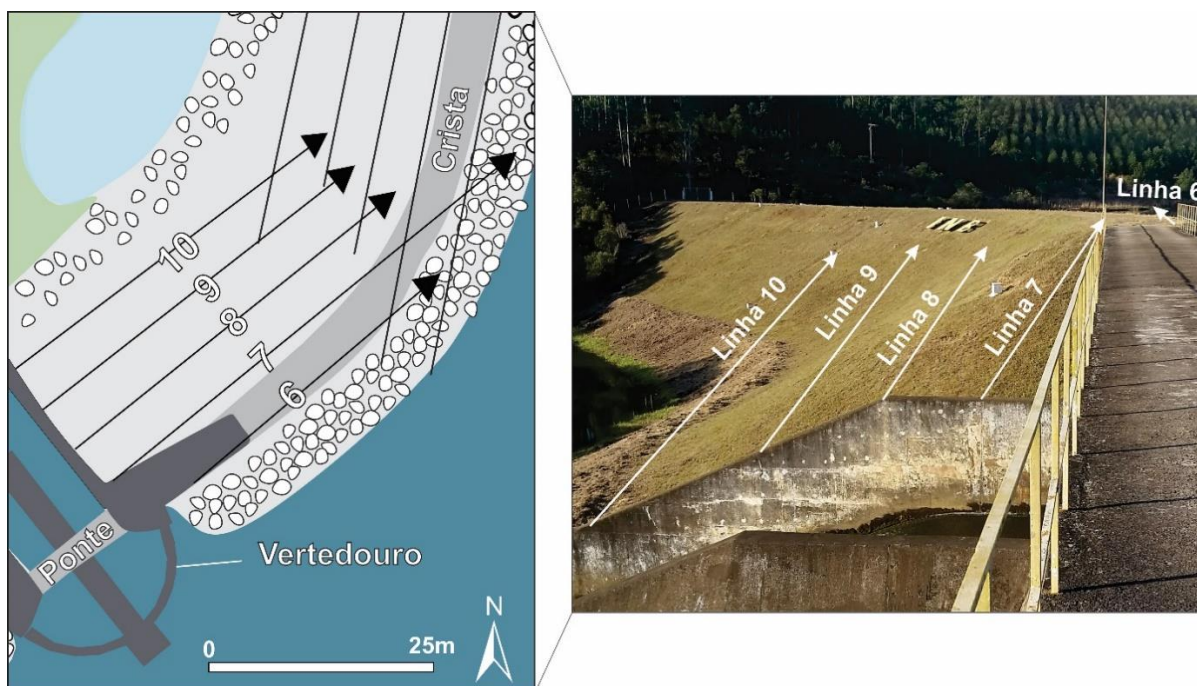
9.1.2 Seções de resistividade 6 a 10

As seções 6 a 10 correspondem à porção central da barragem e exibem um relevo mais acidentado, em especial nas áreas próximas ao vertedouro, na extremidade SW (Figura 25). O comprimento dos perfis variou de 35 a 60 m, e a profundidade alcançada, de 8 a 14 m.

A seção 6 foi levantada, em parte, na lateral da crista da barragem e, em seus metros finais, na zona de enrocamento do talude montante. A seção 7 compreende, em sua porção inicial, média e final, regiões do talude jusante, da crista e do enrocamento do talude montante, respectivamente. As seções 8, 9 e 10 foram levantadas ao longo do talude jusante, com início limitado no muro do canal de dissipação.

As seções desse conjunto exibem valores de resistividade predominantemente mais elevados (1.200 - 5.000 $\Omega.m$), com algumas zonas de baixa resistividade (30 $\Omega.m$ - 100 $\Omega.m$), destacadas na Figura 26.

Figura 25 - Esquema das linhas geofísicas 6 a 10, na porção central da barragem Águas Claras, com fotografia de referência. As setas indicam o sentido do levantamento.

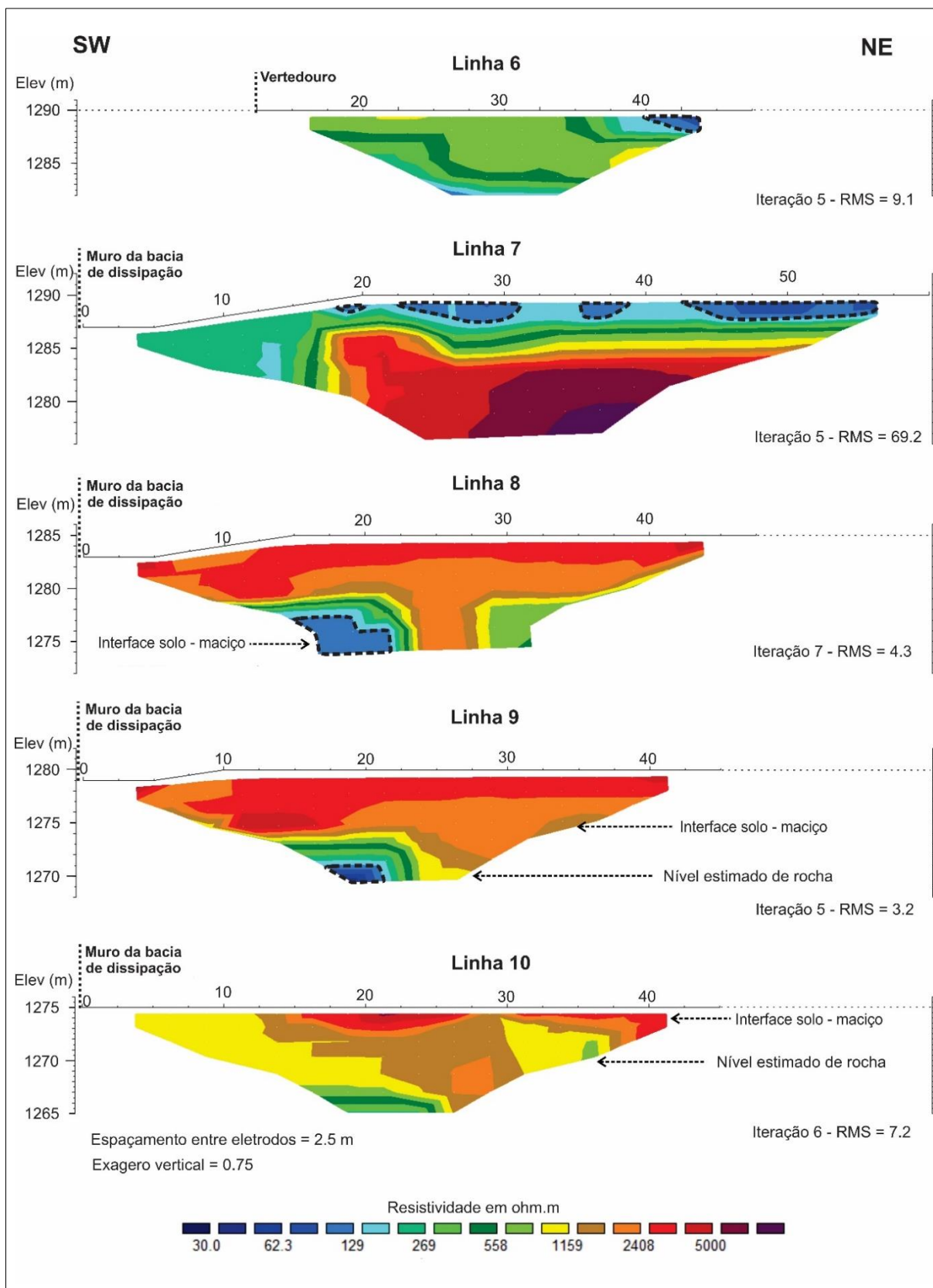


A seção 6 apresenta um padrão de resistividade média, e uma zona superficial de baixa resistividade em sua extremidade NE, região correspondente ao enrocamento do talude montante, assim como nas linhas 1 e 2. A seção 7 apresenta zonas contrastantes, com um nível superficial de baixa resistividade de aproximadamente 2 metros de espessura, que ocorre a partir da estaca 20 m até sua extremidade, e um nível subjacente com resistividades progressivamente maiores em profundidade.

A seção 8 exhibe predomínio de resistividades mais elevadas, além de uma zona de baixa resistividade na margem direita do canal de dissipação, entre os comprimentos de 15 m e 22 m, no nível da interface solo-maciço. Essa zona apresenta continuidade lateral na linha 9, no nível do substrato rochoso, e pode indicar uma região saturada na base do maciço. A seção 10, próxima ao pé do talude jusante, exhibe um padrão de valores de resistividades intermediários a altos.

Assim como no conjunto NNE, as seções levantadas no talude jusante (linhas 8, 9 e 10) apresentam camadas rasas mais resistivas, o que sugere solo seco em suas porções superficiais.

Figura 26 - Modelos de inversão de resistividade das linhas 6, 7, 8, 9 e 10. As áreas tracejadas nas seções indicam zonas de baixa resistividade.

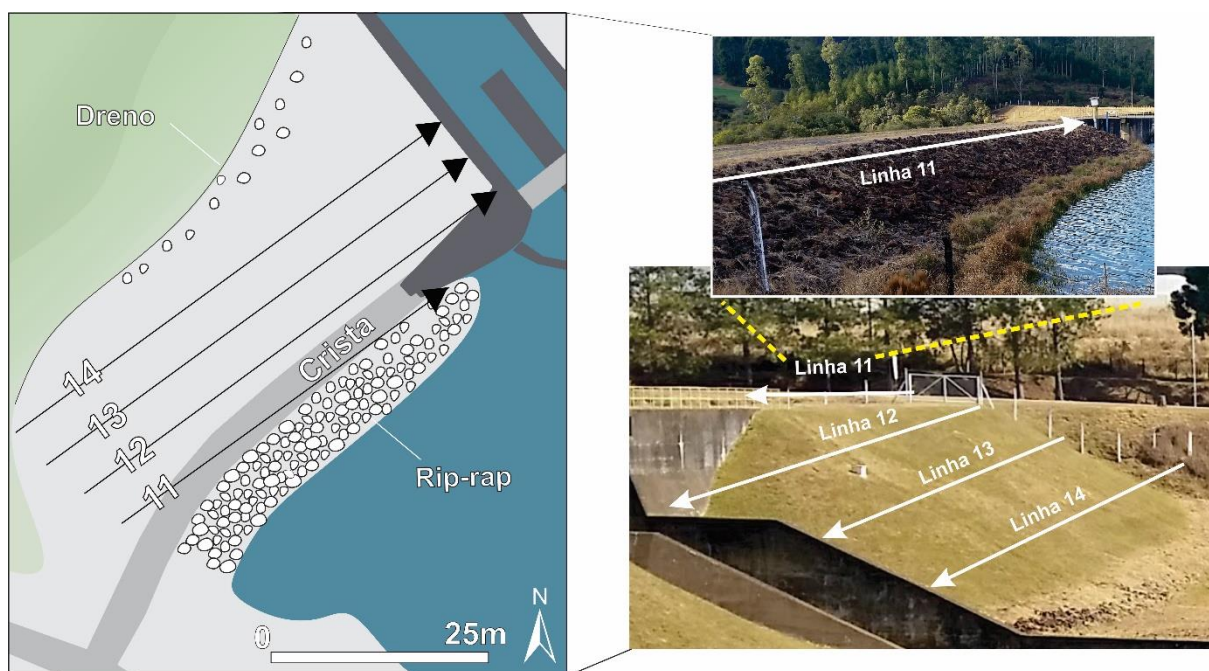


9.1.3 Seções de resistividade 11 a 14

As seções 11 a 14 correspondem à porção SW da barragem e também exibem um relevo acidentado, principalmente nas áreas próximas ao vertedouro (Figura 27). O comprimento dos perfis variou de 45 a 60 m, e a profundidade alcançada variou de 8 a 14 m.

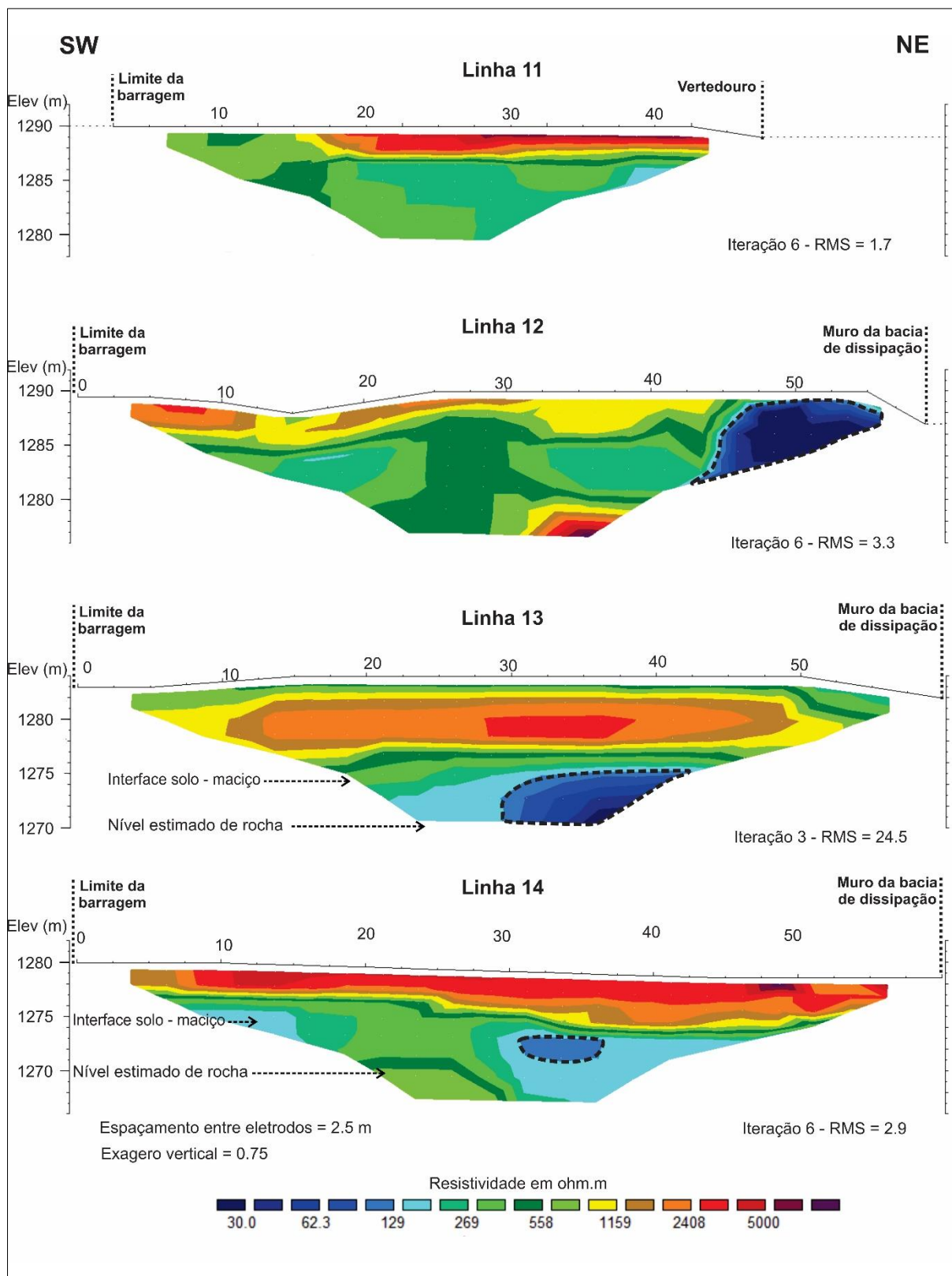
A linha 11 foi levantada, em seu início, na lateral da crista da barragem e, em sua maior parte, na zona superior do enrocamento do talude montante. As linhas 12, 13 e 14 foram levantadas no talude jusante e são limitadas, em suas extremidades finais, no muro do canal de dissipação.

Figura 27 - Esquema das linhas geofísicas 11 a 14, na porção SW da barragem Águas Claras, com fotografias de referência. As setas indicam o sentido do levantamento.



As seções exibem características semelhantes aos outros dois conjuntos, com resistividades predominantemente média a altas, níveis rasos, em geral, mais resistivos e presença de algumas zonas de baixa resistividade. Nessa porção SW, as zonas de baixa resistividade são mais marcantes e apresentam maiores dimensões (Figura 28).

Figura 28 - Modelos de inversão de resistividade das linhas 11,12, 13 e 14. As áreas tracejadas nas seções indicam zonas de baixa resistividade.



A seção 11 exibe predomínio de resistividades moderadas e um nível superficial mais resistivo (2.500 – 5.000 $\Omega.m$), com aproximadamente 2 metros de espessura. Esse nível pode estar relacionado à alta resistividade das rochas da porção superior do enrocamento.

A seção 12 apresenta uma expressiva zona de baixa resistividade nos últimos 20 metros do perfil, na margem esquerda do canal de dissipação, que atinge cerca de 6 metros de espessura desde a superfície. Nas seções 13 e 14 também ocorrem zonas marcantes de baixa resistividade entre as estacas de 30 e 40 m, no nível da fundação. Essas zonas podem indicar saturação das respectivas regiões nas proximidades do vertedouro, assim como nas linhas 8 e 9.

Com base no perfil construtivo da barragem, entre as cotas de 1290 e 1275 m, as áreas de resistividade média a alta (250 $\Omega.m$ – 5.000 $\Omega.m$) podem ser relacionadas ao maciço argiloso compactado não-saturado. As diferenças de resistividade desse intervalo no meio homogêneo do maciço são interpretadas como resposta à variação do teor de umidade e à presença e atuação dos elementos drenantes no interior da estrutura. À grosso modo, é possível observar uma tendência de aumento da resistividade no sentido da crista para jusante (tons evoluem de verde a vermelho)

As zonas de baixa resistividade ($< 100 \Omega.m$) ocorrem em porções superficiais dos perfis geofísicos levantados sobre o enrocamento (início das linhas 1 e 2 e fim das linhas 6 e 7), no interior do maciço argiloso compactado (linhas 2 e 12), e nos níveis do solo residual e substrato rochoso (linhas 3, 4, 8, 9, 13 e 14). Algumas zonas de baixa resistividade são observadas nas bordas das seções, com poucas medidas, e são consideradas pouco significativas. Zonas mais extensas ou em porções centrais do perfil podem indicar saturação.

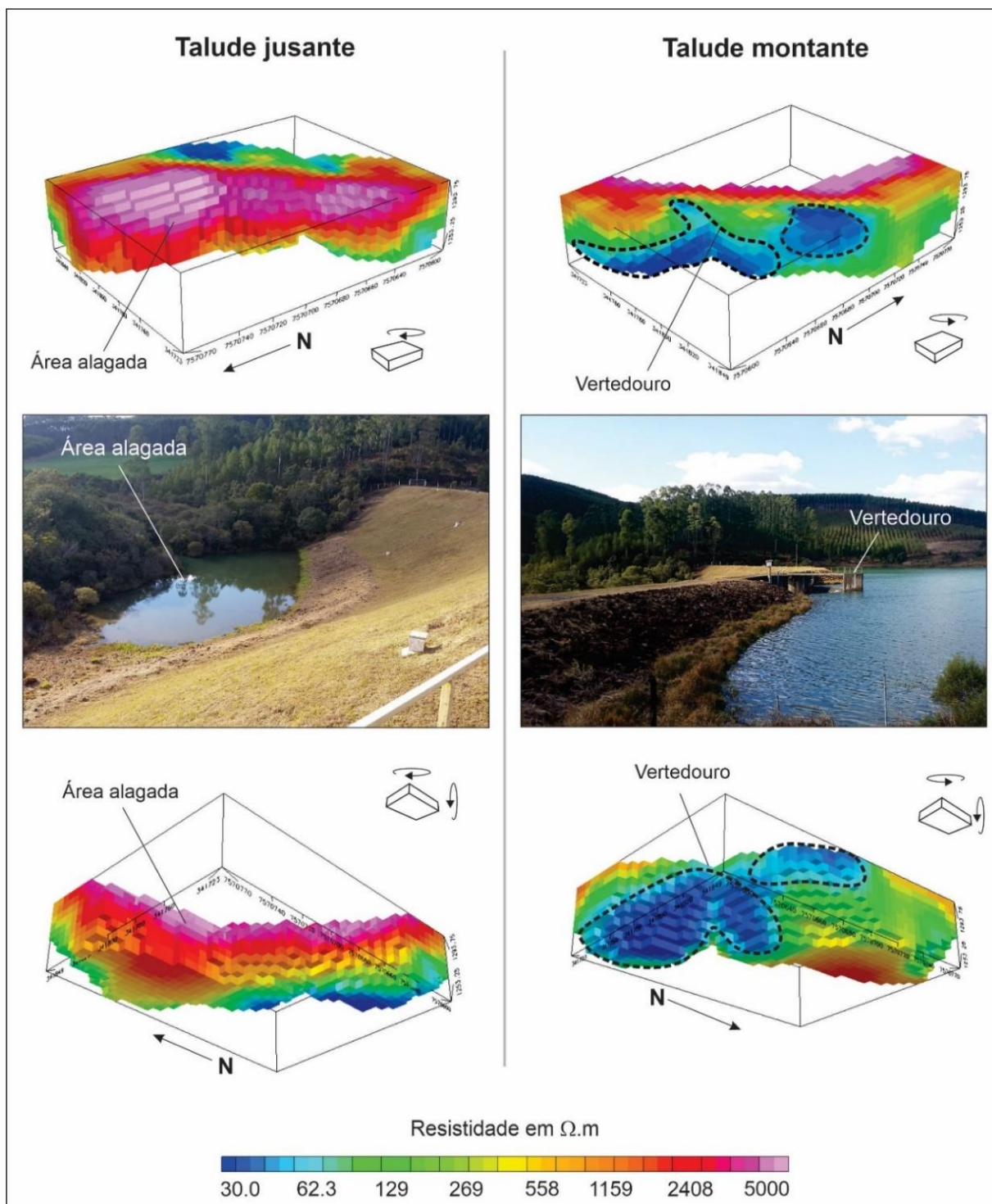
Essas zonas saturadas, a depender do volume, posicionamento e continuidade lateral, podem sugerir uma percolação regular com desempenho eficiente dos componentes drenantes ou mesmo uma infiltração irregular com potencial de desestabilizar a estrutura. Para essa visualização, os modelos tridimensionais são mais esclarecedores e serão apresentados a seguir.

9.2 Modelos de visualização 3D e mapas de níveis

Os produtos 3D (Figuras 29 e 30) deixam mais nítidas algumas percepções obtidas a partir dos modelos 2D. A Figura 29 apresenta quatro modelos de

visualização 3D com visões superior e inferior das porções externas dos taludes de jusante e montante.

Figura 29 – Modelos de visualização tridimensionais de resistividade

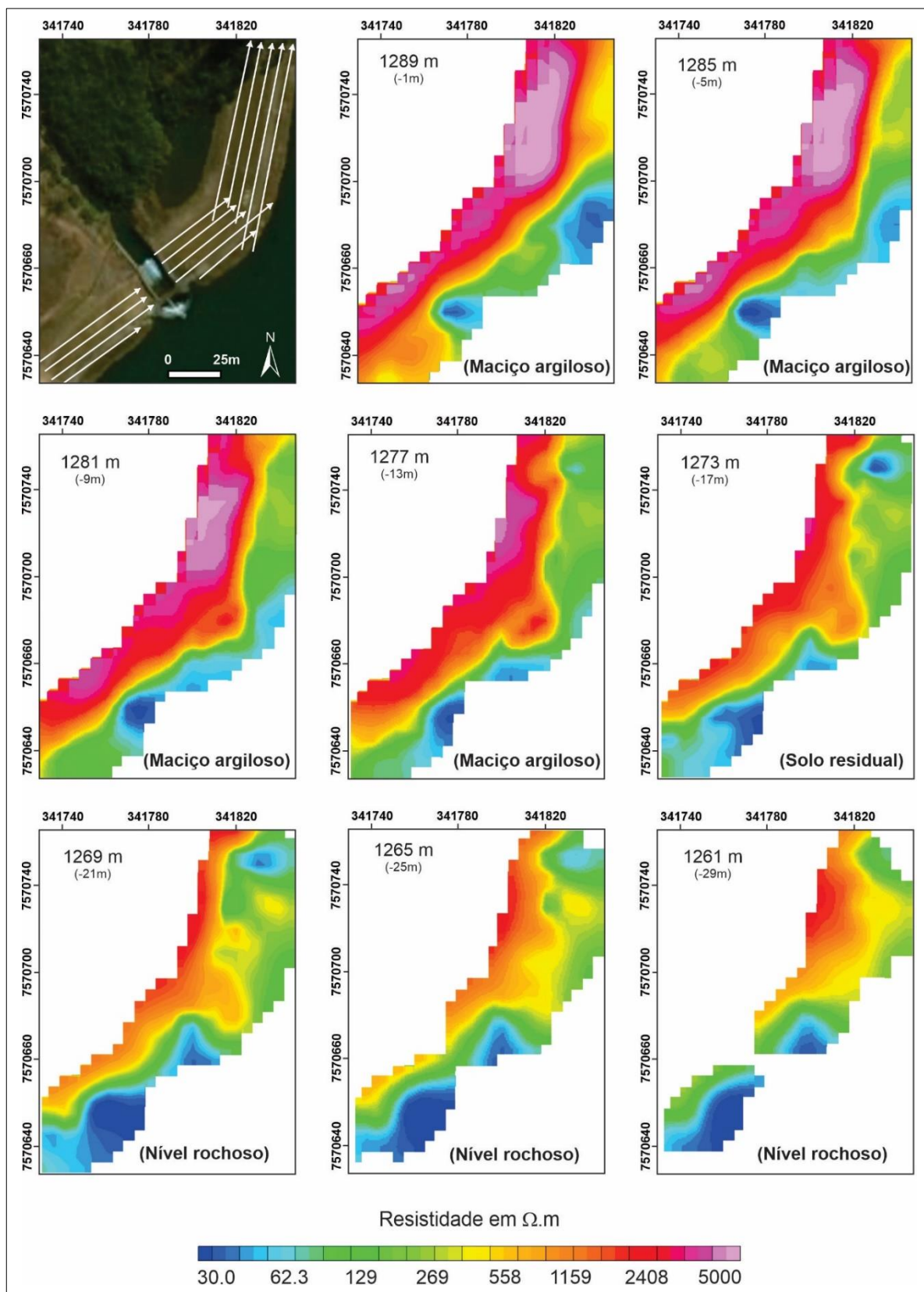


A visão frontal da seção jusante evidencia um padrão de resistividade mais elevado na porção externa no talude. Isso indica que o solo é seco nessa região e que infiltrações eventualmente existentes a partir da seção montante são controladas e direcionadas pelo sistema de filtros. Em relação à área alagada, os modelos de visualização não exibem indícios de contribuições por infiltrações anômalas em subsuperfície. O mais provável é que a descarga do sistema de drenagem corresponda a uma das maiores contribuições ao lago, que, desprovido de um sistema de escoamento, se mantém mesmo em épocas de seca. Além disso, nos modelos não são observados indicativos de saturação da base do talude jusante nas adjacências do lago.

A visão frontal externa do talude montante permite a delimitação de duas zonas principais de baixa resistividade que ocorrem, em especial, na porção central e SW da barragem (Figura 29). A zona da porção central apresenta menor dimensão, ocorre em níveis mais rasos e pode ser associada à saturação da região em razão da alta permeabilidade do sistema de proteção da seção montante (enrocamento), que está sujeito às variações do nível do reservatório. A zona da porção SW da barragem ocorre de forma mais extensa, tanto em nível do maciço argiloso, quanto no nível do solo residual e substrato rochoso, neste último com maior volume. Essa zona indica saturação do solo nas regiões próximas ao vertedouro e canal de dissipação, com tendência de aumento do volume em níveis mais profundos. A saturação em profundidade pode ser entendida como função da pressão exercida pela água armazenada na represa e da maior permeabilidade do substrato rochoso fraturado.

A Figura 30 apresenta mapas de níveis com cortes em oito profundidades diferentes gerados a partir do modelo tridimensional e permitem a visualização da distribuição da resistividade no interior do barramento. A eficiente atuação dos drenos, em especial do vertical, fica nítida pelo contraste abrupto de valores de resistividade (delimitado por uma linha amarela) nos níveis do maciço entre a crista e o início do talude jusante. Os mapas deixam claro a distinção entre o talude montante mais úmido e localmente saturados (tons esverdeados e azulados, respectivamente) e o talude jusante seco (tons avermelhados).

Figura 30 - Mapas de níveis com cortes em oito profundidades diferentes gerados a partir do modelo tridimensional e imagem de satélite com posições das linhas de referência.



Além das duas zonas de baixa resistividade principais observadas nos modelos tridimensionais, os mapas de níveis mostram outra anomalia de baixa resistividade de menor dimensão na extremidade NNE, nos níveis do solo residual e substrato rochoso, que corresponde às zonas observadas nas bordas das seções 3, 4 e 5 (Figura 24).

Algumas zonas de baixa resistividade situadas no interior da estrutura, como das seções 2 e 5 (Figura 24) não são representadas nos produtos 3D. Isso ocorre porque durante a interpolação dos dados, valores isolados podem ser suprimidos dos resultados, o que expõe uma das limitações do método. Assim, na análise para diagnóstico e tomada de decisão, os produtos 2D apresentam maior precisão e detalhamento, enquanto os produtos 3D fornecem maior compreensão da dinâmica dos processos atuantes.

Em relação à estabilidade da barragem, uma das considerações iniciais dizia respeito ao sistema de dreno afogado, que poderia ocasionar a saturação da base do barramento. Essa saturação, quando ocorre, tende a reduzir o atrito com o maciço rochoso sotoposto, o que, combinado com o esforço da massa de água acumulada na represa, pode resultar em movimentos rotacionais de base e deslizamento de talude. Outro risco associado seria a concentração de pressões neutras na fundação com tendência a tombar a estrutura.

Como abordado, os resultados mostram que não há saturação da base na região da área alagada na porção frontal do talude jusante. A zona identificada na seção de resistividade 5 é pontual e provavelmente relacionada à descarga do tapete drenante ou infiltração da água do lago. Além disso, há um fluxo mais discreto na região SW, que infiltra no substrato rochoso, mas não avança até o pé da seção jusante. Isso indica que os elementos drenantes, em especial os poços de alívio, têm controlado a direção e quantidade de fluxo sob a barragem também.

Embora não esteja esclarecido se a área alagada é uma feição planejada no projeto da barragem para desempenhar alguma função, o sistema de dreno afogado é utilizado em algumas obras para impedir o concrecionamento e obstrução de filtros, processo abordado nos trabalhos de Infanti; Kanji (1974); Guerra (1980) e Maciel Filho (1982). Em essência, o afogamento consiste em evitar a aeração e oxidação do filtro para que não haja desenvolvimento do processo de cimentação a partir da precipitação de substâncias químicas transportadas pela água. A obstrução do filtro

acarretaria em um aumento das pressões neutras e, em casos mais extremos, surgências no parâmetro de jusante (MACIEL FILHO, 1982).

Os resultados, por fim, indicam para um eficiente funcionamento do sistema de drenagem interno da barragem e não sugerem a existência de processos que desestabilizam a estrutura. No entanto, é recomendado um nível maior de atenção no monitoramento das zonas interpretadas como saturadas, em especial nas regiões próximas ao vertedouro. Esse monitoramento pode ser realizado com novas aquisições geofísicas, mas também é essencial a obtenção de dados geotécnicos e de instrumentação para complementar a análise.

10. CONCLUSÕES

O estudo foi constituído de um levantamento geofísico de detalhe, condicionado pelo curto espaçamento entre eletrodos e pela quantidade de linhas, com mais de 2.000 medidas obtidas em diferentes níveis de profundidade.

Os modelos de inversão 2D, processados a partir dos dados de campo, auxiliaram na identificação de zonas de baixa resistividade ($<100 \Omega.m$) e serviram de base para a geração de modelos de interpolação 3D, que exibiram bons resultados por efeito da densa malha amostral. Os produtos tridimensionais permitiram melhor visualização do volume, posicionamento e continuidade lateral das zonas de baixa resistividade, embora apresentem limitação em retratar o detalhamento dos modelos bidimensionais de resistividade.

Apesar dos produtos exibirem zonas de baixa resistividade e possível saturação em algumas porções da barragem, não é possível afirmar que a estrutura corre risco iminente de ruptura ou instabilidade por conta de percolação irregular. Os modelos de visualização 3D mostram uma clara distinção de resistividade entre o talude montante, com ocorrência de valores baixos e médios, e o talude jusante, com valores mais altos. Isso indica que a infiltração através do talude montante ocorre de forma controlada, é eficientemente drenada pelos filtros horizontal e vertical, e não atinge o talude jusante.

Na base da estrutura, próximo à área alagada, não há indícios de saturação ou fluxo anômalo. Ocorre apenas uma zona saturada pontual, provavelmente relacionada a descarga do tapete drenante e represamento por resquícios da ensecadeira originalmente utilizada na construção do barramento. Uma forma de manejo desta área alagada é, em primeiro lugar, a sua manutenção, uma vez que a feição tende a evitar o processo de cimentação na saída do sistema de filtro, e seu preenchimento com blocos de rochas, estrutura que permite tanto o fluxo de água proveniente do tapete drenante quanto um reforço adicional de estabilidade do talude jusante do barramento.

Os produtos apresentados, em especial as seções de resistividade, foram importantes para indicar as zonas saturadas como locais que demandam um nível maior de atenção durante o monitoramento geotécnico convencional. Nesse caso, nas regiões próximas ao vertedouro, que apresentam o maior volume das zonas de baixa

resistividade, existem quatro piezômetros instalados, cujos dados devem complementar o diagnóstico da estrutura.

Os resultados permitiram concluir que o método da eletrorresistividade foi eficiente para averiguar as condições de percolação de água na barragem de terra. Este estudo indica o potencial de uso da geofísica como procedimento adicional ao monitoramento tradicional, que utiliza a inspeção visual e instrumentos como piezômetros, marcos superficiais, marcos refletivos, inclinômetros, clinômetros entre outros. O método geofísico pode auxiliar, inclusive, na melhoria do monitoramento geotécnico ao, por exemplo, mapear caminhos de fluxo e indicar locais para instalação de poços.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEM, **Instruction Manual Terrameter LS**, Suécia, 122f. 2012.

ABUZEID, N. Investigation of channel seepage areas at the existing Kaffrein dam site Jordan using electrical-resistivity measurements. **Journal of Applied Geophysics**, vol. 32, p. 163-175, ago. 1994.

ADEWOYIN, O. O.; JOSHUA, E. O.; AKINYEMI, M. L.; OMEJE, M; JOEL, E.S. Application of 2D electrical resistivity imaging and cone penetration test to assess harzardous effect of near surface water on foundations in Lagos Nigeria. **Journal of Physics-Conference**, Kuala Lumpur, vol. 852, mai. 2017.

ALBERTI, H. L. C. **Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas impactadas pela drenagem ácida da mina de urânio – Osamu Utsumi, Planalto de Poços de Caldas (MG)**. 2017, 198 p. Tese (Doutorado em Geologia e Recursos Naturais) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2017.

AL-FARES, W. Application of Electrical Resistivity Tomography Technique for Characterizing Leakage Problem in Abu Baara Earth Dam, Syria. **International Journal of Geophysics**, 2014.

ALMEIDA FILHO, R.; PARADELLA, W.R. **Estudo do maciço alcalino de Poços de Caldas através de imagens Landsat com ênfase em mineralizações radioativas**. 1996, 143 p. Dissertação (Mestrado em Sensores Remotos e Aplicações) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 1977.

ALSAIGH, N.H., MOHAMMED, Z.S.; DAHHAM, M.S. Detection of water leakage from dams by self-potential method. **Engineering Geology**, vol. 37, n. 2, p. 115–121, jun. 1994.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de segurança de barragens 2018**. Brasília - DF, 225 p, 2019.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DO ÁGUAS. **Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem** – Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, Volume II. Brasília – DF. 218 p., 2016.

ANI, D.C.; AREWA, J.O. Electrical Resistivity Imaging of suspected seepage channels in an Earthen Dam in Zaria, North – Western Nigeria. **Open Journal of Applied Sciences**, vol. 3, n.1, p.145 – 154, mar. 2013.

BAKER, M. The Fontenelle Dam Incident: The Investigation, Likely Causes, and Lessons (Eventually) Learned. **ASDSO Annual Conference**. Washington, D.C.: Association of State Dam Safety Officials, 2011.

BALBI, D. A. F. **Metodologias para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens: estudo de caso – barragem de Peti/MG**. 2008. 336 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008.

BARNES, M. Famous Failures: Revisiting Major Dam Catastrophes. **ASDSO Annual Conference**. Baltimore: Association of State Dam Safety Officials, 1992.

BOLÈVE, A.; REVIL, A; JANOD, F.; MATTIUZZO, J.L.; FRY, J.-J. Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography. **Near Surface Geophysics**, vol. 7, n. 5, p.447–462, mar. 2009.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília - DF, 148p, 2002.

BRASIL. Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984**. Diário Oficial da União, Brasília, 20 set. 2010.

CARLSTEN, S.; JOHANSSON, S.; WORMA, A. Radar techniques for indicating internal erosion in embankment dams. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, p.143-156, 1995.

CARNEVALE, M.; HAGER, J. Combined ground penetrating radar and MASW surveys to locate dam seeps. *In: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (Sageep)*, 21, p. 997–1006, 2008.

CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. **Guia Básico de Segurança de Barragens. Núcleo regional de São Paulo**. Comissão regional de segurança de barragens, 1999, 77 p.

CHAPMAN, N.A.; MCKINLEY, I.G.; SHEA, M.E.; SMELLIE, J.A.T. **The Poços de Caldas Project: Summary and Implications for Radioactive Waste Management**. Uppsala, SKB-Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 147 p. (Poços de Caldas Project Series, Rep. 15), 1991.

CHO, I.K.; YOEM, J.Y. Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam. **Geophysics**, vol. 72, n. 2, p. 31–38, 2007.

CIGB. Small Dams Design, Surveillance and Rehabilitation: Petits Barrages Conception, Surveillance et Réhabilitation. **Bulletin 153 ICOLD**, 2011.

CIPRIANI, M. **Mitigação dos Impactos Sociais e Ambientais Decorrentes do Fechamento Definitivo de Minas de Urânio**. 2002, 332 p. Tese (Doutorado em Ciências). Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2002.

COLLISCHONN, W. **Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina-RS**. 1997, 193p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1997.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, W. B.; PEIXOTO, C. A. M. A evolução química das águas subterrâneas de Poços de Caldas – MG. **Revista Brasileira de Geociências**, vol 2, p 23-33, 1991.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T. **Geophysics for the mineral exploration geoscientist**. Perth, WA, Australia: Cambridge University Press, 2014.

DSO. **Prediction of Embankment Dam Breach Parameters – A Literature Review and Needs Assessment**. Dam Safety Office. Dam Safety Research Report. USA, 1998.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. **Geotechnical engineering of dams**. A.A. Balkema Publishers. London, UK, 2005.

FERNANDES, H. M.; FRANKLIN, M. R. Assessment of acid rock drainage pollutants release in the uranium mining site of Poços de Caldas – Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 54, p. 5-25, 2001.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. The statistics of embankment dam failures and accidents. **Canadian Geotechnical Journal**, v.37, p.1000–1024, 2000.

FRANKEL, M. O.; SANTOS, R. C.; LOUREIRO, F. E. V. P.; MUNIZ, W. S. Jazida de urânio no planalto de Poços de Caldas, Minas Gerais. *In*: DNPM. **Principais depósitos minerais do Brasil– Recursos Minerais Energéticos**. Brasília -DF, 1, cap.5, p. 89-103, 1985.

GAIOTO, N. **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento**. [S.l: s.n.], 2003.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa**. 2007, 234p. Tese (Doutorado em Recursos minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.

GEOMOTO SOFTWARE. RES2DINV, version 3.53, Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-square method - Geoelectrical Imaging 2-D & 3D, Geotomo Software, Penang, Malaysia, 2003.

GORSKY V.A.; GORSKY E. Contribuição à mineralogia e petrografia do planalto de Poços de Caldas. Rio de Janeiro, CNEN, **Boletim 13**, 1974.

GRIFFITHS, D.; BARKER, R. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. **Journal of Applied Geophysics**, v. 29, n. 3, p. 211–226, 1993.

GUERRA, M.O. Ação química e biológica na colmatação de filtros e drenos – implicações no comportamento da barragem do Rio Grande. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 13., Rio de Janeiro: 1980. v. II, 1980.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 4. ed. Wiley & Sons, Inc, 1993.

HICKEY, C.J.; DUDDU, L. Seismic refraction tomography of a small earth dam. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 122, 2007.

HOLLENKAMP, T.; GIESMANN, C.; FRERKING, M. Case History Summary: Taum Sauk Storage Dam Failure, Lessons Learned, and the Rebuild. **Canadian Dam Association Bulletin**, vol.22, p.16-25, 2011.

HUI, L.; HAITAO, M. Application of ground penetrating radar in dam body detection. **Procedia Engineering**, vol.26, p.1820 – 1826, 2011.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. *Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG*. 2016. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/recuperacao-ambiental/rompimento-da-barragem-de-fundao-desastre-da-samarco/documentos-relacionados-ao-desastre-da-samarco-em-mariana-mg>. Acesso em: 25 abr. 2020.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Rompimento de barragem da Vale em Brumadinho (MG) destruiu 269,84 hectares**. 2019. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/15392-rompimento-de-barragem-destruiu-269-hectares-em-brumadinho-mg.html>. Acesso em: 25 de abr. 2020.

ICOLD - International Commission on Large Dams. Dam failures statistical analysis. **Bulletin 099-1995**, (ICOLD), Paris, 1995.

IKARD, S.J; RITTGERS, J.; REVIL, A; MOONEY, M.A. Geophysical Investigation of Seepage Beneath an Earthen Dam. **Groundwater**, vol. 53, n.2, p. 238-250, 2015.

INFANTI, N.; KANJI, M. A. Considerações preliminares sobre fatores geoquímicos que afetam a segurança de barragens de terra. **Revista Construção Pesada**, 2º Congresso Internacional de Geologia de Engenharia, São Paulo, 1974.

JANSEN, R.B. **Dams and public safety**. U. S. Department of the Interior. U. S. Government Printing Office. Denver, 1980.

JIMÉNEZ-RUEDA, J.R.; NUNES, E.; MATTOS, J.T. Caracterização fisiográfica e morfoestrutural da Folha São José de Mipibu, RN. **Geociências**, São Paulo, vol.12, p.481-491, 1993.

JOHNSON, F. A.; ILLES, P. A classification of dam failures. **Water Power and Dam Construction**, vol. 28, n.12, p. 43-45, 1976.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to Geophysical Exploration**. 3. ed. London: Blackwell Science, 2002.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H.-J. **Environmental geology: Handbook of field methods and case studies**. Berlin: Springer, v. 1, 2008.

LAM, N. Spatial interpolation methods: a review. **The American Cartographer**, vol. 10, p. 129-149, 1983.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Editora UNESP, 1998.

LIN C.; HUNG, Y.; YU, H.; WU, P. Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography, **Journal of GeoEngineering**, vol. 8, n.2, p. 61- 70, 2013.

LOKE, M. H. 2000. **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys**. Report Geotomo LLC, Penang, Malaysia, 2000.

LOKE, M. H.; BAKER, R. D., Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. **Geophysical Prospecting**, v. 44, p. 131-152, 1996.

LOPERTE, A.; SOLDVIERI, F.; LAPENNA, V. Monte Cotugno Dam Monitoring by the Electrical Resistivity Tomography. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, vol. 8, n.11, p. 5346–5351, 2015.

LOPERTE, A.; SOLDVIERI, F.; PALOMBO, A.; SANTINI, F.; LAPENNA, V. An integrated geophysical approach for water infiltration detection and characterization at Monte Cotugno rock-fill Dam (southern Italy). **Engineering Geology**, vol. 211, p. 162-170, 2016.

LOPERTE, A.; BAVUSI, M.; CERVERIZZO, G.; LAPENNA, V.; SOLDVIERI, F. Ground Penetrating Radar in Dam Monitoring: The Test Case of Acerenza (Southern Italy). **International Journal of Geophysics**, vol. 2011, p.1-9, 2011.

MACIEL FILHO, C. L. **Estudo do processo geoquímico de obstrução de filtro de barragens**. 1983. Tese (Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983. doi:10.11606/T.44.1983.tde-26062015-142047. Acesso em: 2020-07-10.

MAIA, D.F.S; CASTILHO, G.P. Identificando e corrigindo erros de processamento em seções de resistividade elétrica de solos. *In: II Simpósio Brasileiro da SBGf – Natal*, 2006.

MARQUES FILHO, P. L; GERALDO, A. Barragens e Reservatórios. *In: OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A. Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE. Cap. 24. p. 397-418, 1998.

MASCARENHAS, F. C. B. **Modelação matemática de ondas provocadas por rupturas de barragens**. 1999. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1990.

MASSAD, F. **Obras de terra: Curso básico de Geotecnia**. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MC DANIEL, T.N.; BLAIR, H.K. Diversion during construction. *In: Design of small dams*. A Water Resources Technical Publication. 3. ed., 1987.

MILSOM, J.; ERIKSEN, A. **Field Geophysics: the geological field guide series**. 4. ed. John Wiley & Sons Ltda, 2011.

MINSLEY, B. J.; BURTON, B. L.; IKARD, S.; POWERS, M. H. **Geophysical investigations at Hidden Dam, Raymond**, California: Summary of fieldwork and data analysis. 2011. Open File Report 2010-1013. United States Geological Survey. 2011.

MIRANDA, A. N. **Inspeção e Segurança de Barragens**. Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil Agência Nacional de Águas, 2016.

MOON, C.J.; WHATELEY, M.E.G; EVANS, A.M. **Introduction to Mineral Exploration**. Backwell Publishing, Oxford, 2006.

MOORE, J.R.; BOLÈVE, A; SANDERS, J.; GLASER, S. 2011. Self-potential investigation of moraine dam seepage. **Journal of Applied Geophysics**, vol. 74, p. 277–286, 2011.

MOREIRA, F.R.S.; ALMEIDA-FILHO, R.; CÂMARA, G. Spatial analysis techniques applied to mineral prospecting: evaluation in the Poços de Caldas Plateau. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, p. 183-190, 2003.

MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. **Looking into the earth**: an introduction to geological geophysics. Nova York: Cambridge University Press, 2000.

MUSTAFA, S.R.; IBRAHIM, E. H.; ELAWADI, E.; METWALY, M.; AGAMI, N.A. Seismic refraction and resistivity imaging for assessment of groundwater seepage under a dam site, southwest of Saudi Arabia. **International Journal of the Physical Sciences**, vol. 7, n.48, p. 6230 – 6239, 2012.

NRC - National Research Council. **Safety of Existing Dams**. National Academic Press. Washington, D.C. USA, 1983.

NASCIMENTO, M. R. L. **Remoção e recuperação de urânio de águas ácidas de mina por resina de troca iônica**, 1998. 93p. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) – Departamento de Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1998.

NASSER, A. Investigation of channel seepage areas at the existing Kaffrein Dam site (Jordan) using electrical resistivity measurements. **Journal of Applied Geophysics** vol. 32, p. 163–175, 1994.

NUCLEBRÁS – EMPRESAS NUCLEARES BRASILEIRAS S.A. **Projeto básico - Captação de água**. Arranjo geral Barragem das Antas. 1979.

OH, Y. C.; JEONG, H. S.; LEE, Y. K.; SHON, H. Safety evaluation of rock-fill dam by seismic (MASW) and resistivity method. *In: 16th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, p. 1377 – 1386, 2003.

ORELLANA, E. **Prospección geoeletrica en corriente continua**. Madrid: Paraninfo, 1972.

OSAZUWA, I. B.; CHINEDU, A. D. Seismic refraction tomography imaging of high-permeability zones beneath an earthen dam, in Zaria area, Nigeria. **Journal of Applied Geophysics**, vol. 66, p. 44–58, 2008.

PANTHULU, T.V.; KRISHNAIAH, C.; SHIRKE, J.M. Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods. **Engineering Geology**, vol. 59, n. 3–4, p. 281–295, 2001.

PARISI, C.A. Jazidas de bauxita da região de Poços de Caldas, Minas Gerais – São Paulo. In Schobbenhaus C. & Coelho C.E.S. – coords. **Principais depósitos minerais do Brasil**. (Vol III), metais básicos não-ferrosos, ouro e alumínio, DNPM/CVRD, Brasília, pg. 661-666, 1988.

PENMAN, A.D. M.; SAXENA, K.R.; SHARMA, V.M. **Instrumentation, monitoring and surveillance – Embankment dams**. A A Balkema. Rotterdam, Netherlands, 1999.

PERINI, D. S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. 2009, 149p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de engenharia civil e ambiental da faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. 2. ed. UK, Oxford: John Wiley & Sons, 2011.

ROBINSON, E. S. **Basic Exploration Geophysics**. John Wiley & Sons Inc., 1988.

ROZYCKI, A; FONTICIELL, JMR; CUADRA, A. Detection and evaluation of horizontal fractures in Earth dams using self-potential method. **Eng Geol**, vol. 82, n. 3, p. 145–153, 2006.

SCHORSCHER, H. D.; SHEA., M.E. The regional geology of the Poços de Caldas alkaline complex: mineralogy and geochemistry of selected nepheline syenites and phonolites. **J. Geochem. Explor.** v. 45, p. 25-51, 1992.

SERAFIM, J.L. Safety of dams judged from failures. **Water Power and Dams Construction**, Londres, v. 1, n.12, p. 32- 35, dez. 1981.

SILVEIRA, J.F.A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo, ed. Oficina de textos, 2006.

SJÖDAHL, P.; DAHLIN, T.; JOHANSSON, S. Using the resistivity method for leakage detection in a blind test at the Røssvation embankment dam test facility in Norway.

Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 69, n.4, p.643-658, 2010.

SJÖDAHL, P., DAHLIN, T., JOHANSSON, S., LOKE, M.H. Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hallby embankment dam: **Journal of Applied Geophysics**, vol. 65, p. 155–164, 2008.

SOUZA, L.A.P; GANDOLFO, O. C. B; BLANCO, R. G. B; BIRELLI, C.A. Contribuição dos métodos geofísicos na construção e monitoramento de barragens. *In: III Congresso da Sociedade de Análise de Risco Latino Americana (SRA-LA)* - IPT – São Paulo, 2016.

SZYMANSKI, M. B. Tailings dams from the perspective of conventional dam engineering. *In: Canadian Dam Association Conference*, Canadá: Sudbury, Ontario, 1999.

TEIXEIRA, W. L. **Um estudo das condições de percolação e estabilidade em barragens de terra mediante métodos geofísicos: caso do dique de Sant Llorenç de Montgai – Espanha**. 2013. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2013.

TELFORD, W. M.W.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. 2. ed. London: Cambridge University Press, 1990.

TIPPLER, P. A. **Física: eletricidade, eletromagnetismo e ótica**. Vol 2. Ed Livros técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro, Brasil, 1999.

URÂNIO DO BRASIL S.A. **Síntese dos trabalhos – Gerência da Mina de Caldas**. Relatório Interno, Urânio do Brasil, Poços de Caldas-MG, 1988.

VANDENBERGE, D.; DUNCAN, J.; BRANDON, T. **Lessons Learned From Dam Failures**. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2011.

VERÓL, A. P. **Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013.