UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"Júlio de Mesquita Filho" Instituto de Geociências e Ciências Exatas Campus de Rio Claro

ERIKA JULIANA ALDANA ARCILA

DIAGNÓSTICO GEOFÍSICO PARA IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS DE FLUXO EM UMA BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE URÂNIO

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus 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

> Rio Claro-SP 2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"Júlio de Mesquita Filho" Instituto de Geociências e Ciências Exatas Campus de Rio Claro

ERIKA JULIANA ALDANA ARCILA

DIAGNÓSTICO GEOFÍSICO PARA IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS DE FLUXO EM UMA BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE URÂNIO

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus 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

> Rio Claro-SP 2020

A674d	Arcila, Erika Juliana Aldana Diagnóstico geofísico para identificação de zonas de fluxo em uma barragem de contenção de rejeitos de mineração de urânio / Erika Juliana Aldana Arcila Rio Claro, 2020 70 p. : il., fotos, mapas
	Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: Cesar Augusto Moreira
	1. Geofisica. 2. Barragem. 3. Rejeitos. 4. Eletrorresistividade. 5. Modelamento 3D. 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.

ERIKA JULIANA ALDANA ARCILA

DIAGNÓSTICO GEOFÍSICO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS DE FLUXO EM UMA BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE URÂNIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus 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

Comissão Examinadora:

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

Prof. Dr. Vagner Roberto Elis Departamento de Geofísica / Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas-USP, São Paulo

> Prof. Dr. Livia Portes Innocente Helene Departamento de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Fatec/Jahu, São Paulo

> > Conceito: Aprovada.

Rio Claro, SP, 20 de março de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares e amigos pelo grande apoio fornecido a mim durante este processo acadêmico, principalmente por acreditarem nas minhas capacidades e escolhas ao longo da minha vida, apesar da longa distância.

Ao meu orientador Prof. Dr. Cesar Augusto Moreira, pela confiança que me foi depositada mesmo sem que nos conhecêssemos pessoalmente antes do projeto, pela paciência, valiosos ensinamentos, tempo e dedicação. Sou grata por fazer parte desta instituição e pela oportunidade de conhecer este belo país.

Agradeço às Industrias Nucleares do Brasil - INB pela permissão, à gerência, engenheiros, estagiários e a cada uma das pessoas que fizeram parte da equipe de trabalho de campo e desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus colegas da Unesp e amigos que fiz neste caminho, pela ajuda, o apoio e os momentos compartilhados.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente e professores das disciplinas que cursei durante o mestrado pelo conhecimento e formação acadêmica adquiridos ao longo do curso.

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

RESUMO

Uma barragem de rejeitos é constituída por uma barreira física, cuja função é a acumulação de produtos residuais do processo industrial de beneficiamento mineiro. Os métodos de projeto para barragens de rejeitos diferem das barragens de retenção de água pela construção do barramento em diferentes etapas. Deste modo, os problemas de estabilidade em uma barragem são de grande importância, principalmente quando se trata de barragens construídas para armazenamento destes rejeitos de mineração, uma vez que a possibilidade de falhas não apenas ameaça a segurança das pessoas e da propriedade industrial, mas também pode causar impactos ambientais substanciais. No Estado de Minas Gerais, aproximadamente 30 km a sudoeste do município de Caldas, está localizada a Mina Osamu Utsumi de responsabilidade das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), a qual tem um sistema para contenção de rejeitos provenientes da exploração e processamento de urânio, atualmente desativado. O Sistema consiste em uma barragem de rocha e terra a qual apresenta a existência de surgências no maciço rochoso à jusante do barramento, cujo fluxo ocorre em sistema fraturado. O objetivo do trabalho é reconhecer possíveis zonas de fluxo no interior e na base da barragem por meio de um conjunto de ensaios geofísicos de eletrorresistividade adquiridos com a técnica de tomografia elétrica através de modelos de inversão 2D e modelamento 3D. Foram adquiridas 5 linhas de tomografia elétrica com espaçamento entre eletrodos de 6 m e o arranjo utilizado no estudo foi o Schlumberger. Os resultados são apresentados a partir de imagens geofísicas 2D e 3D com valores de resistividade elétrica medida e modelada, onde foi possível identificar uma zona de baixa resistividade cuja continuidade estrutural indica infiltração da água no maciço rochoso abaixo da barragem. Os resultados não mostraram evidências de piping no interior do barramento o qual diminui o risco na estabilidade geotécnica e integridade física da barragem.

Palavras-clave: barragem, rejeitos, geofísica, resistividade elétrica

ABSTRCT

A tailings dam is constituted by a barrier, whose function is the accumulation of residual products from the mining beneficiation industrial process. Project methods for tailings dams differ from water retention dams by the construction of the dam in different stages. Thus, the stability problems in a dam are of great importance, especially when it comes to dams built for the storage of these mining waste, since the possibility of failures not only threatens the safety of people and industrial property, but also cause negative and substantial effects to the local environment. The Osamu Utsumi uranium mine, administrated by the state company Industrias Nucleares do Brasil (INB), is located 30 km southwest of Caldas, in the State of Minas Gerais, and its contention system of tailings, generated by the exploration and processing of uranium ore, is currently out of operation. The system is composed of a rock-soil dam, which presents the existence of water upwellings downstream in the bedrock, with water flux confined in fractures. This research aims the recognition of possible flux zones into the base of the dam through geophysical surveys applying DC Resistivity, in addition to Electrical Resistivity Tomography technique in the generation of 2D inversion models and 3D modeling. The acquisition was composed of five lines of electrical resistivity tomography with 6 m of spacing between electrodes, using Schlumberger array. The results are presented by 2D and 3D geophysical models comprising measured and processed resistivity values. According to those models, it was possible to identify a low resistivity zone, whose structural continuity indicates water infiltration in the bedrock, right under the dam. Moreover, the results do not indicate pieces of evidence of piping process in the interior of the dam, reducing the risks related to the geotechnical stability and physical integrity of the construction.

Keywords: dam, tailings, geophysics, DC resistivity, 3D modeling

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da INB - Poços de Caldas (MG)	12
Figura 2 - Mapa Geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas	14
Figura 3 - Unidade de Tratamento de Minérios (UTM) - Poços de Caldas	16
Figura 4 - Localização da barragem para acumulação de rejeitos oriundos do processo de	
beneficiamento da UTM da INB - Poços de Caldas (MG)	18
Figura 5 - Esquema da seção transversal típica da barragem de rejeitos	19
Figura 6 - Detalhes da barragem de resíduos na UTM – INB	20
Figura 7 - Elementos básicos de uma barragem	24
Figura 8 - Tipos de barragens de terra	25
Figura 9 - Esquema de barragem de enrocamento	26
Figura 10 - Diagrama de construção de barragens de rejeito a montante	27
Figura 11 - Esquema de construção de barragens de rejeitos a jusante	28
Figura 12 - Diagrama de construção de barragens de rejeitos do tipo linha central	29
Figura 13 - Esquema de um deslizamento rotacional	32
Figura 14- Mecanismos de quebra na fundação de barragens de concreto	33
Figura 15-Mecanismos de quebra em barragens de terra devido a falhas de fundações	34
Figura 16-Modelo de erosão interna (piping) em uma barragem	36
Figura 17 - Diagrama do mecanismo de ruptura da barragem de rejeitos da mineração de	
Aznalcóllar	38
Figura 18 - Medição de resistência em um circuito elétrico simples e representação da Lei	de
Ohm	46
Figura 19 - Princípio da medição da resistividade com um arranjo de quatro eletrodos	48
Figura 20 - Arranjo de eletrodos para um levantamento elétrico em 2D e a sequência de mo	edições
usada para construir uma pseudo-seção	51
Figura 21 - Esquema do arranjo Schlumberger	53
Figura 22 - Esquema das linhas Geofísicas na área de estudo	54
Figura 23 - Trabalho de aquisição de dados em campo	55
Figura 24 - Modelos de inversão de tomografia elétrica 2D com realce das zonas de baixa	
resistividade	58
Figura 25 - Modelo de blocos 3D de tomografia elétrica, com diferentes perspectivas e real	lce das
zonas de baixa resistividade, com setas de sentido de fluxo	60
Figura 26 – Mapas de resistividade multinível a cada dez metros de profundidade	62

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	
2.	OBJETIVOS	
	2.1. Geral	
	2.2. Específicos	
3.	ÁREA DE ESTUDO	
	3.1. Localização	
	3.2. Aspetos fisiográficos	
	3.3. Contexto geológico regional	
	3.4. Unidade de Tratamento Minério (UTM) de Poços de Caldas	
	3.5. Barragem de Rejeitos da UTM	
	3.6. Histórico da produção de Urânio no Brasil	
4.	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS	
	4.1. Tipos de barragens e técnicas de construção	
	4.1.1. Barragens de concreto	
	4.1.2. Barragens de terra	
	4.1.3. Barragens de enrocamento	
	4.1.4. Barragens de rejeitos	
	4.2. Hidrogeologia de barragens	
	4.3. Problemas estruturais e monitoramento de barragens	
	4.4. Considerações ambientais na construção de barragens	
	4.5. Rejeitos	
	4.6. Aspecto Legal	
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	
	5.1. Métodos Geoelétricos	
	5.1.1. Método da Eletrorresistividade	
	5.2. Técnica da tomografia elétrica	50
	5.2.1. Arranjo de eletrodos	
6.	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTOS DE DADOS	
	6.1. Processamento de dados 2D e 3D	56
7.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	
8.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	64
9.	BIBLIOGRAFIA	

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A construção, operação e manutenção de barragens de rejeito são obras que envolvem algumas áreas de conhecimento como a engenharia e a geologia. Essas estruturas são projetadas para acumulação de produtos residuais do processo industrial de beneficiamento mineiro e exigem avaliação ambiental, técnicas de monitoramento e controle estrutural, uma vez que a possibilidade de falhas não apenas ameaça a segurança das pessoas e da propriedade industrial, mas também pode causar impactos ambientais negativos substanciais.

Os efeitos decorrentes de uma falha podem ser significativos e causar desastres de grande impacto socioambiental, como o ocorrido no Brasil, o dia 5 de novembro de 2015 com o rompimento da barragem de rejeitos do Fundão (Mineradora Samarco), localizada no distrito de Bento Rodrigues, a 35km do centro do município de Mariana, no estado de Minas Gerais. O rompimento liberou cerca de 34 milhões de metros cúbicos de rejeito oriundo do beneficiamento de minério de ferro, o que causou a morte de 19 pessoas e devastação de comunidades e 1.469 ha de vegetação, um rastro de destruição ao longo de 663,2 km de cursos de água (IBAMA, 2017).

Outro evento análogo ocorreu no dia 25 de janeiro de 2019, com o rompimento da barragem da Vale na mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, estado de Mina Gerais, que causou a morte de 166 pessoas, a destruição de 133,27 ha de vegetação nativa de Mata Atlântica e 70,65 hectares de Áreas de Preservação Permanente (APP) ao longo de cursos d'água. Tal fato, tido até o presente momento como o maior desastre socioambiental do país no setor da mineração (IBAMA, 2019).

Muitos dos acidentes relacionados às barragens estão associados a problemas de infiltração e erosão interna da terra, fenômenos também conhecidos como *piping*, considerado um dos principais problemas decorrentes do rompimento dessas estruturas. Este tipo de erosão pode ser resultado de diferentes causas, tais como construção de barragens em solos permeáveis e argilas dispersivas, uso de materiais inadequados ou defeituosos, condições climáticas atípicas, presença de animais escavadores de solo, como roedores e coelhos que constroem galerias no ambiente edáfico e, como consequência, podem gerar rachaduras no barramento. Este fato pode permitir o escoamento de água no interior do barramento e o desenvolvimento de dutos subterrâneos, que em determinado momento, podem acelerar o processo de erosão interna da estrutura (LEWIS, 2014).

Dada a variedade de problemas que resultam em instabilidades, a legislação ambiental brasileira, por meio da Lei nº 12.334 / 2010, apresenta a Política Nacional de Segurança de Barragens, a qual estabelece a condição que visa manter a integridade estrutural e operacional da barragem e, a preservação da vida, saúde, propriedade industrial e meio ambiente (IBAMA, 2017). Deste modo, e com base na magnitude dos acidentes registrados, o governo federal induziu um aumento na supervisão das barragens de rejeitos por parte das empresas responsáveis, o que levou à manutenção e monitoramento constantes.

O custo dos equipamentos de monitoramento pode ser relativamente alto, contudo, os métodos geofísicos são ferramentas constituídas por técnicas indiretas de rastreamento em subsuperfície, não invasivos e, portanto, não destrutivos e de baixo custo, amplamente utilizadas para a investigação de estruturas geológicas, analises das características mecânicas de solos e rochas, e de grande importância para reconhecer contatos entre os materiais de revestimento e o substrato rochoso, entre aterros artificiais e terrenos naturais, para delimitar a posição dos níveis das águas subterrâneas, etc. Portanto, são ferramentas práticas que permitem monitorar e entender os fenômenos que influenciam os problemas decorrentes da existência de barragens (MUSSETT & KHAN, 2000; MILSOM & ERIKSEN, 2011).

Com base no parâmetro físico a ser determinando, os métodos de controle e monitoramento deste tipo de estrutura são divididos em duas classes: diretos e indiretos. O primeiro caso abrange poços de monitoramento e piezômetros, cujas funções são baseadas na descrição do solo local, determinação de pressão hidrostática no interior do barramento e o nível da água subterrânea. Por outro lado as formas indiretas de analises englobam os métodos sísmicos, elétricos e radioativos e permitem a obtenção de informações sobre características hidrogeológicas, estruturais e litológicas em subsuperficie (INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA,1987).

No Estado de Minas Gerais, a aproximadamente 30 km a sudoeste do município de Caldas, está localizada a Mina Osamu Utsumi de responsabilidade das Indústrias Nucleares do Brasil (INB). A unidade possui uma barragem de rocha e terra que armazena rejeitos provenientes da exploração e processamento de minério de urânio, a qual apresenta a existência de surgências no maciço rochoso à jusante do barramento. Deste modo, a relação da zona de surgencia com a barragem será o principal objeto de estudo neste trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Reconhecimento de possíveis zonas de fluxo hidrológico em uma barragem de terra e rocha que retém rejeitos de mineração de urânio e apresenta uma zona de surgência a jusante do barramento, por meio de investigação geofísica.

2.2. Específicos

- ✓ Estudar a relação da surgência reconhecida em superfície com a barragem, a partir de estudos estruturais prévios na zona de fratura e levantamento geofísico no barramento.
- Avaliar a eficácia da técnica de tomografia elétrica no reconhecimento de eventuais zonas de fluxo no interior e base da barragem

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização

A área de estudo está localizada nas dependências das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), Unidade de Tratamento de Minérios (UTM), antigamente conhecida como Complexo Industrial de Poços de Caldas (CIPC) na região sudoeste do estado de Minas Gerais, com uma área de aproximadamente 18 km². O planalto de Poços de Caldas corresponde a uma estrutura vulcânica alcalina (caldeira) e abrange parte dos municípios de Poços de Caldas, Caldas, Andradas e Águas de Prata (Figura 1).



Figura 1 - Localização da INB - Poços de Caldas (MG)

Fonte: Modificado de Goggle Earth (2018)

3.2. Aspetos fisiográficos

O planalto possui uma forma circular com aproximadamente 35 km de diâmetro com altitude média em seu interior de 1.300 m, enquanto que a região circundante não ultrapassa 800 m. Ao entorno da intrusão alcalina e como parte dela, existe um anel de montanhas que constitui

um dique anelar, cujas altitudes variam entre 1.500 m a 1.700 m (FRAENKEL, et al; 1985).

A região apresenta um clima tropical de altitude, com uma estação chuvosa, de outubro a março, e uma estação de estiagem de março a setembro. A precipitação média anual é de 1700 mm e 82% da precipitação ocorre no período chuvoso. A média anual das temperaturas mínimas e máximas é de 7,5 °C e 25,9 °C, respectivamente (FRANKLIN, 2007; FRAENKEL et al., 1985).

Os rios da região pertencem ao sistema de afluentes da margem esquerda do Rio Pardo, tributário do Rio Grande. Seus cursos de água são constituídos e alimentados apenas pelas precipitações pluviométricas, formando dois sistemas de drenagens, respectivamente o do Rio dos Antas e o do Rio Verde. O primeiro drena 75% da área do Planalto, represado antes de atravessar a cidade de Poços de Caldas (Represa Saturnino de Brito) e antes de precipitar encosta abaixo ao noroeste (Represa Bortolan). A mina de urânio da UTM, está localizada no divisor de águas entre os dois sistemas de drenagem (FRAENKEL et al., 1985).

3.3. Contexto geológico regional

O Complexo Alcalino de Poços de Caldas está situado entre a Bacia Sedimentar do Paraná e a Serra da Mantiqueira, região sudeste do Brasil e limite entre os estados de Minas Gerais e São Paulo. A suíte alcalina é intrusiva em rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino constituídas, na área, por biotita-gnaises, passando localmente a anatexitos, e frequentes diques de dolerito. Em escala mundial, constitui um dos maiores complexos alcalinos conhecidos (FRAENKEL et al., 1985).

O referido maciço alcalino de Poços de Caldas corresponde a uma estrutura vulcânica circular cuja formação ocorreu no Cretáceo superior (87 Ma) e evoluiu em fases sucessivas até 60 Ma. A atividade ígneo-policíclica, de natureza alcalina desenvolvida na região, inclui processos metassomáticos intensos e um forte intemperismo, que deu origem a vários tipos litológicos.

Sua constituição é dada por rochas extrusivas, tufos e brechas vulcânicas aos quais sucederam nefelina sienitos, tinguaitos, fioaitos e fonolitos e posteriormente formação de diques anelares e intrusões de lujaurito, chibinito e fioaítos seguidas de forte atividade hidrotermal (Figura 2). Tal atividade tardia ou pós-magmática inclui brechação tuficítica e ação de águas termais, culminando em intensa erosão e forte intemperismo (FRAENKEL et al., 1985).

Tais tipos litológicos são divididos em três grupos principais: (i) brechas, tufos e aglomerados – formada na maior parte por tinguaítos; (ii) rochas efusivas e hipoabissais – fonólitos e tinguaítos e (iii) rochas plutônicas – são constituídas por foiaitos e ocorrem como encaixantes paras efusivas e hipoabissais. Outro aspecto litológico importante é a existência de uma "rocha potássica", resultante da alteração por processos hidrotermais e de intemperismo do tinguaíto, a qual constitui importante controle das mineralizações uraníferas na Mina Otsamu Utsumi (CAPONI, 2017; FRAENKEL et al., 1985).

Pelas suas dimensões, variedades petrográficas e riqueza mineral, o Complexo Alcalino de poços de Caldas é um dos mais notáveis do mundo. Esta atividade ígneo-policíclica, de natureza alcalina, processos metassomáticos intensos e forte intemperismo, deu origem a vários tipos litológicos e mineralizações de interesse econômico, como é o caso de minérios do tipo urano-molibdenífero, zírcono-uranífero, zirconífero, além da formação de bauxitas. Do mesmo modo, na porção central da caldeira o intenso metassomatismo potássico deu origem a rochas fortemente alteradas.



Figura 2 - Mapa Geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas

Figura 16: Mapa geológico do Planalto de Poços de Caldas (CAPONI, 2017).

No tocante à Mina Osamu Utsumi, também denominada de jazida do campo do Cercado, é localizada dentro de uma zona afetada pelos processos de reativação vulcânica ocorridos durante a colocação do maciço. A mina cobre uma área de aproximadamente 2,5 km², está geologicamente localizada na borda de uma intrusão sienítica secundaria e foi dividida em três unidades mineralizadas com corpos de minério designados de A, B e E.

O corpo A e E constituem uma unidade litológica homogênea, pertencendo provavelmente à parte interna de um dos "cones" vulcânicos secundários, sendo sua litologia composta por tinguaítos e fonolitos (Figura 2). Por sua vez o corpo E constituía um pacote de rochas encaixantes não brechadas onde são encontradas expressivas reconcentrações secundárias de urânio. O corpo B, externo ao "cone" é composto por um acúmulo de rochas piroclásticas e a parte inferior do corpo tem como contato uma intrusão foiaítica, cujo *emplacement* foi dado num período posterior ao abatimento da caldeira e foi o responsável, não só pelo soerguimento do quadrante sudeste do planalto, mas também pelo transporte dos agentes mineralizantes. O urânio na jazida do Cercado ocorre principalmente sob a forma de uraninita. O óxido apresenta pureza elevada, embora contenha como impurezas o chumbo (\pm 1%), tório (2%), zinco e ferro (traços) (CIPRIANI, 2002; FRAENKEL et al., 1985).

3.4. Unidade de Tratamento Minério (UTM) de Poços de Caldas

Em termos de atividade industrial, a Unidade de Tratamento de Minérios (UTM) de Poço de Caldas, foi dividida em três áreas (Figura 3): extração de minério (mina de urânio), beneficiamento físico e químico e disposição final dos residuos gerados, local que abrange a barragem de rejeitos e onde os estudos foram realizados (FRANKLIN, 2007):

- A) Mina Osamu Utsumi: foi nomeada em homenagem póstuma a um dos geólogos pioneiros na prospecção de urânio em Poços de Caldas. O tipo de lavra adotado foi a céu aberto e a cava gerada, de forma aproximadamente circular, possui um diâmetro de 1200 m com uma profundidade máxima de 200 m.
- B) Beneficiamento físico e químico: na unidade de beneficiamento físico, o minério era submetido às etapas de britagem (primária e secundária), moagem e espessamento, com

o objetivo de reduzir a granulometria do minério a 800 μm e obter uma polpa neutra adequada ao transporte, através de dutos, para a planta. Posteriormente, a polpa mineral era submetida a um processo químico para a produção de concentrado de urânio, na forma de diuranato de amônio – DUA (*yellow cake*), a partir do qual se obtém, em fase posterior, o elemento combustível para os reatores nucleares.

C) Rejeitos: Nesta etapa era realizado o lançamento da polpa de baixo teor para decantação de partículas e reaproveitamento de água no beneficiamento.



Figura 3 - Unidade de Tratamento de Minérios (UTM) - Poços de Caldas

Fonte: Modificado de Google Earth (2018). A). Mina de urânio Osamu Utsumi; B). Beneficiamento Físico e Químico; C). Barragem de rejeitos (área de estudos).

3.5. Barragem de Rejeitos da UTM

Conforme foi mencionado anteriormente o Complexo Industrial de Poços de Caldas - CIPC, agora denominado Unidade de Tratamento de Minério (UTM), produziu de 1982 a 1995, 1.170 toneladas de diuranato de amônio (*yellow cake*). O processo de beneficiamento do minério de urânio consistia na adição de um oxidante ao minério, para a posterior lixiviação com ácido sulfúrico. Em seguida o urânio era extraído da solução líquida por meio de um solvente orgânico e precipitado com amônia. O processamento químico gerava enormes quantidades de resíduos sólidos e líquidos que eram neutralizados pela adição de carbonato de cálcio e óxido de cálcio até pH 9 e depois descartados no reservatório para deposição (OLIVEIRA, 2010).

O referido sistema de barragens para contenção de rejeitos está localizado na porção sudeste da mina e conta com uma capacidade de volume real de 1 milhão de m³ (Figura 4), distribuído em uma área de 29,2 ha. Estima-se que 4,8 TBq (130 Ci) de ²³⁸U, 15 TBq (405 Ci) de ²²⁶Ra e 4,2 TBq (112 Ci) de ²²⁸Ra foram descartados neste reservatório (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2015). O local do barramento faz parte da bacia do rio Soberbo, a qual recebe o efluente da barragem de rejeitos após o devido tratamento, contígua à bacia do rio das Antas, sendo separado desta por uma sela topográfica, que se constitui o divisor natural das águas no local.

Segundo o projeto executivo da barragem de rejeitos da Mina Osamu Utsumi, exposto pela INB e as observações feitas pela equipe de trabalho da Unesp, neste capítulo são apresentadas as características estruturais da referida construção.

O sistema para deposição dos resíduos sólidos e líquidos provenientes da exploração e processamento de minério de urânio é composto por uma barragem de terra e rocha. O barramento possui eixo curvo e sua concavidade é voltada para jusante, com raio de 380 m, e um comprimento de 435 m, além de crista na cota 1.310 m. O corpo da estrutura é constituído por enrocamento compactado de 42 m de altura máxima que armazena $1,97 \times 10^6$ m³ de rejeitos (Figura 4). Possui ainda núcleo argiloso inclinado para montante, dois níveis de construção visíveis a jusante e monitoramento através de 20 piezômetros do tipo Casagrande, localizados no núcleo argiloso de montante, estando um deles inoperante e 23 piezômetros pneumáticos para a resposta rápida da poropressão gerada, sendo 9 no núcleo argiloso, 2 no tapete drenante e 12 na fundação, estando todos inoperantes.

Figura 4 - Localização da barragem para acumulação de rejeitos oriundos do processo de beneficiamento da UTM da INB - Poços de Caldas (MG)



Fonte: Modificado de Google Earth (2018)

A barragem como um todo possui um sistema de drenagem interna dotado de filtros e transições (areia e brita) entre o núcleo argiloso e o enrocamento, conectados a um tapete de drenagem horizontal, conforme indica a Figura 5. As transições têm a finalidade de impedir a passagem dos materiais mais finos através dos de maior diâmetro e, o tapete drenante visa a captação da água percolada na barragem e fundação da estrutura para a água não atravessar o corpo do barramento.

O vertedouro da barragem foi inicialmente construído conforme uma estrutura do tipo tulipa, conectada a uma galeria de concreto, apoiada na ombreira direita, tanto no trecho subhorizontal (sob o maciço da barragem) quanto no trecho subvertical, assentado sobre a encosta e de acordo com a topografia original. A transposição das águas para jusante é feita por meio de tubos de concreto com escoamento livre. Porém, em maio de 2019 foi construído um novo vertedouro à céu aberto seguido pela desativação do antigo sistema.



Figura 5 - Esquema da seção transversal típica da barragem de rejeitos

Fonte: Modificado de projeto executivo da barragem de rejeitos da Mina Osamu Utsumi (INB, 2012)

O vertedouro da barragem foi inicialmente construído conforme uma estrutura do tipo tulipa, conectada a uma galeria de concreto, apoiada na ombreira direita, tanto no trecho subhorizontal (sob o maciço da barragem) quanto no trecho subvertical, assentado sobre a encosta e de acordo com a topografia original. A transposição das águas para jusante é feita por meio de tubos de concreto com escoamento livre. Porém, em maio de 2019 foi construído um novo vertedouro à céu aberto seguido pela desativação do antigo sistema.

As águas efluentes, tanto superficiais quanto aquelas percoladas pela estrutura, são tratadas a jusante da barragem, coletadas por meio de caixas de passagem e conduzida para um sistema de chicanas onde o efluente recebe um tratamento com solução de cloreto de bário (BaCl₂) para reduzir a concentração de rádio (Ra) através de sua decantação (Figura 6D), antes de serem restituídas ao curso de água natural (INB, 2012).



Figura 6 - Detalhes da barragem de resíduos na UTM – INB

Fonte: Autor (2018). A) vista superior; B) Vista inferior C) vista do sistema de tratamento de água; D) maciço rochoso com surgência de água próximo à base do barramento

Uma questão peculiar e de viável investigação nesta barragem é a existência de surgências no maciço rochoso próximo ao eixo central, a jusante do barramento. Esse fluxo ocorre em um sistema fraturado orientado ortogonalmente ao eixo da barragem. A fratura mais importante na zona de surgência tem orientação 040/38 NW-SE. Esta condição pode resultar da existência de fluxo hidrogeológico abaixo da barragem, que cruza a base do declive (contato barragem/maciço) (Figura 6D).

3.6. Histórico da produção de Urânio no Brasil

Um dos marcos na produção de energia nuclear no Brasil foi o desenvolvimento da tecnologia de ultracentrifugação no final da década de 70. O projeto foi realizado pelo Centro de Tecnologia Marinha em São Paulo (CTMSP) em associação com o Instituto de Energia e Pesquisa Nuclear (IPEN / CNEN). Desde então, o país faz parte do seleto grupo de doze países que dominam

essa tecnologia. Apenas quatro países possuem reservas de urânio e tecnologia de enriquecimento, são eles: Estados Unidos, Rússia, China e Brasil. Outro marco da indústria nuclear nacional se deu em 1982 com a realização da primeira experiência de enriquecimento de urânio com ultracentrífugas construídas com tecnologia desenvolvida no Brasil (INDUSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, 2018).

A produção industrial de urânio no país teve início em 1982 com a lavra a céu aberto e processamento físico e químico no Complexo Industrial de Poços de Caldas (CIPC). O teor de corte da mina foi definido em 170 ppm de U_3O_8 solúvel recuperado na usina, enquanto que o material com teor < 170 ppm de U_3O_8 era considerado estéril, vindo a constituir rejeito de mineração. Na decapagem e pré- lavra foram movimentados cerca de 30 milhões de metros cúbicos de estéril para uma produção média de minério para a usina de 2.500 t/dia, além de 1.500 t/dia de minério marginal. Por fim, a relação estéril/minério era de 23,8 (FRAENKEL et al., 1985).

Com uma capacidade nominal de produção de 550 t anuais de U₃O₈, o CIPC foi o primeiro a produzir concentrado de urânio na forma de diuranato de amônio (*yellow cake*) no Brasil. Hoje o CIPC é chamado de Unidade de Tratamento de Minérios (UTM), sendo operada pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB), cujo principal acionista é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) (FRANKLIN, 2007).

No período de 1982 a 1988 foram processadas 1.765.900 toneladas de minério, com produção de 1.170 toneladas de DUA, que equivalem a 958 toneladas de U_3O_8 . A considerar o teor médio de U_3O_8 de 0,1% no minério, tem-se que o rendimento químico de produção é de 55%. Cabe ressaltar que a produção anual de 550 t de U_3O_8 nunca foi atingida e a unidade de precipitação de molibdato de cálcio (com capacidade nominal de 625 t/a) nunca operou em escala de produção industrial (FRAENKEL et al., 1985).

Em 1988 foi fundada a empresa estatal denominada Indústrias Nucleares de Brasil - SA (INB), que incorporou as empresas subsidiarias da antiga Nuclebrás, criadas para cumprir o acordo nuclear Brasil-Alemanha que tinha como objetivo o monopólio de todo o ciclo produtivo do combustível nuclear de mineração, desde a montagem até a entrega do elemento combustível. Com isso, a INB foi projetada para impulsionar a produção de energia nuclear no país (INDUSTRIAS NUCLEARES DE BRASIL, 2018).

Desde 1995, as instalações da UTM de Caldas estão em processo de descomissionamento (FRANKLIN, 2007). Uma década depois foi iniciada a descontaminação de instalações e terrenos

e, desde então, os equipamentos de mineração são permanentemente monitorados, bem como a água, o solo e os materiais radioativos armazenados, com o intuito de proteger o meio ambiente e garantir a saúde dos habitantes da região e dos trabalhadores da unidade.

No local também está instalado o Laboratório Ambiental de Análises Químicas e Radiológicas que realiza os estudos necessários para o monitoramento em áreas onde as unidades da INB também operam: Bahia, Ceará, Minas Gerais e São Paulo (INDUSTRIAS NUCLEARES DE BRASIL,2018).

Em 2012, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) aprovou o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) da Mina, elaborado com base em estudos nas áreas de hidrologia, geoquímica, hidroquímica e radioproteção, realizados com o objetivo de definir os trabalhos a serem realizados e as ações de recuperação ambiental que devem ser desenvolvidas na unidade (INDUSTRIAS NUCLEARES DE BRASIL, 2018).

4. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS

Uma barragem pode ser definida como um elemento estrutural construído transversalmente na direção do escoamento de um curso d'água, para à criação de um reservatório artificial destinado ao acúmulo de água para qualquer uso (fornecer uma oferta controlada para o consumo interno ou industrial, irrigação, aproveitamento hidrelétrico, para controle de inundações, etc.), ou à disposição final ou temporária de resíduos industriais. Assim, neste trabalho, as barragens destinadas à contenção de resíduos de mineração são o foco do estudo, embora se assemelhem às barragens de terra, são, sem dúvida, diferentes no que tange aos aspectos construtivos e operacionais.

Os elementos estruturais básicos de uma barragem estão representados na figura 7, eles são:

- <u>Barramento</u>: constitui a estrutura principal de retenção e pode ser construído por diferentes técnicas construtivas.
- ✓ <u>Fundação</u>: área constituída pelo maciço de rocha e/ou solo que forma a base de assentamento para uma barragem, dique e suas estruturas associadas.
- <u>Crista</u>: Compreende a porção superior da barragem, normalmente usada como uma estrada para tráfego.
- ✓ <u>Borda livre</u>: é referente a distância vertical da crista até o nível limite do reservatório. Essencial para evitar transbordamento.
- ✓ <u>Talude de montante</u>: é a porção do barramento em contato direto com o material armazenado.
- ✓ <u>Talude de jusante</u>: é o lado oposto ao talude de montante, voltado para o sentido em que a drenagem corre.

Além dos elementos estruturais expostos acima, existem outros componentes importantes considerados no conjunto de obras que compõem um barramento, como *escadeiras, túneis de desvio e vertedouros*. O primeiro caso constitui uma estrutura projetada para desviar a água do leito do rio, total ou parcialmente, com o objetivo de permitir o tratamento das funções nestas áreas, possibilitando a construção à seco das barragens de terra ou estruturas de concreto. Os *tunéis de desvio*, por sua vez, são construídos em cursos de água com vales íngremes ou em locais de curvas acentuadas dos canais fluviais. Sua utilização posterior é como túneis de adução para o transporte das águas do reservatório para a planta das máquinas. Finalmente, os *vertedouros* perfazem dispositivos de segurança caso a vazão do curso d'água assuma valores que tornem a estabilidade

da barragem perigosa, além de atuarem como sistemas de impedimento para que o nível máximo estabelecido para a barragem não cause prejuízos. (ANA, 2019; CHIOSSI, 2013)

Figura 7 - Elementos básicos de uma barragem



Fonte: (CHIOSSI, 2013)

4.1. Tipos de barragens e técnicas de construção

Grandes barragens são construídas com terra, rocha, concreto ou uma combinação destes materiais. No entanto, processos tradicionais como terra compactada são utilizados comumente para a construção de barragens de rejeito. As classificações das barragens, de acordo com o tipo de construção, são descritas a seguir:

4.1.1. Barragens de concreto

As barragens de concreto são aquelas construídas essencialmente com materiais granulares naturais (areia) ou produzidos artificialmente (britas) e são adicionados aglomerantes (cimento, pozolanas, etc.) e aditivos químicos (incorporadores de ar, retardador de pega, etc.). Segundo sua forma e/ou geometria, podem ser de quatro tipos:

- ✓ <u>Barragens de Gravidade</u>; consideradas as mais resistentes, principalmente em razão de sua estabilidade ser dada em função do grande peso e volume do concreto utilizado.
- ✓ <u>Barragens de Arco-gravidade</u>; possuem um eixo curvo com o objetivo de transmitir parte das cargas para as laterais e maciço rochoso.
- <u>Barragens em abóbadas</u>; características de vales estreitos, com a convexidade voltada para montante e uma alta resistência na fundação que permite diminuir notoriamente o volume de concreto.

✓ <u>Barragens em contraforte</u>; constituem um tipo de barragem onde o esforço no paramento montante é transmitido à fundação através de uma série de contrafortes, perpendiculares ao eixo do paramento de montante.

4.1.2. Barragens de terra

Nos tempos antigos, as barragens de terra foram construídas com o propósito de armazenar água para irrigação e seus projetos eram baseados em métodos empíricos. Deste modo, são encontrados na literatura de engenharia numerosos acidentes e rupturas relacionados a este tipo de barragem. Os primeiros procedimentos racionais para projetos dessas obras começaram a surgir no ano de 1907 e, atualmente, tais procedimentos permitem a construção de barragens de terra com mais de 150 m de altura. Perfazem as estruturas mais elementares e geralmente se prestam a qualquer tipo de fundação, desde maciço rochoso até um terreno composto de materiais inconsolidados. (CHIOSSI, 2013).

Existe alguma variabilidade nos tipos de barragens de terra, que podem ser definidas por: *homogêneas* e *zonadas* (Figura 8). O primeiro tipo é composto do mesmo material, formado por terras compactadas e de baixa permeabilidade. As *zonadas*, por sua vez, consistem em dois ou mais tipos de materiais (GONZALES de VALLEJO et al., 2002).

Figura 8 - Tipos de barragens de terra



Fonte: (GONZALES de VALLEJO et al., 2002); A) homogêneas; B) zonado.

4.1.3. Barragens de enrocamento

Este tipo de barragem engloba a utilização de blocos de rocha de tamanho variável e uma membrana impermeável em sua fase de construção. As rochas adequadas devem possuir alta resistência aos intemperismos físicos e químicos e, entre seus melhores litotipos, são: granito, gnaisse, diabásio, etc. Assim, os blocos rochosos são dispostos com a maior área de contato entre suas superfícies e os vazios são preenchidos por material menor granuação (Figura 9) (CHIOSSI, 2013).

Figura 9 - Esquema de barragem de enrocamento



Fonte: (CHIOSSI, 2013)

4.1.4. Barragens de rejeitos

Este tipo de barragem é construído por meio de um aterro de confinamento, projetado para permitir a decantação dos resíduos resultantes da atividade industrial ou de mineração. Dada a toxidade de certos rejeitos depositados nos reservatórios, métodos de coleta e tratamento das águas a jusante do barramento são fundamentais, seja para a emissão desses efluentes em cursos d'água com concentrações de metais, radionuclídeos e ânions tóxicos abaixo de limites estabelecidos em lei, ou para sua reutilização pela própria unidade mineradora. Desta forma é possível garantir o controle da contaminação e da qualidade dos recursos hídricos.

Os projetos para barragens de rejeitos diferem das barragens de retenção de água, sobretudo em relação a sua altura máxima, estabelecida em uma única etapa de construção. Por outro lado, barragens de rejeitos são geralmente construídas em múltiplas etapas, o que possibilita subir sequencialmente o nível da crista conforme o preenchimento do reservatório. Três métodos típicos de construção, descritos abaixo, foram desenvolvidos para tais barragens (MAINALI, 2006).

✓ Construção a montante

O projeto a montante é um método muito comum de construção e elevação de barragens de rejeitos, sendo o mais antigo e o mais econômico, onde inicialmente é construído um dique de partida. A partir disso, os rejeitos são descarregados da crista da represa ao longo de sua periferia para criar uma praia entre a crista da represa e a lagoa de água livre, local onde as partículas mais grossas dos rejeitos se depositam, enquanto os sedimentos mais finos são carreados em direção à porção mais interna da lagoa. Uma vez que o reservatório atinge sua capacidade máxima, um segundo patamar é construído no assentamento e na praia dos rejeitos consolidados. Esse processo continua à medida que os rejeitos aumentam em altura (Figura 10 b-d). A saturação do solo influencia a escala de liquefação à medida que a pressão da água do poro do solo aumenta. Deste modo, a construção a montante geralmente resulta em uma baixa densidade relativa e um alto grau de saturação de água. (MAINALI, 2006).



Figura 10 - Diagrama de construção de barragens de rejeito a montante

Fonte: (MAINALI, 2006).

✓ <u>Construção a jusante</u>

A construção a jusante também começa com um dique de partida ou barragem inicial. Esta barragem inicial pode ser construída com areia e cascalho permeável ou lama e argila para minimizar a percolação, cujos rejeitos são dispostos na parte posterior do dique inicial. Antes que o reservatório esteja cheio, o próximo nível é construído na encosta a jusante da barragem existente (Figura 11. b-d). Isso permite a incorporação do zoneamento interno para o controle do gradiente hidráulico no interior da barragem. Portanto, volumes significativos de água podem ser armazenados junto aos rejeitos sem que haja prejuízo ao grau de estabilidade em comparação com a construção a montante, devido à capacidade de compactação e incorporação de medidas de controle da água subterrânea, além do fato de que tais barragens não dependem estruturalmente dos depósitos de rejeitos para fundação. Por outro lado, uma desvantagem importante deste método é o grande volume de material de preenchimento para elevar a barragem. (MAINALI, 2006).



Figura 11 - Esquema de construção de barragens de rejeitos a jusante

Fonte: (MAINALI, 2006)

✓ Construção do tipo linha central

O método da linha central é uma solução intermediária entre os métodos de construção mencionados acima, embora seu comportamento estrutural esteja mais próximo ao método de construção a jusante. Do mesmo modo, a construção começa com um dique de partida e os próximos níveis são construídos sucessivamente com a manutenção da orientação do eixo da barragem, de modo que a base de suporte repouse sobre os resíduos (Figura 12 b.d.) (OLIVEIRA; BRITO, 1998). Isto permite a incorporação de medidas estruturais para o controle do gradiente hidráulico no interior da barragem, similar à construção a jusante.





Fonte: (MAINALI, 2006)

O armazenamento de volumes significativos de água junto aos rejeitos não é recomendado devido à necessidade de uma praia adequada, embora não seja necessário que a mesma seja tão larga quanto a construção a montante. A resistência sísmica é geralmente aceitável, uma vez que o dique de partida do material de preenchimento pode ser compactado. Deste modo, o empilhamento dos patamares não é restringido pela dissipação da pressão dos poros para a construção da linha central. Embora este tipo de aterro não seja capaz de armazenar permanentemente grandes volumes de água, o acúmulo a curto prazo, em razão de grandes eventos de precipitação ou fechamento de plantas, não afetará negativamente a estabilidade da barragem. (MAINALI, 2006).

Até alguns anos atrás as barragens de rejeito eram construídas em vales naturais; hoje em dia é dada preferência para construção de reservatórios a montante em locais planos, elevados e com lençol freático profundo. Assim, uma barragem deve sempre satisfazer aos requisitos de segurança, controle de poluição, capacidade de armazenamento e economia. E como tal deve estar fundamentada em critérios de projetos estabelecidos em função do tipo de rejeito, dos condicionantes naturais, da disponibilidade de matérias de construção e interferências (OLIVEIRA; BRITO, 1998; OLIVEIRA, 2010).

4.2. Hidrogeologia de barragens

Estudos hidrológicos sobre a estabilidade de barragens são de grande importância em razão da percolação de água em longas distâncias, por meio de poros ou pequenas fissuras, através de solos e maciços rochosos, desencadeando, na maioria dos casos, problemas de erosão subsuperficial. Do mesmo modo, a construção de barragens envolve um conhecimento profundo sobre água superficial e subterrânea, tanto na porção externa da barragem quanto na área do reservatório. O fluxo da água subterrânea é totalmente condicionado pelas heterogeneidades do subsolo e pode ter uma grande influência nos materiais, especialmente naqueles caracterizados por alta permeabilidade.

Ao iniciar uma investigação hidrogeológica para a construção ou monitoramento de barragens é importante conhecer as estruturas historicamente utilizadas, o nível da água subterrânea, determinar a pressão da água e permeabilidade, bem como as características hidrogeológicas do maciço e aplicação de técnicas de investigação direta da superfície em afloramentos, fraturamento no maciço rochoso (extensão, direções, persistência, grau de alteração, preenchimento, dentre outros parâmetros), cortes e declives, além de técnicas de investigação da subsuperfície por meio de poços, trincheiras, perfurações e métodos geofísicos (TAIOLI et al., 1993).

No tocante a barragens para contenção de rejeitos, uma vasta gama de conhecimento da mecânica dos solos, hidrogeologia e hidráulica, desenvolvidos para os sistemas hídricos, foram incorporados ao estudo deste tipo de estruturas. A locação de depósitos de rejeitos ou estéreis, contendo substâncias tóxicas, sobre uma área de recarga representa um risco efetivo de contaminação do aquífero local através da percolação de água meteórica que interage com o material depositado. Como técnica de prevenção, a drenagem da fundação pode não resolver o problema, sendo necessário implementar um sistema de impermeabilização (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

Caso a construção do depósito de rejeito seja sobre uma área de descarga é uma grande ameaça à estabilidade dos taludes pelas supressões estabelecidas na base. Entretanto, neste caso a drenagem funciona perfeitamente, pois além de coletar a água subterrânea aliviando sua pressão, pode também coletar a água de percolação contaminada que não penetrará no aquífero devido à pressão mais elevada do mesmo. Portanto, as duas águas podem ser coletadas a jusante e retornar ao sistema (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

4.3. Problemas estruturais e monitoramento de barragens

É de suma importância avaliar as condições concernentes à segurança estrutural e operacional das barragens, identificar os problemas e recomendar tanto reparos corretivos, restrições operacionais e/ou modificações, quanto as análises e os estudos para determinar as soluções desses problemas e evitar incidentes e acidentes referentes a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais (ANA, 2017).

Abaixo estão algumas das falhas que condicionam os problemas em barragens:

✓ Deterioração e instabilidade da fundação

Este tipo de falta é decorrente da qualidade e/ou tratamento das fundações. A presença de rachaduras visíveis, afundamento localizado, materiais solúveis, xistos argilosos ou argilas dispersivas que reagem com água, podem causar infiltração no material do aterro com consequente erosão e falha, de forma gradual ou, mais comumente, de forma muito rápida, com pouco ou nenhum aviso prévio (ANA, 2017).

Alguns tipos de solo são mais propensos a rachaduras do que outros durante períodos de seca, de tal modo, rachaduras transversais que atravessam um aterro podem promover a infiltração. Por outro lado, rachaduras longitudinais, que se estendem ao longo do aterro, podem se encher de água durante uma tempestade e saturar as camadas inferiores, o que pode acarretar em colapso de setores do aterro (LEWIS, 2014). Portanto, grandes rachaduras devem ser preenchidas o mais rápido possível com argila compactada, de preferência misturada com as do tipo expansível.

Igualmente, os deslizamentos são consequencia desses fatores e, como entendidos aqui, incluem todas as formas de movimento de massa que possam afetar a barragem ou vias de acesso. Incluem áreas de deslizamentos ativas, inativas e potenciais que podem variar, desde pequenos rolamentos sobre o talude até movimentos de grande volume, que podem ser classificados com base em diferentes critérios, alguns deles são: desprendimento, deslizamento rotacional, translacional e planar, avalanche, capotamento, fundição, entre outros (Figura 13) (ANA,2017).





Fonte: (INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA,1987); a) Deslizamento rotacional em um solo; b) Deslizamento rotacional em massa rochosa muito fraturada.

✓ Defeitos de barragens de concreto

As falhas em barragens de concreto são geradas comumente por materiais defeituosos. Subpressão e percolação de água são as principais causas de instabilidade em potencial, sob condições normais de carregamento, de parte ou da totalidade das estruturas. Do mesmo modo, reações álcali-agregado podem ocasionar sérios impactos na segurança das mesmas. Tais fatores ocorrem em materiais que, de alguma forma, possuem propriedades de baixa resistência (Figura 14). Programas anuais e de longo prazo de manutenção para as estruturas de concreto devem incluir, mas não se limitar, à limpeza regular de drenos ou sistemas de drenagem, manutenção dos sistemas impermeabilizantes, equipamentos de bombeamento e instrumentação de monitoramento, necessários para garantir a segurança (ANA, 2017).

Figura 14- Mecanismos de quebra na fundação de barragens de concreto



Fonte: (GONZALES de VALLEJO et al., 2002) a). Quebra por forças de cisalhamento através da matriz de rocha de baixa resistência; b). Quebras a favor de superfícies de descontinuidade de baixa resistência; c). Quebra a favor de fraturas e descontinuidades conjugadas de baixa resistência em rochas duras; d). Deslizamento em favor do contato barramento-fundação de baixa resistência; e). Deslizamento em favor de descontinuidades ou camadas de baixa resistência com saída no sopé da encosta.

✓ <u>Vertedouros defeituosos</u>

Para evitar problemas nos vertedouros como, obstruções, revestimentos fraturados, evidencia de sobrecarga de capacidade, entre outros, é necessário que o referido sistema contenha as seguintes características ou detalhes:

- Resistências adequadas à erosão e à cavitação, bem como uma altura adequada dos muros laterais para a passagem segura da Cheia Afluente de Projeto (CAP).
- Adequada dissipação de energia, a fim de prevenir solapamentos e/ou erosões que poderiam pôr em risco o vertedouro ou a barragem, durante a CAP.
- Capacidade para suportar a passagem de entulho flutuante durante a CAP, ou provisão de uma barreira efetiva contra entulhos, projetada para carregamento por CAP;

- Confiabilidade nos mecanismos de abertura das comportas durante grandes cheias, incluindo o fornecimento de energia, controle e comunicações; deve existir processo alternativo para sua abertura.
- Segurança adequada quanto a deslizamentos de terra, entulhos acumulados no canal de aproximação, rampas e canais de saída, que poderiam restringir sua capacidade de descarga;
- Acesso assegurado sob quaisquer condições para o caso das comportas do vertedouro serem operadas no local (ANA, 2017).

✓ <u>Defeitos de barragens de terra, enrocamento e margens do reservatório</u>

No tocante as estruturas em aterro as quebras mais características nas fundações são decorrentes do peso que tais estruturas exercem no substrato devido à compressibilidade de solos, materiais de baixa resistência e erosão interna nos materiais (Figura 15). Deste modo, as principais falhas estão associadas à estabilidade e sanidade das rochas do enrocamento, fraturamento hidráulico, rachaduras no solo e solos de baixa densidade. No caso das margens do reservatório, os problemas são decorrentes de deslocamentos de falha, rupturas e erosões. Assim, a presença destas anomalias, podem causar instabilidade dos taludes, vazamento excessivo, potencial de liquefação, remoção dos materiais sólidos e solúveis, permeabilidade, erosão, etc.





Fonte: (GONZALES de VALLEJO, et al., 2002) a). Quebra circular em favor de materiais de baixa resistência; b). Assentos na barragem para solos moles compressíveis; c) Erosão interna nos materiais de fundação.

Os filtros e drenos internos são particularmente importantes onde se considerar possível a ocorrência de fissuramento na barragem, devido a recalques diferenciais, arqueamento e/ou fraturamento hidráulico. Fissuras podem causar fluxos de percolação concentrados que podem conduzir a ruptura da barragem por erosão interna (ANA, 2017).

A erosão é um problema com muitas causas e formas e de suma importância na segurança de barragens de terras. Deste modo, necessitam de trabalhos de manutenção essencialmente direcionados ao controle da erosão a fim de prevenir a deterioração do maciço e/ou fundação, e o desenvolvimento de caminhos preferenciais de percolação. Por conseguinte, abaixo são descritas alguns dos desencadeantes deste tipo de falha:

Danos por ação de animais

A presença de animais cavadores podem ser uma fonte de infiltração e causar possível erosão interna e falha, caso as tocas e tuneis construídos pelos referidos animais conectem o reservatório ao talude jusante, ou penetrem no núcleo impermeável da barragem. Cavas profundas, extensas ou que possuem túneis, podem representar um perigo maior para a integridade física do talude comparadas com cavas rasas. Nesse sentido, expertos devem determinar como corrigir esta anomalia. Alguns desses animais são: coelhos, tatus, cupins e formigueiros (LEWIS, 2014).

Piping convencional

O carreamento de partículas do solo pela agua de percolação, a partir do ponto de surgência do fluxo é denominado de *piping*. A água percola o interior de todas as barragens de terra, grandes ou pequenas. Não é a ocorrência de infiltração que é problemática, mas sim a taxa de infiltração. Se a taxa for alta, a água terá capacidade de mobilizar e transportar as partículas do solo. Deste modo, as forças de arrasto viscoso dentro da barragem se oporão a esse movimento de água e, portanto, reduzirão as forças de erosão que operam através do solo. Se as forças de arrasto excederem a força de erosão, o *piping* não ocorrerá. Do contrário, existe uma alta probabilidade da ocorrência de falhas devido à presença de canais subterrâneos e qualquer linha de fraqueza dentro da barragem de terra pode acelerar a falha (Figura 16). O *piping* convencional ocorre em solos sem

coesão, com início no interior do dique e evolução até seu surgimento em superfície (LEWIS, 2014).



Figura 16-Modelo de erosão interna (piping) em uma barragem

Tunelamento

O túnel ocorre em solos dispersivos, que são caracterizados por decomposição e separação em componentes de grãos individuais quando entram em contato com a água. O processo começa quando a água infiltra no solo seco através de uma rachadura e, em seguida, erodem o solo exposto ao seu redor. As partículas dispersas são levadas de volta, em suspensão, para o reservatório. Esse processo continua à medida que a água entra em contato com o solo seco e gradualmente assume a forma de um túnel, que eventualmente se desenvolverá através da barramento. Como o túnel começa a montante da barragem, é mais difícil sua detecção comparado ao *piping* convencional, que tem início na face posterior da construção. Isso torna os túneis muito mais instáveis e perigosos (LEWIS, 2014).

Tubo de vazamento

Outra forma de *piping* é o resultado de aplicação de técnicas equivocadas utilizadas nos tubos de saída, o que inclui uma fraca compactação ao seu redor e, em particular sob o tubo, tida como uma área de difícil alcance e frequentemente negligenciada. Uma causa frequente de falha no tubo de saída é o vazamento em um tubo mal articulado. Isso geralmente é acelerado quando uma válvula a jusante é incluída no projeto da barragem. O uso de uma válvula a montante reduziria

Fonte: (LEWIS, 2014,)

pelo menos a pressão na junta e garantiria que esse fluxo de vazamento reduzido fosse limitado dentro da tubulação (LEWIS, 2014).

✓ Acidentes em barragens de rejeito

No caso das barragens de rejeito, mesmo permanecendo as causas hidrogeológicas, expostas anteriormente, como as principais responsáveis pelos acidentes, levando em conta que são estruturas de terra e rocha, os fatores geológicos também perfazem alguns dos problemas estruturais relacionados ao maciço rochoso no qual o barramento é construído. Do mesmo modo, o uso de materiais não convencionais e a ausência ou inadequado controle executivo durante o processo construtivo explicam muitos dos acidentes ocorridos até hoje.

Uma característica das barragens de rejeito é a presença, em associação com a água, de enorme quantidade de sólidos, os quais podem elevar a pressão hidrostática na estrutura. Este material deve ser retido no reservatório sem que ocorra seu extravasamento, fato que implica na existência de uma estrutura e fundações estáveis. Outro fator importante é o controle absoluto da percolação de água no barramento, levando em conta caminhos de fluxos através e abaixo do dique, sendo que a perda deste controle reside na maioria das causas de instabilidade ou rompimento de barragens.

Mais de dois terços das rupturas de barragens de rejeitos estão relacionados à drenagens e percolação, estruturas vertedouras e estabilidade de taludes. O restante dos rompimentos está relacionado ao processo de erosão superficial, condições de fundação, propriedades físicas e químicas e à própria operação da barragem de rejeitos (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

A Figura 17 ilustra um exemplo de ruptura na barragem de resíduos de mineração de Aznalcóllar, que ocorreu em razão das margas serem afetadas por superfícies de cisalhamento e descontinuidades de origem sedimentário. Esta falha profunda de tipo progressivo foi decorrente da existência de uma zona submetida à elevada tensão nas margas, pelo peso da barragem e carga dos rejeitos de mineração (GONZALES de VALLEJO et al., 2002).



Figura 17 - Diagrama do mecanismo de ruptura da barragem de rejeitos da mineração de Aznalcóllar

Fonte: (GONZALES de VALLEJO et al., 2002)

Programas de manutenção periódicos para estruturas em aterro devem incluir a manutenção regular da instrumentação, da crista e do enrocamento; o controle desde a vegetação até as tocas de animais; estabilização de taludes; manutenção dos sistemas de drenagem e a remoção de entulhos a montante, a fim de garantir a segurança da estrutura (ANA, 2017).

4.4. Considerações ambientais na construção de barragens

A construção de barragens é um tópico de discussão devido aos impactos negativos gerados pela sua implementação. Em razão à ocorrência de acidentes de barragens de rejeitos de mineração, os problemas ambientais são cada vez mais preocupantes e agravam na medida em que são processados minérios ativos, os quais exigem sofisticadas técnicas de beneficiamento e utilizam reagentes tóxicos que se incorporam aos rejeitos (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

Tanto as pilhas de estéreis de mineração quanto as bacias de rejeito estão sujeitas à ação de todo tipo de intempéries climáticas que ocasionam consequências importantes. Por exemplo, água da chuva penetra nas pilhas de estéreis, solubilizando substancias químicas e gerando um efluente ácido. Uma barragem de rejeitos pode apresentar infiltrações e também gerar um efluente ácido. Em ambos casos, este efluente precisa ser contido e tratado antes da liberação para o meio

ambiente, sempre que os teores das substancias químicas contaminantes estiverem acima dos limites estabelecidos pelo órgão competente (OLIVEIRA, 2010).

Nos últimos 30 anos os problemas ambientais adquiriram grande importância, dada a mudança de consciência por parte dos industriais do setor mineral, não apenas pelo aspecto econômico e manutenção da estabilidade física das barragens de rejeitos, mas também pelas possíveis consequências ambientais potenciais devido às alterações químicas e mecanismos de transporte de poluentes. Portanto, critérios formais de projetos de rejeitos são estabelecidos para barragens de rejeitos, sendo estes cada vez mais padronizados internacionalmente, uma vez que falhas em barragens de rejeitos ocorrem a taxas relativamente altas e muitos desses eventos resultam em danos substanciais na forma de vítimas humanas, destruição de propriedade, poluição ambiental e perdas econômicas para a indústria de mineração (MAINALI, 2006).

Grandes sinistros com ruptura de barragens de rejeito têm ocorrido no mundo inteiro, e frequentemente no Brasil, o que induziu à reformulação de conceitos através de uma legislação apropriada e de efetiva e permanente responsabilidade. Assim, para a construção de uma barragem, seja de armazenamento de água ou de contenção de rejeitos, devem predominar nos planejamentos e projetos, a realização de uma investigação geológico-geotécnica, bem como um diagnóstico de impacto ambiental baseado nas metodologias e requisitos estabelecidos pelas entidades fiscalizadoras e a legislação ambiental.

4.5. Rejeitos

A exploração de minérios para atender as especificações do mercado é um processo complexo que é iniciado com as atividades de mineração, onde a rocha é fragmentada e os minerais de interesse são separados através da utilização de água, ar e substâncias químicas. O restante da rocha britada misturada com os componentes anteriores é denominado de rejeito de mineração e, posteriormente, é disposto em reservatórios ou barragens para manter o equilíbrio físico-químico do material e sua não propagação para o meio ambiente.

Do processamento do minério resultam rejeitos que podem ser ativos (com potencial contaminante) ou inertes, a depender do tipo de minério e processo de beneficiamento. Diferentemente do rejeito inerte que provoca poluição física nos corpos d'água onde é lançado, o rejeito do tipo ativo é responsável pela poluição físico-química do solo, sistemas hídricos e

atmosfera. Assim, o rejeito é uma mistura de água e sólidos que demanda uma racionalização do seu manejo, disposição e deposição (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

Os rejeitos passam por três estados de comportamento:

- Estado inicial do rejeito com comportamento líquido necessário ao seu transporte por via hídrica, denominado de polpa.

- Estágio intermediário, correspondente ao processo de sedimentação, com comportamento semi-liquido e semi-viscoso.

- Estágio em que ocorre o processo de adensamento, com comportamento de solo arenoso ou argiloso, a depender da sua granulometria.

Os rejeitos precisam ser avaliados do ponto de vista geotécnico, segundo sua função no sistema de contenção de rejeitos, seja como material de construção de barragens de rejeitos ou como material de suporte ou alteamento das barragens construídas pelo método montante.

Para os rejeitos inertes, o tratamento se baseia na decantação dos sólidos da lama, que poderá ser acelerada pela introdução de floculantes, caso a fase sólida da lama tenha características coloidais. A etapa subsequente é dada pelo tratamento do efluente antes ser restituído ao curso d'água natural.

O grau de tratamento a ser dado ao rejeito é tido em função das condições do corpo d'água receptor, características físicas da fase sólida do rejeito, necessidade de recuperação de substâncias utilizadas no processo e das disposições legais sobre o tema (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

4.6. Aspecto Legal

A realização de estudos geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos, ambientais, sociais, entre outros, são alguns dos aspectos que justificam a execução de obras sob licenciamento ambiental. A construção de barragens envolve uma ampla estrutura legislativa, especialmente quando se trata de barragens contendo rejeitos de mineração, devido à existência de substâncias tóxicas e aos problemas derivados por possíveis e ocasionais falhas.

A legislação ambiental brasileira contém, dentro de seu amplo arcabouço legal, leis, decretos e resoluções sobre a segurança de barragens de rejeitos, a fim de evitar acidentes decorrentes dessas estruturas que ponham em risco a vida das pessoas e suscitem um maior desequilíbrio nos ecossistemas e meio ambiente.

Dentro dos principais normativos que regulam a segurança de barragens no Brasil instituídos pelos órgãos públicos, a Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política de Segurança Nacional para Barragens, destinadas ao acúmulo de água para qualquer uso, a disposição final ou temporária de resíduos e o acúmulo de resíduos industriais. Esta lei cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens para manter a integridade estrutural e operacional, a preservação da vida, a saúde, da propriedade industrial e do meio ambiente (IBAMA 2017).

✓ <u>Legislação Federal</u>

Conforme a referida lei o Ministério do Meio Ambiente e o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), emitem as seguintes Resoluções:

- Resolução nº 37, de 26 de março de 2004, estabelece diretrizes para a outorga de recursos hídricos para a implantação de barragens em corpos de água de domínio dos Estados, do Distrito Federal ou da União.
- Resolução nº 143, de 10 de junho de 2012, estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.
- Resolução nº 178, de 29 de junho de 2016, a qual altera a Resolução CNRH nº 144, de 10 de julho de 2012, que "Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), o qual constitui um cadastro consolidado de informações sobre barragens, cuja inserção dos dados está sob a responsabilidade de cada entidade ou órgão fiscalizador de segurança de barragens no Brasil (ANA, 2019).

✓ Normativos decorrentes do evento de Brumadinho - MG

O Conselho Ministerial de Supervisão de Respostas a Desastres no uso das atribuições que lhe confere o Decreto nº 9.691, de 25 de janeiro de 2019, estabelece novas medidas e traz duas resoluções decorrentes do rompimento da barragem de Brumadinho- MG, para fiscalizar barragens no Brasil e aumentar a segurança dos empreendimentos:

Resolução nº 1, o Conselho recomenda, inicialmente, aos órgãos da administração pública federal que priorizem esforços para o "pronto atendimento" às vítimas diretas e indiretas da ruptura da barragem do Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, e reforcem o apoio ao governo de Minas e às prefeituras das cidades banhadas pelo rio Paraopeba.

Em seguida, a resolução elenca uma série de medidas para garantir a segurança da operação das barragens no país. Solicita aos órgãos federais que promovam imediata fiscalização nas barragens sob sua jurisdição, dando prioridade às classificadas como possuidoras de "dano potencial associado alto" ou com "risco alto". E determina a realização de auditorias nos procedimentos e revisão das normas de fiscalização de segurança de barragens.

Nesse sentido, a resolução pede aos órgãos fiscalizadores que mantenham cadastro das barragens sob sua jurisdição e compartilhem esses dados com o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (Snisb), que tem como objetivo registrar as condições de segurança de barragens em todo o território nacional, dispondo de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações de barragens em diferentes fases de vida (construção, operação ou desativadas), para diferentes usos e com diversas características técnicas.

Na resolução nº 2, o Conselho cria o Subcomitê de Elaboração e Atualização Legislativa, com o objetivo de elaborar anteprojeto de atualização e revisão da Política Nacional de Segurança de Barragens, estabelecida pela Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 (ANA, 2019).

✓ <u>Entidades Fiscalizadoras</u>

Existem diferentes entidades fiscalizadoras no Brasil que visam o devido cumprimento da legislação vigente e a fiscalização das empresas e atividades de potencial impacto ambiental.

No tocante ao ramo de instalações nucleares e cadeia de urânio, tais atividades necessitam de licenciamento através de duas entidades: o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), responsável pelo licenciamento ambiental; e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), responsável pelo licenciamento nuclear (ANA, 2019).

As normas de proteção radiológica internacionais e nacionais, regidas pelo órgão fiscalizador, CNEN, estabelecem procedimentos que devem ser atendidos pela indústria de modo a garantir a segurança de seus funcionários, a proteção do meio ambiente e, consequentemente, da população como um todo (CNEN, 2015). Norma CNEN NN 4.01, Resolução CNEN 208/16, estabelece os requisitos de segurança e proteção radiológica para instalações mínero-industriais; a qual dispõe sobre a autorização para posse, uso e armazenamento de minérios, matérias-primas e demais dateriais contendo radionuclídeos das séries naturais do urânio e/ou tório em instalações mínero-industriais nas quais sejam lavrados, beneficiados e industrializados, incluindo locais de armazenamento inicial de escórias e resíduos radioativos.

Norma CNEN NN 8.02, Resolução CNEN 168/14, constitui o licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. Assim a referida norma, estabelece os critérios gerais e requisitos básicos de segurança e proteção radiológica relativos ao licenciamento de depósitos iniciais, intermediários e finais de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação, em atendimento à Lei 10308/2001.

O licenciamento inclui duas etapas até que a licença de operação seja concedida: licença prévia e licença de instalação. Para ambas, o órgão de licenciamento estabelece uma série de procedimentos que devem ser adotados para avaliar e, se necessário, minimizar os impactos potenciais da operação da unidade sobre o meio ambiente e as populações. As licenças são concedidas com prazos de validade estabelecidos (CNEN, 2015).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica dos métodos e técnicas adotadas para o desenvolvimento da investigação. A coleta do material bibliográfico exposto no capítulo 4 e o apresentado neste capitulo serviram de base para a realização do trabalho e interpretação dos dados.

Na busca pelo conhecimento existente sobre métodos geofísicos aplicados à barragens, foram consultados trabalhos desenvolvidos que demonstram grande eficiência, cujos resultados apresentados até o momento são considerados satisfatórios (ALBUQUERQUE *et al.*, 2019; AL-FARES, 2014; CAMARERO, MOREIRA, PEREIRA, 2019; COULIBALY, BELEM, CHENG, 2017; LIN *et al.*, 2013).

Existem poucos trabalhos que relacionam barragens de rejeitos e métodos geofísicos, sobretudo aqueles que consideram sua aplicação uma ferramenta de diagnóstico ambiental. Mesmo assim, foi possível o levantamento de um considerável volume de informações, que serviu para fornecer uma visão geral do conhecimento existente sobre o assunto.

Os métodos geofísicos são utilizados para o reconhecimento de um modelo geológico subsuperficial, localização de zonas de fraturas, investigação do sistema de lençol freático, detecção e delimitação de plumas de contaminação, bem como obter informações sobre parâmetros físicos e litológicos do meio (KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007).

Esses métodos são baseados na existência de uma correlação direta entre uma determinada propriedade física mensurável, como resistividade, velocidade de propagação de onda sísmica, etc., e modelos de interpretação que permitem obter informações de uma seção vertical do terreno, fornecendo dados de profundidades de ocorrência de cada horizonte e informações acerca de heterogeneidades dos materiais. A rapidez de execução e custo acessível dos estudos geofísicos são um atrativo que justificam a utilização dos mesmos (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

Diferentes métodos geofísicos para o reconhecimento do subsolo são divididos de acordo com os parâmetros físicos investigados: gravimétricos (densidade), elétricos (resistividade, polarização induzida, potencial espontâneo), magnéticos (suscetibilidade magnética), eletromagnéticos (condutividade elétrica e permeabilidade), sísmicos (velocidade de propagação de ondas sísmicas) radioativos (níveis de radiação natural ou induzida); Seu uso na superfície ou no interior, como sondagens e poços, diferencia as técnicas de colocação em campo e, por isso, são geralmente descritos de forma independente, embora suas bases teóricas sejam as mesmas. A grande vantagem técnica dos métodos geofísicos indiretos é permitir obter informações mais

44

contíguas, além são ferramentas não invasivas e, portanto, não destrutivas, quando comparados com as sondagens, métodos diretos, cujos resultados são extremadamente pontuais (GONZALES de VALLEJO et al., 2002; OLIVEIRA; BRITO, 1998)

5.1. Métodos Geoelétricos

Assim como outros parâmetros físicos, as propriedades geoelétricas envolvem a detecção de sinais induzidas em corpos condutores subsuperficiais através de campos elétricos e magnéticos gerados na superfície. Essas técnicas têm sido utilizadas há muito tempo em estudos geofísicos e, nos últimos anos, são consideradas importantes na investigação científica de problemas ambientais. Neste estudo é utilizado o método da eletrorresistividade a partir da técnica de tomografia elétrica, com o objetivo de estudar contrastes entre valores de resistividade para identificar possíveis zonas saturadas ou falhas na estrutura da barragem caracterizadas por fluxos hidrológicos.

5.1.1. Método da Eletrorresistividade

A Eletrorresistividade é um método geoelétrico definido pelo parâmetro físico da resistividade elétrica (ρ), a partir da interpretação de um campo elétrico gerado em superfície por meio de correntes elétricas introduzidas artificialmente no solo e, os resultados são dados pela diferença de potencial entre o meio geológico.

Os desvios nos valores de diferença de potencial fornecem informações sobre a forma e propriedades elétricas das heterogeneidades em subsuperfície, em contraste a um modelo geológico homogeneamente ideal e análogo a um circuito elétrico simples. Para estabelecer esse campo elétrico no material, fios são conectados a uma fonte, produzindo uma força elétrica com potencial de atuação sobre as cargas presentes no meio. Esse fluxo ordenado de corrente é denominado de corrente elétrica (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

Ao aplicar a mesma diferença de potencial entre as extremidades de diferentes materiais condutores, resultarão nelas correntes diferentes. A característica do condutor relacionada a este fenômeno é a sua resistência (HALLIDAY; RESNICK, 1968).

Assim, a resistividade de um material é definida como a resistência, em ohm, entre as faces opostas de um cubo unitário do material. De tal modo a 1ª Lei de Ohm define a intensidade da

corrente elétrica que atravessa um resistor como diretamente proporcional à tensão estabelecida em seus terminais. Portanto, a Lei de Ohm relaciona a intensidade da corrente elétrica I (Ampère), resistência R de um determinado corpo e a diferença de potencial V (Volt V) entre as extremidades, cuja relação é dada pela Eq. 1

$$V = IR(V)$$
 ou $R = \frac{V}{I}(\Omega)$ (Equação 1)

Um circuito elétrico simples é constituído por uma fonte conectada a um resistor através de fios elétricos. A figura 18-a representa um circuito elétrico simples com uma diferencia de potencial gerada pelo resistor quando estabelecida uma corrente elétrica, onde o voltímetro mede a tensão nas extremidades do material, enquanto o amperímetro mede a corrente de fluxo. O voltímetro é projetado para que uma fração desprezível da corrente flua através dele e o resistor conectado por fios de baixa resistência, assim os efeitos dos circuitos de conexão são minimizados. Desta forma, a resistência é diretamente proporcional à tensão estabelecida, como indica a Figura 18-b.

Figura 18 - Medição de resistência em um circuito elétrico simples e representação da Lei de Ohm



Fonte: (MUSSET; KHAN, 2000). a) Circuito elétrico simples; b) comportamento da resistência *vs* tensão; c) Lei de Ohm representada por meio de uma corrente elétrica induzida I em um cilindro de resistência R com comprimento L e seção transversal A. A figura 18-c mostra a aplicação de uma corrente elétrica por meio de um corpo cilíndrico homogêneo de comprimento L e área de seção transversal (A), onde a relação com a resistividade (ρ) é dada pela Eq. 2, também denominada de 2ª Lei de Ohm (MUSSET; KHAN, 2000).

$$\rho = R \frac{A}{L} (\Omega m)$$
 (Equação 2)

A resistividade é inversamente proporcional ao comprimento do corpo e diretamente proporcional à área de sua seção transversal, além de variar em função da forma e temperatura do material, onde o aumento da temperatura resulta em valores de resistividade menores. A unidade no SI da resistividade é o ohm por metro (Ωm) e a recíproca da resistividade é chamada de condutividade, expressa em siemens por metro (Sm) (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002; MUSSET; KHAN, 2000).

Conforme mencionado anteriormente, o método da eletrorresistividade é baseado no principio de que os potencias elétricos, também chamado de tensões, medidos em torno de um eletrodo de corrente, são afetados pelas resistividades elétricas dos materiais subjacentes. Para melhor entendimento, é necessária a clareza acerca de um potencial produzido em terreno homogêneo por meio desse sistema de eletrodos.

Para a geração de um campo elétrico, uma corrente é introduzida no solo através de eletrodos de corrente (AB), para a propagação da corrente elétrica, e outros dois eletrodos de tensão ou aquisição (MN), para a medição da diferença de potencial, como mostrado na figura 19 (MILSON; ERIKSEN, 2011; KNÖDEL, LANGE e VOIGT, 2007).

Figura 19 - Princípio da medição da resistividade com um arranjo de quatro eletrodos



Fonte: (Modificado de KNÖDEL, LANGE; VOIGT, 2007)

Um eletrodo pontual que introduz uma corrente elétrica (I) gera um potencial (V) a uma distância **r** da fonte. Se tanto a fonte quanto os pontos de medição estiverem na superfície de um meio-espaço homogêneo de resistividade (ρ), esse potencial é dado por:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$
(Equação 3)

Onde:

V= representa o potencial elétrico (V);

I =representa a corrente elétrica (A);

r = representa a distância entre o eletrodo de corrente e o de potencial (m).

Em um meio geológico homogêneo e isotrópico, o potencial elétrico para cada eletrodo de aquisição (M e N) é dado pelas Eq. 4 e 5

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right)$$
(Equação 4)

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$
(Equação 5)

As medições não são um potencial como tal, mas sim uma diferencia de potencial expressada em volts. Assim a diferencia de potencial entre M e N é dada pela Eq. 6

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) = \frac{I\rho}{2\pi} K \qquad (Equação 6)$$

Na equação 6, "K" é a abreviação da expressão no parêntese, denominada de coeficiente geométrico e dada em função das posições dos eletrodos. Assim, para o cálculo da resistividade do meio geológico a equação 6 se reduze à Eq. 7

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$
 (Equação 7)

Em solo homogêneo o valor obtido para (ρ) por meio da equação 7, não é igual uma vez que a posição mútua dos eletrodos varia. De modo análogo, se um arranjo de eletrodos, é movimentado conjuntamente, como um todo, sem alterar o coeficiente geométrico (k), embora os eletrodos ocupem novas posições, a equação 7 proporcionará um valor diferente de (ρ) para cada posição do dispositivo, caso exista no solo variações laterais de resistividade.

Em solo não homogêneo, por conseguinte, a resistividade (ρ), calculada a partir da equação (7), variará com a alteração da disposição geométrica dos eletrodos referente ao arranjo praticado durante os trabalhos de aquisição dos dados, o que resultará na denominada resistividade aparente (ρ_a), representada pela Eq. 8 (ORELLANA, 1971).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$
 (Equação 8)

Existem fatores geológicos que influenciam diretamente o método de eletrorresistividade como a mineralogia e a própria natureza do material, a porosidade da rocha/solo e o grau de saturação da rocha/solo, uma vez que a água contribui na condutividade da corrente elétrica. A topografia também pode influenciar os levantamentos elétricos, uma vez que as linhas de fluxo de corrente tendem a acompanhar a superfície do terreno. As superfícies equipotenciais são, assim, distorcidas, e podem resultar em leituras anômalas (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009). As interpretações de eletrorresistividade apresentam concepções ambíguas, onde é necessário fazer analises geofísicos e geológicos, além de limitações tais como método restrito a padrões estruturais mais simples e, a profundidade de penetração do método é limitada pela energia elétrica máxima que pode ser introduzida no solo.

5.2. Técnica da tomografia elétrica

Para o levantamento de dados de resistividade uma das técnicas mais aplicadas é a Tomografia Elétrica (TE), também conhecida como imageamento elétrico. Existem diferentes técnicas de operação que podem ser utilizadas: *profiling* (mapeamento); sondagem elétrica vertical (VES); sondagem combinada e perfilamento (imagens bidimensionais), análise de resistência tridimensional, entre outras. Entretanto, a Tomografia Elétrica fornece uma boa perspectiva da variação lateral dos parâmetros físicos medidos, principalmente em relação às condições naturais do meio, quando o interesse do estudo é a investigação de uma estrutura 2D.

Essa tecnica realiza a investigação dessas variações laterais ao longo de perfis em diferentes profundidades, através da utilização dos principais arranjos de eletrodos, como Schlumberger, Wenner, Dipolo-dipolo, Polo-dipolo, etc.., onde a direção da linha de levantamento permanece fixa e o centro do arranjo AMNB varia lateralmente conforme o seu desenvolvimento (KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007; KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

Para a aquisição de dados de resistividade através da técnica da tomografia elétrica é utilizado um grande número de eletrodos, 25 ou mais, conectados a um cabo multicanais que faz a conexão com um microcomputador portátil, tendo este último a função de selecionar automaticamente os eletrodos relevantes para cada medição (LOKE, 2000). O espaçamento entre eletrodos pode ser a distância máxima entre as conexões do cabeamento ou configurado através de distâncias menores. Em qualquer caso os eletrodos devem ser posicionados com espaçamentos iguais ao longo do perfil. A aquisição de dados é iniciada após os cabos *multi-core* serem conectados ao resistivímetro e os contatos dos eletrodos verificados de forma automática. Desta

maneira, as medições são controladas pelo resistivímetro acionado por um microprocessador ou computador, interno ou não (KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007).

A Figura 20 mostra a configuração típica para uma aquisição 2D. A sequência de medições a serem tomadas, o tipo de arranjo e outros parâmetros de medição, como a corrente elétrica, são normalmente inseridos em um arquivo de texto que pode ser lido por um *software*. Depois da leitura do arquivo de controle, o programa seleciona automaticamente os eletrodos apropriados para cada medição e, através do processamento dos dados em um modelo de inversão, obtém-se como produto final uma seção geoelétrica 2D com valores de resistividade e profundidade reais (LOKE, 2000).

Figura 20 - Arranjo de eletrodos para um levantamento elétrico em 2D e a sequência de medições usada para construir uma pseudo-seção.



Fonte: Modificado de LOKE, 2000.

5.2.1. Arranjo de eletrodos

Existem diversos conjuntos de arranjos de eletrodos para a obtenção dos dados de resistividade, os mais comuns são: Wenner, Schlumberger, Dipolo-dipolo e Pólo-dipolo. Cada arranjo possui suas vantagens e desvantagens em relação à profundidade de investigação, resolução

de estruturas horizontais e verticais, sensibilidade a heterogeneidades superficiais, efeitos laterais, topografia, etc.

O espaçamento dos eletrodos deve ser suficiente para atingir a profundidade de interesse, porém, quanto maior o espaçamento, menor a resolução, tanto lateralmente quanto verticalmente, o que impossibilita a detecção de um corpo relativamente pequeno em profundidade. Portanto, a escolha do arranjo é de suma importância e depende do objetivo da investigação com base no método geofísico empregado para a obtenção dos melhores resultados (KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007; MUSSET; KHAN, 2000).

5.2.1.1. Arranjo Schlumberger

Conforme os objetivos da presente dissertação e as características estruturais da barragem de rejeitos estudada, o arranjo Schlumberger é o arranjo melhor adaptado para determinar a profundidade e a resistividade das estruturas rochosas em camadas planas (LOWRIE, 2007). De forma adicional, a separação reduzida na fixação dos eletrodos de potencial permite uma redução na interferência causada por ruídos, além de uma maior profundidade de investigação em comparação com outros arranjos (MUSSET; KHAN, 2000).

O arranjo Schlumberger é estabelecido pela distância a entre os eletrodos de potencial (M e N) e L entre os eletrodos de corrente (A e B), como indica a figura 21. No levantamento, os eletrodos de potencial permanecem fixos, enquanto a distancia entre os eletros de corrente é expandida simetricamente e progressivamente ao longo do perfil. A separação dos eletrodos de corrente é escolhida para que o fluxo de corrente seja maximizado em profundidades onde se esperam contrastes laterais de resistividade (KEAREY; BROOKS e HILL, 2002; LOWRIE, 2007).

Figura 21 - Esquema do arranjo Schlumberger



Fonte: (Modificado de LOWRIE, 2007).

Uma vez que $r_{AM} = r_{NB} = (L-a)/2$ e $r_{AN} = r_{MB} = (L+a)/2$, substituindo na fórmula geral temos a Eq.9 :

$$\rho_{a} = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left(\frac{2}{L-a} - \frac{2}{L+a} - \frac{2}{L+a} + \frac{2}{L-a} \right)^{-1} = \frac{\pi \Delta V}{4I} \left(\frac{L^{2} - a^{2}}{a} \right)$$
(Equação 9)

Nessa configuração os eletrodos de corrente A e B são mantidos a uma distância muito maior do que a separação dos eletrodos de potencial MN ($L \gg a$). Sob essas condições, a Eq. 10 é simplificada na forma da equação da resistividade aparente:

$$\rho_a = \frac{\pi \Delta V}{l} \left(\frac{L^2}{a}\right)$$

(Equação 10)

6. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTOS DE DADOS

Os dados de Eletroresistividade na barragem de rejeito da INB, foram coletados em três dias de trabalho de campo entre julho e agosto, por meio da técnica de tomografia elétrica, com o equipamento do Laboratório de Geofisica do Departamento de Geologia Aplicada – DGA da Unesp Rio Claro. Foram realizadas cinco linhas de tomografia elétrica. As linhas 1, 2 e 3 foram dispostas na berma da crista da barragem (lateral direita, centro e lateral esquerda), a linha 4 foi realizada na berma do talude um, e a linha 5 na berma do talude dois, próximo a base da barragem (Figura 22). O espaçamento entre eletrodos foi de 6 m, estabelecido com base nas dimensões estimadas do corpo e na profundidade de investigação desejada. A orientação das linhas foi no sentido SW-NE, com início em SW.



Figura 22 - Esquema das linhas Geofísicas na área de estudo

Fonte: Modificado de Google Earth (2018)

As linhas 1 e 3 foram executadas com 114 m de comprimento cada, e a linha 2 com 156 m. A linha 4 e 5, por sua vez, contaram com comprimentos de 230 m de comprimento cada (2 cabos de 21 eletrodos), paralelas e espaçadas 14 metros entre si, que é a distância vertical entre as bermas, que permitiu cobrir toda a extensão da barragem com uma profundidade máxima de 70 m.

A barragem é constituída por um barramento com eixo curvo, no entanto, para as aquisições em campo foram dispostas linhas retilíneas para evitar alterações em profundidade. Em relação aos efeitos da topografia, existem algumas variações no comprimento das linhas, especificamente nas ombreiras da barragem.

O equipamento utilizado foi o resistivímetro ABEM Terrameter LS produzido na Suécia, de 84 canais, potência de 250W, resolução de 1 μ V e corrente máxima de 2,5 A (Figura 23). É um sistema de aquisição de dados para Potencial Espontâneo (SP), Eletrorresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP), onde a corrente elétrica é induzida artificialmente no subsolo por meio de eletrodos metálicos, que são cravados no substrato e conectados um a um ao longo do cabo multicanal, para que seja iniciado o processo de aquisição de dados (ABEM, 2016).

Figura 23 - Trabalho de aquisição de dados em campo



Fonte: Autor (2018). A) Conexão dos eletrodos metálicos ao cabo multicanal na crista da barragem; B) Aquisição de dados na berma do patamar dois da barragem; C) Equipamento resistivímetro ABEM Terrameter LS

Nesse estudo o equipamento é calibrado para medidas de resistividade por meio de ciclos periódicos de transmissão e recepção de sinais de baixa frequência, procedimento que permite a filtragem de ruídos do sinal adquirido. O instrumento permitiu a realização de ensaios de eletrorresistividade (ER), cálculo automático da resistência de contato e do desvio padrão do conjunto de medidas por meio do arranjo Schlumberger, recomendado para investigações onde o objetivo é observar a variação da resistividade em função da profundidade em estruturas rochosas (LOWRIE, 2007). Os dados são registrados automaticamente na memória interna do instrumento durante a aquisição e permite guardar os valores de resistividade aparente, posteriormente exportado para processamento no programa Res2dinv, útil para o estudo da resolução do modelo que pode ser obtido em diferentes estruturas e arranjos (ABEM, 2016).

Durante a aquisição dos dados houve algumas dificuldades na fixação dos eletrodos devido ao tipo solo rochoso, para a redução da resistência de contato, os eletrodos foram umedecidos, numa tentativa de melhorar a qualidade dos dados.

6.1. Processamento de dados 2D e 3D

O objetivo de um levantamento com base no método da eletrorresistividade é proporcionar informação detalhada sobre a distribução do parâmetro físico da resistividade elétrica em subsuperfície. Portanto, uma vez obtidas as pseudoseções a partir da técnica de Tomografía elétrica, os dados adquiridos durante os trabalhos de campo foram processados por meio do software Res2Dinv (2D), onde foram geradas representações dos valores quantitativos da resistividade modelada em subsuperfície. Os modelos de inversão são expressos em seções com base em suas variáveis de distância e profundidade, além de apresentar seus valores convertidos em escala gráfica em razão logarítmica (GRIFFITHS; BARKER, 1993).

O programa subdivide automaticamente o subsolo em vários blocos e, em seguida, utiliza uma modelagem estatística baseada no método de mínimos quadrados para determinar o valor de resistividade apropriado para cada bloco. Este programa permite modelos bidimensionais (2D) para o subsolo, a partir de dados obtidos através de levantamentos elétricos em termos de resistividade. É projetado para operar de maneira automática e robusta, além de detectar os dados de um perfil, destacando os pontos de referência incorretos para a remoção do conjunto de dados de forma manual. Seguidamente, o produto final é um modelo bidimensional a partir dos dados de resistividade obtidos através da técnica de tomografia elétrica (LOKE, 2000).

Após a inversão 2D, os produtos numéricos de cada seção são coletados em um arquivo único e, posteriormente utilizados para geração de modelos de visualização em 3D. Para tal fim, os modelos de cada linha 2-D foram individualmente exportados em formato xyz por meio do Res2dinv para fornecer seções cruzadas, que consiste em unir a posição das leituras ao longo das linhas (variável "x") junto com o espaçamento entre linhas (variável "y"), a profundidade modelada pela inversão (variável "z") e o valor da resistividade elétrica (variável "R"). Para a obtenção dos modelos 3D os arquivos foram importados para a plataforma Oasis Montaj Geosoft (versão 6.4), possibilitando a geração de mapas de profundidade a partir da secção do modelo em diferentes níveis que fornece resultados mais precisos em uma pesquisa de resistividade para as estruturas geológicas. Este procedimento já foi aplicado por diversos autores (CAMARERO, MOREIRA, PEREIRA, 2019; CASAGRANDE, MOREIRA, TARGA, 2019; CORTÊS et al., 2019; GRIFFITHS e BARKER, 1993; MOREIRA et al., 2017; MOREIRA et al., 2018).

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os modelos de inversão 2D e modelos de blocos 3D.

Os valores de resistividade são expressos em Ω .m através de uma escala cromática e logarítmica para que seja possível a análise da variabilidade dos valores de resistividade, onde os valores mais baixos na ordem de 5 Ω .m a 20 Ω .m (cores frias), representam porções de baixa resistividade (interpretados como zonas úmidas). Por outro lado, altos valores de resistividade, caracterizados pelo intervalo de 300 Ω .m a 600 Ω .m (cores quentes), perfazem as áreas mais resistivas, associadas à ausência de umidade.

Os modelos de inversão foram denominados de acordo com a numeração das linhas de aquisição: 1, 2 e 3, pertencentes à berma da crista da barragem; e 4 e 5 alocadas nas bermas dos taludes um e dois, a montante para jusante, respectivamente (Figura 24). As cotas entre 1315 m a 1280 m, pertencem ao barramento, logo embaixo ocorre embasamento rochoso, atingindo uma maior profundidade nas linhas 4 e 5. Os modelos mostraram padrões de alta resistividade nas porções superiores. As linhas 1, 2 e 3 apresentaram um horizonte superior resistivo de maior espessura com valores superiores a 600 Ω .m. e uma diminuição considerável dos valores de resistividade em função da profundidade (5 Ω .m), tanto no sentido de montante para jusante quanto lateralmente, como é indicado nas zonas de realce. As linhas 1 (entre as distâncias de 35 m e 75 m), 2 (de 29 m a 71 m e 99 m a 120 m) e 3 (entre 34 m e 44 m, lateralmente), representam os pontos mais significativos que podem estar relacionados à existência de fluxos hidrológicos. Nestes pontos, da linha 1 para a linha 2 e da linha 2 para linha 3, é possível observar a continuidade do fluxo hídrico, em sentido lateral, a partir de 1.290 m na elevação, o que indica um possível acúmulo de água.

A linha 4 apresenta uma cobertura superior caracterizada por alta resistividade, que compreende as cotas pertencentes ao barramento. A partir dos 1280 m na elevação, a jusante (embasamento rochoso) é possível observar valores de baixa resistividade e uma porção bem definida (localizada entre 45 m e 60 m) caracterizada por valores de até 20 Ω .m, associada à presença de água (Figura 24). Contudo, a referida anomalia não apresenta uma porção significativa associadas a grandes volumes de fluxo hídrico. Por sua vez, a linha 5 apresenta maior predominância de baixa resistividade, com destaque para duas porções da ordem de 20 Ω .m localizadas entre as distancias de 9 m a 30 m e 84 m a 90 m .



Figura 24 - Modelos de inversão de tomografia elétrica 2D com realce das zonas de baixa resistividade

Fonte: dados de pesquisa

A faixa de resistividade definida pelos valores de $39 \ \Omega$.m a $300 \ \Omega$.m entre as cotas 1.315 m a 1.280 m, pertencentes ao barramento, pode ser relacionada aos materiais do sistema drenante, como o núcleo argiloso compactado de montante e de jusante e o sistema de transição (areia e brita), conectados ao tapete drenante, que são materiais menos resistivos. De forma análoga, as anomalias de elevada resistividade, observadas na cobertura superior dos modelos, foram associadas ao substrato rochoso ou enrocamento.

É possível observar nos modelos de inversão que a resistividade diminui em função da profundidade. Assim as linhas 1e 2 a partir dos 1290 m na elevação apresentam os valores mais baixos de resistividade localizados nas laterais da barragem em maior profundidade, que indica um volume significativo de água quando comparadas com as linhas 3, 4 e 5. No entanto, de acordo com a figura 22, nas laterais da barragem predomina o embasamento rochoso, assim, levando em conta a construção do barramento e as cotas, é provável que o maior volume de água na forma de fluxo hidrológico ocorra no interior do maciço rochoso, logo abaixo da barragem. Tal fato será esclarecido e discutido posteriormente, baseado nos resultados dos modelos de visualização 3D.

Conforme detalhado no capítulo de processamento dos dados, os produtos de inversão das linhas de aquisição foram interpolados e deram origem ao modelo tridimensional. Num primeiro momento, foi gerado um modelo de blocos 3D com vista frontal, traseira e basal da barragem.

Com os modelos de interpolação 3D em mãos, é possível identificar com maior clareza as zonas de fluxo de água na área de estudo. A figura 25 apresenta o referido modelo de visualização 3D na forma de blocos em diferentes vistas.

Em vista frontal (Figura 25 A) é possível observar anomalias caracterizadas por altos valores de resistividade (300 Ω .m a 600 Ω .m) nas seções superiores pertencentes ao maciço de enrocamento, haja vista sua relação com o desenho da estrutura. Outra característica é o aumento de zonas de baixa resistividade (15 Ω .m a 35 Ω .m) com a profundidade, em especial nas laterais, o que indicaria a presença de acúmulo de água nos extremos da barragem.

Os pontos realçados representam porções caracterizadas pelos valores mais baixos de resistividade (5 Ω .m a 9 Ω .m), compreendidos como zonas úmidas. Na lateral esquerda é localizado um volume significativo de água comparado com a lateral direta. No entanto, a vista traseira (Figura 25- B) permite observar com maior clareza dois pontos de baixa resistividade na porção central, associados a um grande fluxo de água, a partir dos 1.290 m. De forma complementar, as vistas da base frontal e traseira (Figura 25- C e D) sugerem que esse fluxo ocorre

de montante para jusante (NW para SE), conforme indicado pelas setas.

Figura 25 - Modelo de blocos 3D de tomografia elétrica, com diferentes perspectivas e realce das zonas de baixa resistividade, com setas de sentido de fluxo



Fonte: Dados de pesquisa

É importante ressaltar que o maior volume de água flui no interior do maciço rochoso abaixo da barragem e em sua lateral esquerda (1), uma vez que a construção do barramento, na elevação de 1290 m (30 m de profundidade) nas laterais da barragem, ocorre o embasamento rochoso. Tal fato é de extrema importância para a pesquisa, tendo em vista que a localização de tal infiltração ocorre do mesmo lado do maciço fraturado que apresenta a surgência (Figura 22).

No mesmo conjunto de figuras foi identificada outra zona significativa de resistividades entre 70 Ω .m e 20 Ω .m, na lateral direta da barragem (Figura 25- A). Embora não aponte para uma presença e continuidade de fluxo de água nas seções superiores, é possível identificar uma zona menos resistiva na superfície do barramento que diminui em função da profundidade. Tal característica pode estar associada com presença de infiltração por fratura no meio poroso.

Na vista da base frontal e traseira (Figura 25- C e D), é observado ainda um ponto de 9 Ω .m, de menor volume (2), que indica a presença de água . No entanto, de acordo com a elevação, tal volume de água é correlacionado ao interior do maciço rochoso, abaixo da barragem. A existência deste fluxo está relacionada, provavelmente, à baixas resistividades localizadas nas seções superiores pelo fenômeno de capilaridade ou à presença de fraturas que favorecem a infiltração, cujo fato é analisado através do modelo de mapas multiníveis gerados pelo modelo de interpolação 3D apresentado na Figura 26.

Na figura 26, foi produzido um modelo mais detalhado da barragem, onde foram selecionadas camadas de resistividade a cada dez metros de profundidade, visando estudar o interior do barramento.

No modelo de mapas multinivel o traço curvo indica a localização do tapete de drenagem horizontal, que segue o desenho da estrutura, assim os traços transversais representam o limite lateral do dique e, obviamente, o predomínio do maciço rochoso nas extremidades do modelo.

De acordo com a Figura 26 – D, a barragem apresenta zonas de baixa resistividade em quatro pontos relevantes que indicam a presença de água, sendo que dois desses pontos estão localizados dentro do barramento. No entanto, a função do tapete drenante é a retenção do fluxo de água percolada através da barragem e pela fundação sem que a água cruze o corpo do barramento. As imagens 26 - D e E mostram que o fluxo hídrico é barrado no meio do caminho, exatamente onde está localizado o tapete drenante, o qual aponta para o adequado funcionamento do sistema.

Conforme foi mencionado anteriormente, a lateral direta da barragem apresenta uma região menos resistiva nas porções superiores do barramento com valores de até 20 Ω .m na região frontal do tapete drenante, conforme indicado pelo realce 1 na imagem B, a qual acresce com a profundidade (Imagens C a G). Nas imagens E e F é indicada ainda uma região 2 que conta com valores de resistividade da ordem de 6 Ω .m a 10 Ω .m, o que indica a presença de água. A partir da análise das imagens F e G é possível notar que o caminho do fluxo é em sentido lateral, de NE para SW, em maior profundidade.

Na lateral esquerda da barragem está a seção menos resistiva (5 Ω .m a 9 Ω .m), o que representaria, conforme já mencionado, um significativo volume de água, com aumento no sentido NW para SE em função da profundidade.



Figura 26 - Mapas de resistividade multinível a cada dez metros de profundidade

Fonte: Dados de pesquisa

As imagens D e E sugerem três pontos caracterizados por baixos valores de resistividade: nas laterais e na porção central. A presença de tais anomalias, interpretadas como fluxos hidrológicos que ocorrem na base do barramento e no interior do maciço rochoso, sugerem as seguintes hipóteses como origem:

- Um maciço rochoso constitui um sistema heterogêneo, essencialmente composto por descontinuidades localizadas e definidas por fraturas. O fluxo de água no interior do maciço rochoso, abaixo e nas laterais da barragem, pode ser presumido através dessas descontinuidades que favorece a permeabilidade em determinadas zonas de fratura.

- A água é o agente natural que constitui um dos fatores mais importantes no surgimento de instabilidades de barragens e seu deslocamento a grandes distâncias no maciço rochoso pode ter influência nos materiais permeáveis. Deste modo, a permeabilidade é dada em função da densidade de fraturamento e estruturas geológicas, sendo sua variação em função de diferentes direções um fator importante, uma vez que as descontinuidades se agrupam em famílias com direções preferenciais que possibilitam a canalização do fluxo de água, desde que haja conectividade entre as descontinuidades.

Assim, as imagens E a G da figura 26 sugerem a relação da surgencia reconhecida em superfície com o barramento, uma vez que a junção dos produtos geofísicos e o estudo estrutural prévio na zona de surgencia a jusante da barragem, indicou uma relação na direção das fraturas do afloramento (040/38 NW-SE) com a direção do caminho do fluxo no barramento (NW-SE). Desta forma, as surgências que ocorrem no afloramento a jusante da barragem de rejeitos da Mina Osamu Utsumi, podem ser decorrentes da infiltração e percolação de água do reservatório de rejeitos nas fraturas do embasamento rochoso, o que ocasiona a formação de fluxos hidrológicos que são extravasados pelas descontinuidades do afloramento.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação do método geofísico da Eletrorresisitividade apresentou resultados satisfatórios. A técnica da tomografia elétrica foi uma ferramenta importante na identificação de zonas de fluxo no interior do maciço rochoso abaixo da barragem. A combinação de medidas e modelamento dos dados através permitem um diagnostico claro de fluxos no interior do maciço rochoso, relacionados a surgências em rocha na base frontal do barramento.

As linhas de tomografia elétrica apontaram para padrões de alta resistividade (600 Ω .m) nas seções superiores, associadas ao tipo de solo rochoso ou de baixa umidade. Por outro lado, as resistividades mais baixas (5 Ω .m) indicaram a presença de zonas úmidas localizadas nas laterais da barragem, fora do tapete drenante, o que indica um adequado funcionamento do sistema.

Os estudos não mostraram evidências de *piping* no interior do barramento, o que descarta um risco de rompimento da barragem por este fator. O vertedouro da barragem, uma estrutura do tipo tulipa, configurava o maior fator de risco para o barramento. Porém um novo sistema, do tipo fluxo superficial, foi construído em maio de 2019 e o antigo foi isolado.

Os blocos de interpolação 3D permitiram reconhecer os caminhos de fluxo no interior do maciço rochoso abaixo da barragem. Na lateral esquerda da estrutura foi localizado maior volume de água que flui em sentido NW a SE, o que indica um fluxo no interior do maciço rochoso por meio de zonas de fratura com surgência na base frontal do barramento. Este fato é confirmado com a orientação do plano de fratura 040/38 NW-SE, estudado na zona de surgência, visível em campo.

Quanto a zona de surgencia, são recomendadas análises químicas da agua do local para comprovação de sua eventual relação com a agua da barragem, além do planejamento de um sistema de impermeabilização baseado no padrão estrutural e resultados geofísicos.

Em particular, o modelamento geofísico 3D foi uma ferramenta útil para a identificação de zonas de infiltração, previsão de falhas, além de perfazer um dos métodos de diagnóstico ambiental para o controle, monitoramento e avaliação antecipada de risco em barragens, visando evitar impactos negativos nos âmbitos sociais, econômicos e ambientais.

9. BIBLIOGRAFIA

ABEM. Instruction Manual: Terrameter LS. **ABEM Instrument AB**. Stockholm: 2016. 114p. Disponível em: < <u>https://www.guidelinegeo.com/wp-content/uploads/2016/03/User-Guide-Terrameter-LS-2016-03-14-1.pdf</u>>. Acesso em: 17 de ago. 2018.

ANA- Agência Nacional de Águas, 2017. Apresenta **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens.** Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p. Disponivel em: <<u>https://www.ana.gov.br/regulacao/outorga-e-fiscalizacao/barragens/inspecao-de-barragens-</u> 1/colecao-de-documentos-relacionados-inspecao-de-seguranca>. Acesso em: 12 Nov. 2019

ANA- Agência Nacional de Águas. Apresenta Sistema Nacional de Informações sobre SegurançadeBarragens(SNISB):LegislaçãoAplicada.Disponível em:<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/downloads/legislacao-aplicada>. Acesso em: out. 2019

AL-FARES, W. Application of electrical resistivity tomography technique for characterizing leakage problem in Abu Baara Earth Dam, Syria. International Journal of Geophysics, Volume 2014. ID 368128 http://dx.doi.org/10.1155/2014/368128.

ALBUQUERQUE, R et al. Caracterização de barragens de rejeito usando geofísica rasa: aplicação na Barragem B1 de Cajati, São Paulo. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, 2019. DOI: <u>http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_567_579</u>.

CAMARERO, P.; MOREIRA, C.A.; PEREIRA, H. Analysis of the physical integrity of earth dams from electrical resistivity tomography (ERT) in Brazil. Pure and Applied Geophysics, 2019. <u>https://doi.org/10.1007/s00024-019-02271-8</u>.

CANOPI, H.L. Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas impactadas pela drenagem ácida da mina de urânio - Osamu Utsumi, Planalto de Poços de Caldas (MG). 2017. 198p. Trabalho de conclusão do curso tese (Doutor em Geociências) Programas de pós-graduação de Geologia e Recursos Naturais, Universidad Estadual de Campinas, 2017.

CASAGRANDE, M.F; MOREIRA, C.A; TARGA, D. Study of Generation and Underground Flow of Acid Mine Drainage in Waste Rock Pile in an Uranium Mine Using Electrical Resistivity Tomography. Pure and Applied Geophysics, 2019, DOI: 10.1007/s00024-019-02351-9.

COULIBALY, Y.; BELEM, T.; CHENG, L. Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27 (2017) 701–710 http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.012.

CORTÊS, A.R et al. Geophysical and Metalogenetic Modelling of the Copper Occurrence in Camaquã Sedimentary Basin, Brazilian Southern. Pure and Applied Geophysics, 2019, DOI: 10.1007/s00024-019-02190-8.

CHIOSSI, N.J. Geologia de Engenharia. 3.ed. São Paulo, Rua Cubatão,798: oficina de textos, 2013. 424p.

CNEN- Comissão Nacional de Energia Nuclear. National Report of Brazil 2017 for the 6th Review Meeting of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. 2015. Disponível em <<u>http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/drs/relatorios-de-convencao/National-Report-of-Brazil-2017.pdf</u> >. Acesso em: 10 nov. 2019.

CNEN- Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Normas**. 2015. Disponível em <<u>http://www.cnen.gov.br/normas-tecnicas</u> >. Acesso em: 9 ago. 2019

FRANKEL, M. O et al. 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, 1985, p. 89-103.

FRANKLIN, M. R. **Modelagem Numerica do Escoamento Hidrológico e dos Processos Geoquímicos Aplicados à Previsão da Drenagem Ácida em uma Pilha de Estéril da mina de Urânio de Paço de Caldas-MG.** 2007. 358 P. Trabalho de conclusão do curso tese (Doutor em Ciências em Engenharia Civil). Programas de pós-graduação de engenharia da universidade federal do Rio de Janeiro. 2007.

GONZALES de VALLEJO, L.I et al. **Ingeniería Geológica**. Madrid: pearson education, 2002. 715p.

GRIFFITHS, D.H. and BARKER, R.D. **Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology.** In: R. Cassinis, K. Helbig and G.F. Panza (Editors), Geophysical Exploration in Areas of Complex Geology, I. J. Appl. Geophys., 1993, 29:211-226.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. Física. Rio de Janeiro: ao livro técnico S.A, 1968. 1440p.

IBAMA- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renovables. Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG. 2018.
Disponível em: <<u>http://www.ibama.gov.br/informes/rompimento-da-barragem-de-fundao</u>>. Acesso em: 9 mar. 2018.

IBAMA- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renovables. Apresenta informações em **O que e segurança de barragens**. 2017. Disponível em: <<u>http://www.ibama.gov.br/emergencias-ambientais/seguranca-de-barragens/o-que-e-seguranca-de-barragens</u>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

IBAMA- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renovables. Apresenta informações sobre TAC garante saneamento e recuperação de 42 mil hectares de áreas protegidas na bacia do Rio Doce 2017. Disponível em: < <u>http://www.ibama.gov.br/noticias/58-2016/107-tac-garante-saneamento-e-recuperacao-de-42-mil-hectares-de-areas-protegidas-na-bacia-do-rio-doce</u> >. Acesso em: 10 mar 2018.

IBAMA- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renovables. Apresenta **Legislação- Emergências Ambientais**. Disponível em: < <u>http://www.ibama.gov.br/emergencias-ambientais/legislacao</u>>. Acceso em: 20 jun. 2018.

IBAMA- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renovables. Apresenta **Rompimento de barragem da Vale em Brumadinho (MG) destruiu 269,84 hectares.** . Disponível em: <<u>https://www.ibama.gov.br/noticias/730-2019/1881-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg-destruiu-269-84-hectares</u> >. Acceso em: 15 de abr. 2019.

INB-Industrias Nucleares de Brasil. Apresenta **informações em Licenciamento.** Disponível em: < <u>http://www.inb.gov.br/pt-br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Meio-Ambiente/Licenciamento</u>>. Acceso em: 30 jul. 2018.

INB- Industrias Nucleares de Brasil. **Projeto Executivo da Barragem de Rejeitos da Mina Osamu Utsumi, UTM-Caldas**. 2012, 9p

INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. Manual de ingeniería de taludes. Serie: Ingeniería Geo Ambiental. Rio Rosas, 23-28003 MADRID. Rueda (España) y Limusa-Wiley (México), 1987. 451p.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. An Introduction to Geophysical Exploration. 3. Ed. [s.l.]. Wiley-Blackwall Science Ltd, 2002.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to Geophysical exploration**. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 429 p

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H-J. Environmental Geology: Handbook of field methods and case estudes. Springer, 2007. 1357p.

LEWIS, B. **Small Dams: Planning, Construction and Maintenance**. Melbourne, Australia: CRC Press: Taylor & Francis Grou, 2014.191p.

LIN, C.P et al. Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography, Journal of Geoengineering, 2013, vol. 8, No. 2, 61-70 pp.

LOKE, M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. 2000, 61 p.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. 2.ed. New York: Cambridge University Press, 2007. 381 p.

MAINALI, G. Monitoring of Tailings Dams with Geophysical Methods. Luleå University of Technology. Department of Chemical Engineering and Geosciences, 2006, 74p.

MOREIRA C.A et al. Resistivity investigation in a fractured aquifer system contaminated by leachate from an old dump, Geofísica Internacional, 2017, 56-4: 345-358.

MOREIRA, A.C et al. Reassessment of Copper Mineral Occurrence Through Electrical Tomography and Pseudo 3D Modeling in Camaquã Sedimentary Basin, Southern Brazil. Pure and Applied Geophysics, 2018, doi.org/10.1007/s00024-018-2019-2.

MUSSETT, A.E.; KHAN, M.A. Looking Into the Earth: An Introduction to Geological Geophysics. New York: Cambridge University Press, 2000, 470 p.

OLIVEIRA, A. P. Estimativa Simultânea de Parâmetros Hidráulicos e de Transporte em Estéreis de Mineração de Urânio. 2010, 163 p. Trabalho de conclusão do curso tese (Doutor em Engenharia Mecânica). Programas de pós-graduação em engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2010.

OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A. Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. 587 p.

ORELLANA, E. Geofísica Minera. Madrid, 1972. 376 p.

TAIOLI, F. et al. **Conciderações sobre a utilização de técnicas de investigações indiretas em geología de engenharia**. In: Congreso Brasilero de geología de engenheria. Poço de Caldas, 1993. p.365.