



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – UNIDADE ARAXÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL**

ISABELA VASCONCELOS LEITE DE FREITAS

**MONITORAMENTO DE BARRAGEM DE REJEITOS DE
MINERAÇÃO DE FERRO: CORRELAÇÕES ENTRE DADOS
GEOFÍSICOS E GEOTÉCNICOS**

**ARAXÁ – MINAS GERAIS
2023**

ISABELA VASCONCELOS LEITE DE FREITAS

**MONITORAMENTO DE BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO:
CORRELAÇÕES ENTRE DADOS GEOFÍSICOS E GEOTÉCNICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do CEFET-MG, na área de Geotecnia e Geologia de Engenharia, na linha de Pesquisa em aplicação de geossintéticos em mineração e meio ambiente, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Hersília De Andrade e Santos.

**ARAXÁ – MINAS GERAIS
2023**

F866m Freitas, Isabela Vasconcelos Leite de.
Monitoramento de barragem de rejeitos de mineração de ferro:
correlações entre dados geofísicos e geotécnicos / Isabela
Vasconcelos Leite de Freitas. – 2024.
65 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Hersília de Andrade e Santos.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica
de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Minas, Araxá, 2024.
Bibliografia.

1. Barragens de rejeitos – Teses. 2. Eletrorresistividade – Teses. 3.
Análise temporal - Teses. 4. Piezometria - Teses. I. Santos, Hersília de
Andrade e. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais. IV. Título.

CDU 624.136

RESUMO

As barragens de rejeitos de minério de ferro devem ser constantemente monitoradas para fins de segurança. Entre os aspectos monitorados tradicionalmente estão os aspectos geotécnicos como por exemplo níveis piezométricos ao longo do barramento. Recentemente, a geofísica, ciência que estuda entre outros aspectos processos dinâmicos da Terra, tem contribuído para o monitoramento não invasivo por meio dos métodos de eletrorresistividade. Os métodos geofísicos fornecem uma quantidade elevada de dados em amostragem relativamente rápidas, mas há pouca informação sobre a integração das técnicas tradicionais de geotecnia com as geofísicas. Este trabalho, portanto, teve como objetivo avaliar a relação entre dados geofísicos, monitorados entre maio de 2022 e março de 2023 a cada 15 dias, com dados geotécnicos de uma barragem de rejeitos de minério de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero. O método geofísico empregado foi imageamento elétrico bidimensional com arranjo Schlumberger e foram empregadas análises de variância e regressão múltipla para avaliar a relação entre valores de resistividade, nível de piezômetro, tempo da amostragem e pluviometria. A eletrorresistividade foi explicada significativamente pela piezometria. Já o tempo de amostragem e a pluviometria não explicou significativamente a eletrorresistividade. Portanto, os padrões eletro resistivos da barragem não sofreram alteração significativa com o tempo e a chuva local não implica numa resposta imediata da resistividade. Essas conclusões podem subsidiar novas direções em decisões sobre o monitoramento de barragens de rejeito de minério de ferro e, portanto, contribuir para avanços na segurança de barragens no setor da mineração.

Palavras chaves: Eletrorresistividade, precipitação, análise temporal, piezometria.

ABSTRACT

Iron ore tailings dams must be constantly monitored for safety purposes. Among the aspects traditionally monitored are geotechnical aspects such as piezometric levels along the dam. Recently, geophysics, a science that studies, among other things, dynamic processes in the Earth, has contributed to non-invasive monitoring using electro-resistivity methods. Geophysical methods provide a large amount of data in relatively quick samples, but there is little information on the integration of traditional geotechnical and geophysical techniques. This work therefore aimed to evaluate the relationship between geophysical data, monitored every 15 days between May 2022 and March 2023, and geotechnical data from an iron ore tailings dam located in the Iron Quadrangle. The geophysical method used was two-dimensional electrical imaging with a Schlumberger array and analysis of variance and multiple regression were used to evaluate the relationship between resistivity values, piezometer level, sampling time, and rainfall. Electroresistivity was significantly explained by piezometry while sampling time and rainfall did not significantly explain electroresistivity. Therefore, the dam's electroresistivity patterns have not changed significantly over time and local rainfall does not imply an immediate response in resistivity. These conclusions can support new directions in decisions about monitoring iron ore tailings dams and therefore contribute to advances in dam safety in the mining sector.

Keywords: Electrical resistivity, precipitation, time analyses, piezometry

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivo geral	4
1.2.	Objetivos específicos	4
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	Barragem	4
2.2.	Classificação de Barragens conforme os materiais de construção	5
2.3.	Classificação de Barragens de rejeito quanto o tipo de alteamento	10
2.4.	Segurança de Barragens	11
2.5.	Tipos de Instrumentos	15
2.5.1.	Pluviômetros	16
2.5.2.	Régua de Reservatório	16
2.5.3.	Medidores de nível de água	17
2.5.4.	Medidor de vazão	17
2.5.5.	Piezômetros	18
2.5.6.	Inclinômetros	19
2.5.7.	Marcos superficiais	20
2.5.8.	Radares satelitais	21
2.5.9.	Radares interferométrico terrestre	21
2.5.10.	Estações totais robotizadas	22
2.5.11.	Sismógrafos de engenharia	22
2.5.12.	Instrumentos para acionamento automático de sirenes	23
2.6.	Critério para instalação de instrumentos	24
2.7.	Métodos Geoelétricos e Eletromagnéticos	25
2.7.1.	Eletrorresistividade(ERT)	25

2.8.	Potencial espontâneo	28
2.9.	Utilização de métodos geofísicos aplicados no estudo de caracterização de barragens	29
3.	METODOLOGIA	31
3.1.	Localização	31
3.2.	Geologia regional	32
3.3.	Hidrografia	34
3.4.	Características Gerais da Estrutura	34
3.5.	Levantamentos de dados geotécnicos de campo	35
3.6.	Levantamentos geofísicos de campo (eletrorresistividade e potencial espontâneo)	38
3.7.	Levantamentos geofísicos de campo (eletrorresistividade) periódico	39
3.8.	Construção do banco de dados	41
3.9.	Análises estatísticas	43
4.	RESULTADOS	44
4.1.	Avaliação qualitativa dos dados	45
4.2.	Avaliação quantitativa dos dados	57
4.1.1	Resultados ANOVA	57
4.1.2	Resultados Regressão Linear Múltipla sem Interação	58
4.1.3	Resultados Regressão Linear Múltipla com Interação	58
5.	DISCUSSÃO	59
6	CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE AVALIAÇÕES FUTURAS	60
	REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

A atividade humana está intimamente ligada a utilização de recursos naturais e a exploração mineral é importante para o desenvolvimento da economia, população etc. Em complexos minerários são construídas estruturas com o objetivo de apoiarem o processo de beneficiamento do minério dentre as quais se destacam: cavas, pilhas de estéril, barragens de rejeitos, barragens para contenção de sedimentos.

As barragens são estruturas construídas em todo o mundo há séculos, podendo ser de diferentes tipos de materiais e ter finalidades diversas. Falhas de barragens de rejeitos vêm ocorrendo nos últimos anos. Muitas dessas falhas causaram fatalidades destruição de propriedades, danos ao meio ambiente e enormes perdas econômicas para a indústria de mineração (Mainali, 2015). Desde 2000, 27 grandes falhas de barragens de rejeitos foram relatadas no mundo (WISE, 2014), incluindo a de Fundão e Córrego do Feijão no Brasil.

O monitoramento da barragem é essencial para conhecer o estado existente das barragens e garantir a segurança da barragem ao longo de sua vida útil. Usualmente, essas estruturas são monitoradas através de instrumentos e inspeções visuais frequentes (Machado, 2007). Segundo o mesmo autor, os instrumentos mais comuns são marcos superficiais, inclinômetros, indicadores de nível d'água (INAs), piezômetros e estações meteorológicas. Estes inspecionam deslocamentos no maciço, deformações e tensões, erosões, níveis piezométricos na fundação, pressões e vazão de água. Por conseguinte, é através dessa instrumentação e das inspeções visuais que é monitorado o desempenho das estruturas e da fundação durante a fase de construção e enchimento do reservatório.

Apesar desses métodos diretos serem eficientes e já bastante tradicionais na indústria da mineração, oferecem apenas dados pontuais sobre a barragem. O mesmo não ocorre com métodos geofísicos. Estes geram imagens contínuas de subsuperfície, possibilitando a identificação de possíveis irregularidades na estrutura da barragem (Oliveira, 2018).

O uso de técnicas geofísicas é geralmente preferido em relação a outros métodos devido à sua natureza não destrutiva e custo-benefício. (Mianali, 2015). A Geofísica pode ser definida, como: “a ciência que se ocupa do estudo das estruturas do interior da Terra e da localização nesta, de corpos delimitados pelos contrastes de alguma de suas propriedades físicas com as do meio circundante, usando medidas tomadas na sua superfície, interior de furos de sondagens e levantamentos aéreos” (Orellana, 1972 apud Braga, 2006).

Os principais fenômenos físicos que ocorrem no interior da Terra, nos quais a Geofísica se baseia, estão ligados ao: campo magnético terrestre; fluxo geotérmico; propagação de ondas sísmicas; gravidade; campos elétricos e eletromagnéticos; correntes telúricas, e; radioatividade. Em função do parâmetro físico estudado, a Geofísica pode ser dividida em quatro grupos de destaque, que podem ser denominados de métodos maiores: gravimétrico, magnetométrico, geoeletricos e sísmicos. (Braga, 2005). Os métodos geoeletricos incluem a eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo (Telford et al., 1990). Com exceção do método de potencial espontâneo, que mede o potencial natural em subsuperfície, todos os outros dependem da transmissão elétrica da corrente para o solo (Dentith & Mudge, 2014).

A eletrorresistividade é um método que emprega uma corrente artificial, introduzida por dois eletrodos (denominados A e B) em um terreno, com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados M e N) na proximidade dos fluxos de corrente, permitindo assim determinar a resistividade real ou aparente em subsuperfície (Iago et al. 2006). Neste trabalho este método foi executado através do arranjo dipolo-dipolo, que possibilita a utilização de diversos eletrodos de recepção (M e N) ao longo da linha de aquisição. (Rodrigues, 2018). Já o Potencial Espontâneo (PS) é um método geofísico passivo, que mede variações naturais do potencial elétrico devido à polarização espontânea da terra, cujas causas são diversas (Telford et al., 1990).

Métodos geofísicos têm sido usados para estudar as condições das barragens (por exemplo, Butler et al; 1990; Al-Saigh et al; 1994; Carlsten et al; 1995; Panthulu et al; 2001; Titov et al; 2000 e Sjödaahl et al; 2005). Em tais condições, as mudanças de potencial natural na subsuperfície são normalmente causadas por movimentos de água através da barragem e as mudanças de resistividade refletem as mudanças nas propriedades elétricas dos materiais da barragem. Portanto, medir o potencial natural ao longo do tempo é um método poderoso para detectar vazamentos e medições de resistividade de séries temporais fornecem informações valiosas sobre mudanças nas condições da barragem ao longo do tempo, tais como pontos de presença de água.

A seguir apresentaremos a aplicação de métodos geofísicos em diversos estudos aplicados a barragem de rejeitos:

Zarroca et al (2015), no equador valeu-se de levantamentos de potencial espontâneo e eletrorresistividade para mostrar a capacidade da imagem de resistividade elétrica (ERT) de identificar subsolo recursos que podem afetar uma futura barragem de rejeitos previsto para construção no Distrito Mineiro de Zaruma-Portovel. Os perfis de ERT foram reunidos e processados com o objetivo de obter imagens de resistividade com resolução suficiente para uso geotécnico.

Coulibaly et al (2017) utilizou o método de eletrorresistividade com o objetivo de modelar barragem de rejeitos com a integração de dados geofísicos para prever reforço em dique.

Mainali et al (2016) realizou estudos também em barragens de rejeito para testar a aplicabilidade da resistividade elétrica e auto potencial (SP), para detectar infiltrações anômalas através de barragens de rejeitos de minas na Suécia e monitorar a condição física da barragem.

Nikonow et al (2019) utilizou de eletrorresistividade para realizar amostragem de superfície com poucas perfurações, análise geoquímica e granulométrica. Os dados fornecem informações importantes para uma rápida decisão sobre a viabilidade econômica de uma exploração mais detalhada ou mesmo mineração secundária. Para entender a estrutura interna das barragens de rejeitos, a coleta de informações 1D e 2D de amostragem e perfuração deve ser acompanhada de mapeamento de resistividade 3D.

No Brasil, Oliveira (2018) realizou a integração de dados geofísicos com dados geotécnicos com o objetivo de demonstrar a aplicabilidade de métodos elétricos (eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo) para a caracterização de barragens de rejeito e seu conseqüente monitoramento. Rodrigues (2018) demonstrou como a utilização de métodos geofísicos pode fornecer uma instrumentação complementar ao monitoramento direto já existente da Barragem BR.

Apesar do aumento do emprego de métodos geofísicos em estudos internacionais e nacionais relacionados a barragem de rejeitos, raros trabalhos apresentam análise integrada de dados geofísicos com informações geotécnicas dessas estruturas. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia para correlacionar informações geofísicas de

uma barragem de rejeito de minério de ferro com dados de monitoramento periódico geotécnico por meio de correlações estatísticas.

Variações das propriedades físicas dos materiais constituintes de uma barragem de rejeitos podem levar a perda de rigidez e essa ser associada a alterações internas nas estruturas que, se forem detectadas de forma precoce, podem fornecer subsídios para tempo de resposta ao emprego de intervenções mais ágeis. Dessa forma tais variações serão associadas a variações das condições das estruturas e a inspeções visuais para interpretação completa da condição dela.

1.1. Objetivo geral

Em linhas gerais o objetivo da pesquisa é avaliar a relação entre dados geofísicos e geotécnicos de uma barragem de rejeitos, com levantamentos periódicos de ambos os dados.

1.2. Objetivos específicos

São objetivos específicos do presente estudo:

- Verificar os dados geotécnicos que melhor explicam as informações geofísicas coletadas numa barragem de rejeito de minério de ferro;
- Identificar possíveis melhorias em termos de monitoramento de dados geofísicos, considerando o poder das correlações encontradas através de avaliações estatísticas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Barragem

De acordo com Lima (2019), as barragens são estruturas construídas em cursos de água que têm como objetivo reter e controlar o fluxo, sendo utilizadas para diversas finalidades. Embora não haja registros da primeira estrutura construída no mundo, acredita-se que foi elaborada com o intuito de armazenar água evitando a escassez nos períodos de seca. Devido aos últimos acidentes no Brasil envolvendo grandes estruturas tornou-se necessário a pesquisa de diferentes formas de monitoramento. A utilização de monitoramentos pontuais pode gerar uma falsa sensação de segurança. Para tanto, propõem-se a utilização de métodos geofísicos no

intuito de verificar propriedades físicas internas à estrutura, fazendo com que o monitoramento tenha uma maior abrangência.

De acordo com Freitas et al (2021) barragem é uma barreira artificial, feita em cursos de água para a retenção de grandes quantidades de água ou armazenamento de outros materiais, tal como os rejeitos, por exemplo. É uma estrutura amplamente utilizada em diversos setores econômicos tais como, na geração de energia, armazenamento de água, rejeitos ou clarificação de água para controle ambiental, dentre outros fins menos relevantes.

De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), os principais benefícios das estruturas estão atrelados a: abastecimento de água, irrigação, controle de cheias, regularização de vazões, contenção de rejeitos, navegação interior, piscicultura, paisagismo e urbanismo e dessedentação.

O conceito de barragem de Mineração, a luz da portaria 70.389 (ANM, 2019) corresponde a barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos de mineração

No Brasil, a principal fonte regulamentadora para a elaboração e apresentação do projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água é a NBR 13028 (ABNT NBR 13028, 2017) – norma que recomenda a adoção de premissas básicas a serem seguidas durante o projeto de barragens de rejeitos.

Conforme (ABNT NBR 13028, 2017), o termo barragem de mineração é aplicado a barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração ou descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas.

As barragens podem ser utilizadas para contenção de rejeitos, clarificação de água, controles ambientais, entre outros. Cada tipo de barragem necessita de uma característica específica, por exemplo, geralmente para contenção de rejeitos são necessários grandes volumes de reservatórios.

2.2. Classificação de Barragens conforme os materiais de construção

De acordo com ABGE (2018), as barragens podem divididas em quatro grandes grupos: barragens de concreto, as barragens de terra, de enrocamento e de rejeitos. A barragens de concreto (Figura 1) são feitas de concreto maciço convencional vibrado (CCV) ou com a técnica de concreto compactado a rolo. Nela, o peso da estrutura é capaz de resistir ao empuxo horizontal hidrostático e a outros esforços secundários como os dinâmicos, devido a sismos ou a empuxos de aterro submerso, formado pelo assoreamento do reservatório. Elas são subdivididas pelo mesmo autor em: gravidade, gravidade aliviada e contraforte, arco (ABGE, 2018).

Figura 1 : Desenho esquemático de Barragem de Concreto.
 Fonte:Flickr (2012)



As barragens de terra são comumente construídas de materiais disponíveis próximos a região de implantação ou de áreas de empréstimo vizinhas. Elas podem ser do tipo homogênea (construída de material único, com exceção de drenagens internas), zonada (aquela que utiliza mais de um material de construção (ABGE, 2018).

Já as barragens construídas por enrocamento (Figura 2), material que se deriva de blocos de rocha oriundo de escavações adjacentes ou pedreiras específicas. É necessário para esse tipo de construção a análise da presença de finos e do tamanho de blocos que podem interferir no tamanho da camada a ser compactada.

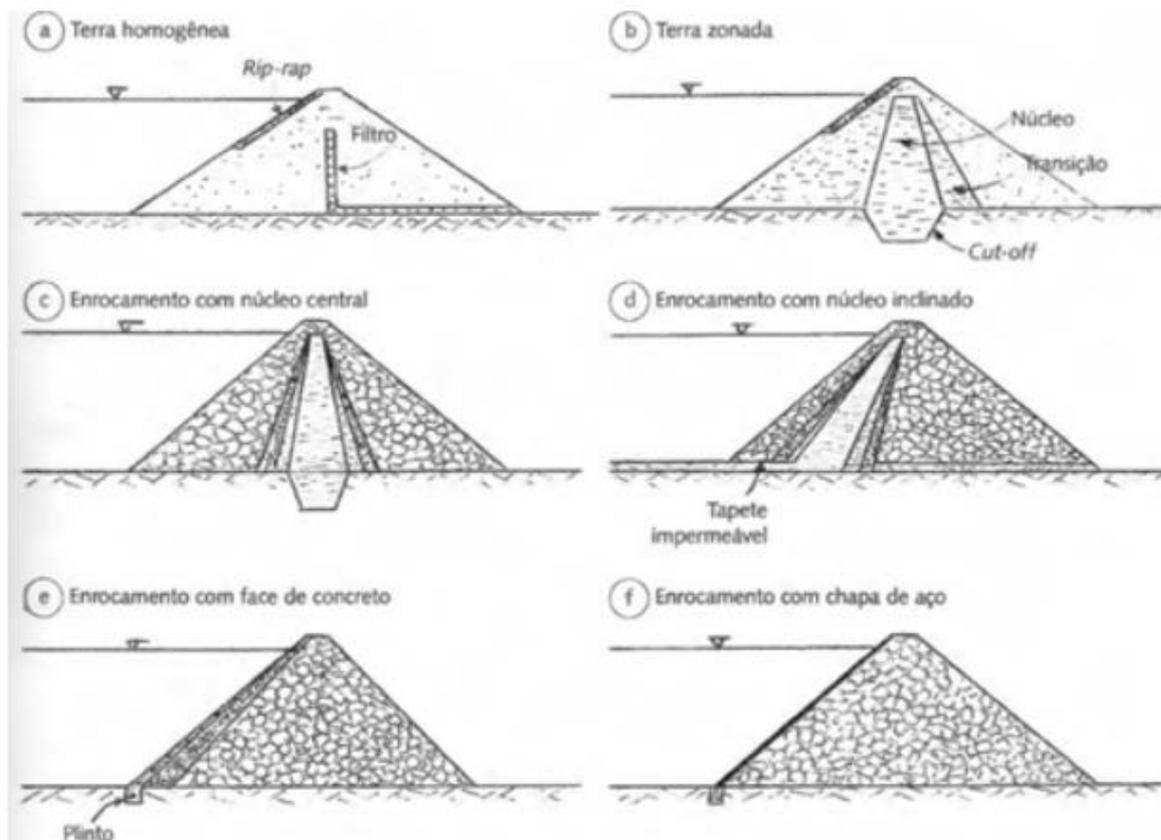
Figura 2 : Barragem construída por enrocamento.

Fonte: EngWhere(2018)



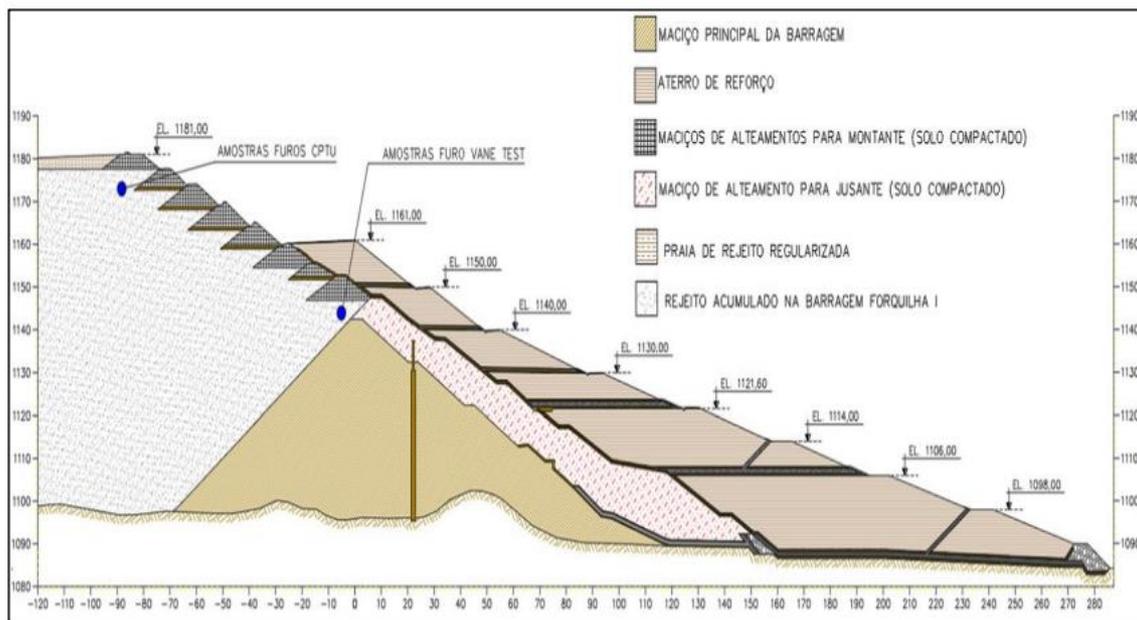
Assim como as barragens de terra, existem as barragens de enrocamento com núcleo em solo, com face de concreto, com membrana impermeável a montante e selo argiloso a montante (ABGE, 2018). A Figura 3 apresenta as principais seções de barragem.

Figura 3 : Principais seções transversais de Barragens. Fonte: Site geológico(2023)



As barragens de rejeito (Figura 4) são estruturas destinadas a retenção de rejeitos de mineração e se diferenciam das demais por terem uma vida limitada porque, uma vez cheias, perdem a sua função. Como os rejeitos contêm líquidos, a segurança barragem depende, dentre outros fatores, do controle destes fluidos pela barragem e suas fundações (ABGE, 2018).

Figura 4 : Seção de Barragem de Rejeitos.
Fonte: Miranda (2018)



2.3. Classificação de Barragens de rejeito quanto o tipo de alteamento

Quanto a classificação de alteamento as barragens podem ser definidas como alteamento a montante, a jusante e por linha de centro. Caso a estrutura seja construída em apenas uma vez, define-se como etapa única.

As barragens são denominadas alteadas a montante quando o corpo da barragem é construído com o uso de rejeito através de alteamentos sucessivos sobre o próprio rejeito depositado. Os alteamentos são realizados no sentido contrário ao fluxo de água (montante). O rejeito grosso é usado no alteamento e o rejeito fino disposto na porção contrária do barramento.

Já a barragem à jusante é aquela cujo maciço é construído em solo compactado, e apoiam-se sobre o terreno natural. Os alteamentos, quando realizados, são feitos no sentido do fluxo de água (jusante).

A barragem à jusante é a convencional. O maciço da barragem é construído em solo compactado, independentemente do tipo de rejeito depositado na mesma. Os alteamentos são realizados no sentido do fluxo de água (jusante).

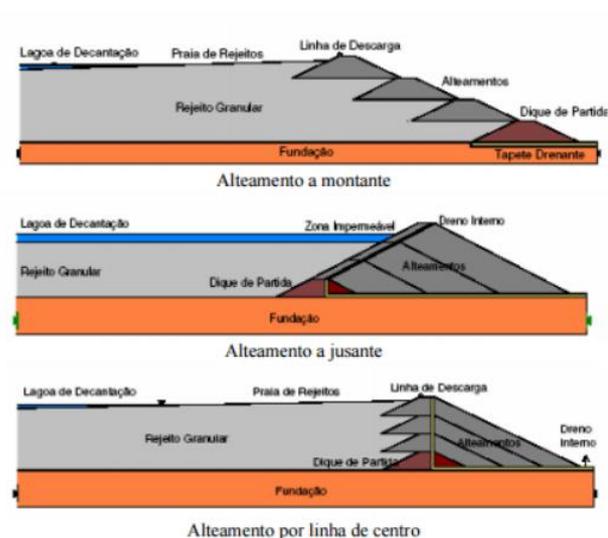
A barragem alteada por linha de centro é aquela na qual o maciço possui a face de montante apoiada sobre o reservatório de rejeitos e face de jusante sobre o aterro compactado. O método de alteamento na linha de centro possui maior estabilidade do que uma barragem

alteada para montante e não requer um grande volume de materiais como no alteamento para jusante.

Em ambos os métodos é necessário a construção de um dique de partida com o intuito de formar a praia de rejeitos a montante.

Figura 5 : Desenho esquemático dos tipos de alteamentos comuns em barragens de rejeitos.

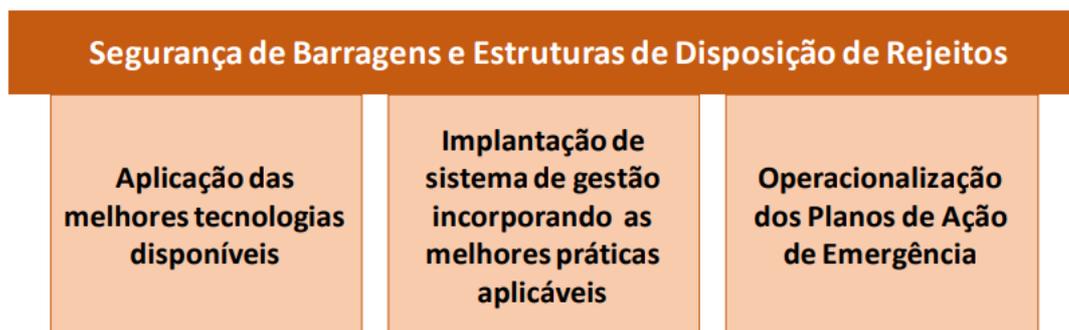
Fonte: Site Minerar Jr(2019)



2.4. Segurança de Barragens

IBRAM (2019) define três pilares básicos para segurança de barragens e estruturas de disposição de rejeitos: aplicações das melhores tecnologias disponíveis, implantação do sistema de gestão incorporando as melhores práticas aplicáveis e a operacionalização dos planos de ação de emergência (Figura 6).

Figura 6 : Pilares fundamentais para a segurança de barragens e estruturas de disposição de rejeitos.
Fonte: IBRAM (2019).



Segundo INEA (2021), a segurança de barragens se apresenta como uma das vertentes de segurança hídrica, no tocante a gestão dos riscos e desastres relacionados à água. Assim, a preocupação com a segurança de barragens aumentou a partir da década de 1950, quando grandes acidentes deixaram milhares de vítimas em todo o mundo.

Dentre os incidentes mais graves, sete ocorreram em barragens brasileiras, destacando-se os mais recentes, na cidade de Mariana (MG), em novembro de 2015, quando uma barragem de mineração se rompeu provocando impactos imensuráveis na qualidade da água e nos usos múltiplos do Rio Doce; e o de Brumadinho (MG), em janeiro de 2019, com o rompimento de uma barragem de rejeitos, que resultou em um grande rastro de destruição e mais de 250 fatalidades, sendo considerado o maior desastre ambiental da mineração no Brasil.

A segurança deve constituir o objetivo fundamental no projeto, construção e operação de barragens. Este deve ser referencial a ser buscado, uma vez que a ruptura de uma barragem pode ter consequências imensuráveis em termos de impactos socioeconômicos e ambientais. Apesar de reduzido, o risco de ruptura de uma barragem constitui uma realidade potencial para esse tipo de empreendimento (Sampaio, 2014).

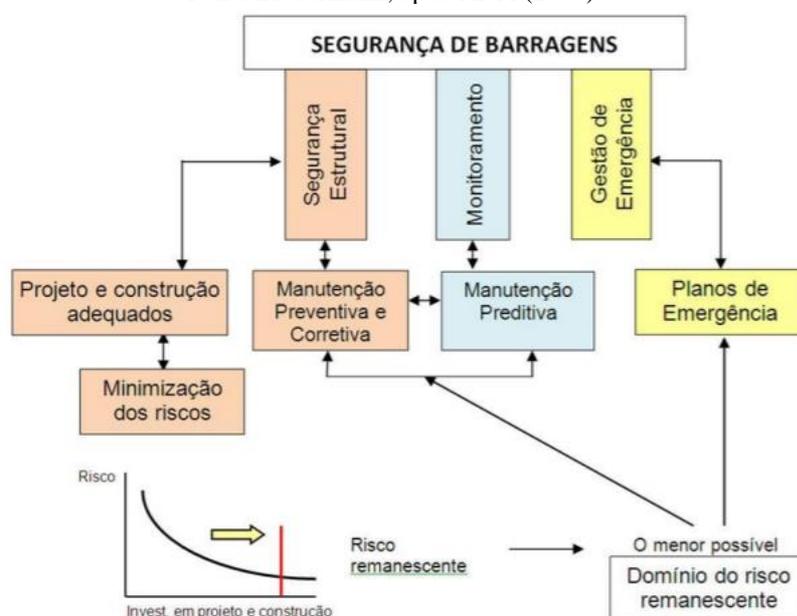
De acordo com o Boletim 99 do ICOLD (1995), a percentagem de ruptura de grandes barragens é de 2,2% para as barragens construídas antes de 1950 e de cerca de 0,5% para as construídas após esta data. A maior parte das rupturas, cerca de 70%, ocorreu com barragens nos seus primeiros 10 anos de operação e, mais especialmente, no primeiro ano após o comissionamento.

Foster et al. (1998) apud ANA (2019) analisaram um total de 11.192 grandes barragens de enrocamento construídas até 1986, registrando 136 casos de ruptura neste universo. A frequência média de ruptura (número total de rupturas por número total de barragens) foi de

0,012, ou 0,011 se consideradas apenas as barragens que estavam em operação, ou seja, de cada 100 barragens construídas, uma se rompe. A frequência anual histórica foi de $4,5 \times 10^{-4}$. Assim, para o mesmo grupo de 100 barragens, a probabilidade de ruptura anual é de 0,045, portanto, a cada 22 anos, uma barragem se romperia.

Sabendo-se então da existência de uma probabilidade, ainda que baixa, de ruptura de uma barragem e do alto impacto que este evento teria a jusante, a questão é como este risco pode ser reduzido. Biedermann (1997) apud ANA (2019) considera que a segurança de barragens pode ser obtida apoiando-se em três pilares básicos: segurança estrutural (projeto, construção e manutenção adequados), monitoramento e gestão de emergência, como apresentado na Figura 7.

Figura 7 : Pilares básicos da segurança de barragens.
Fonte Biedermann, apud ANA (2004)



Fonte: Biedermann, 1997, adaptado.

De acordo com Ladeira (2007), no contexto de segurança de barragens, a incerteza pode ser atribuída a (I) inerente variabilidade em propriedades naturais e eventos que podem ocorrer, e (II) conhecimento incompleto de parâmetros e relações entre valores de entradas e saídas. A incerteza também é usada para se referir as situações em que as probabilidades de potenciais resultados não podem descrever a função densidade de probabilidades pelo conhecimento disponível.

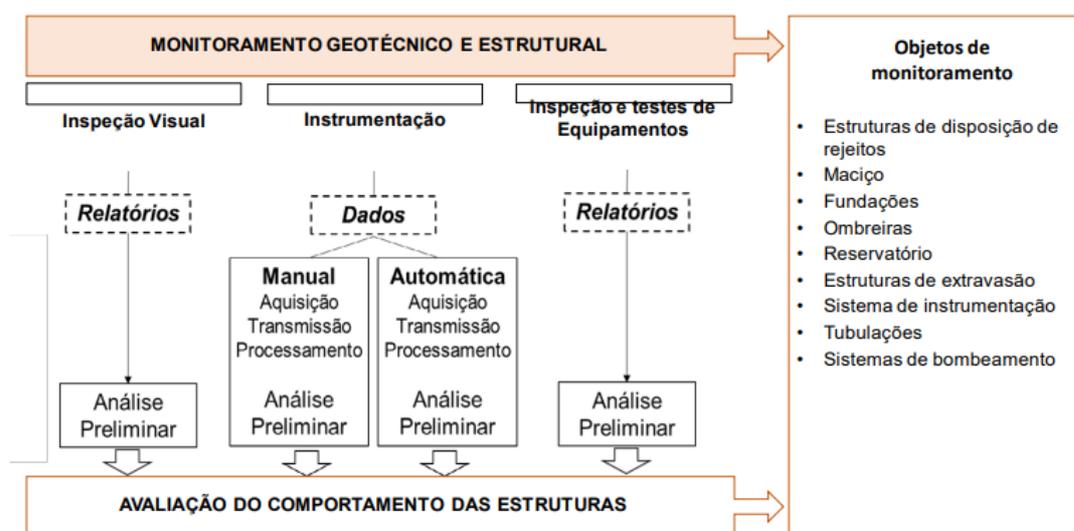
Os dois tipos de incertezas são a aleatória e a incerteza sobre os conhecimentos científicos (epistêmica). Esses conceitos devem estar claros para as pessoas envolvidas em avaliação de vulnerabilidade das estruturas da barragem.

De acordo com a ANM (2017), o plano de Segurança da Barragem é instrumento da Política Nacional de Segurança de Barragens, de implementação obrigatória pelo empreendedor, cujo objetivo é auxiliá-lo na gestão da segurança da barragem. O plano é dividido em volumes na qual constam (I) informações gerais, (II) planos e procedimentos, (III) registros e controles e (IV) revisão periódica de segurança de barragens.

A instrumentação de barragens é parte integrante do monitoramento geotécnico da estrutura. De acordo com IBRAM (2019) “As atividades de monitoramento geotécnico e estrutural são definidas como aquelas que permitem o diagnóstico do comportamento de uma barragem ou estrutura de disposição de rejeitos, incluindo as atividades de inspeções visuais e coleta/análise dos dados da instrumentação instalada, tanto do maciço, fundação e ombreiras quanto dos elementos de extravasão ou outras estruturas em concreto associadas, de forma a verificar seu desempenho geotécnico e estrutura.”

De forma geral, o monitoramento geotécnico pode ser dividido em três itens principais: inspeções visuais, instrumentação e inspeção e testes de equipamentos, como apresentado na Figura 8 (ICOLD, 2014).

Figura 8 : Itens integrantes do Monitoramento Geotécnico
Fonte: ICOLD, 2014).

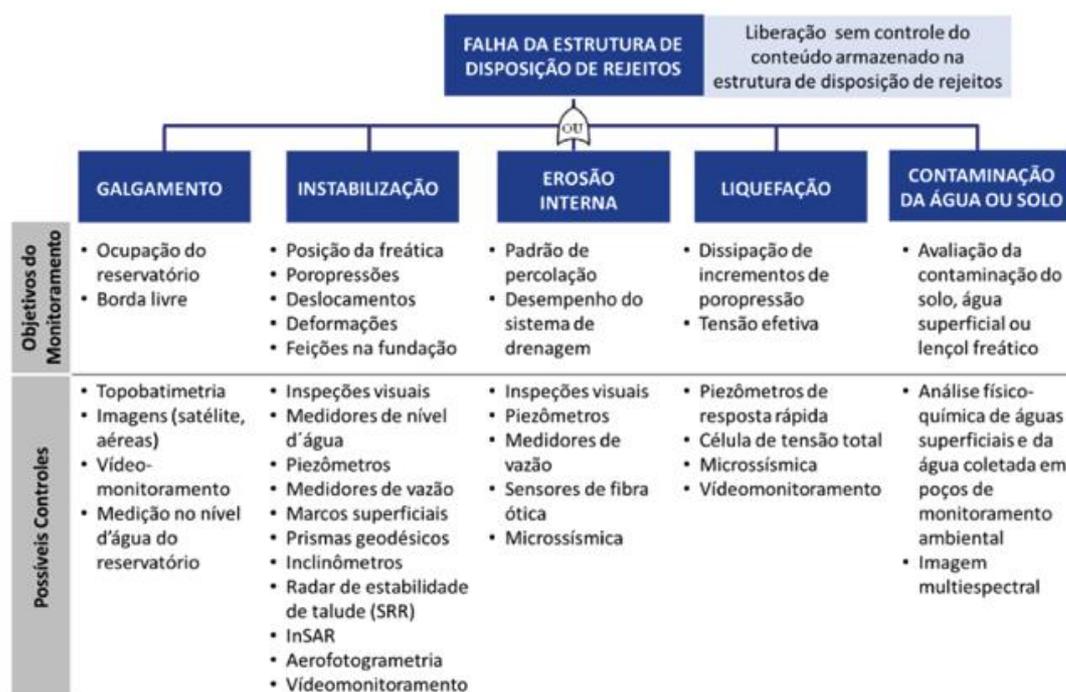


A definição dos instrumentos a instalar e em qual frequência monitorar é parte essencial para o sucesso do monitoramento. De acordo com IBRAM (2019), “A seleção dos tipos de

instrumentos e locais de instalação deve considerar os modos de falha e áreas de sensibilidade da estrutura, suas fundações, seu reservatório e suas ombreiras. A partir daí, são desenvolvidas hipóteses de percolação, de tensão-deformação ou esforços passíveis de afetar o comportamento da estrutura, que suportarão a definição da instrumentação”. A Figura 9 apresenta a sugestão dos objetivos de monitoramento e possíveis controles.

Figura 9 : Monitoramento de estruturas de disposição de rejeitos

Fonte: Guia de Boas Práticas do IBRAM (2019).



Quanto à localização de cada instrumento na barragem, Silveira (2015) aponta que a seleção do local deve envolver três passos básicos: a identificação de áreas de risco (carregamentos mais intensos, áreas estruturalmente frágeis, etc.), se não há tais áreas ou serão instalados instrumentos em mais de um local, é feita a seleção de áreas. Ainda de acordo com Silveira (2015), geralmente são seções transversais, nas quais o comportamento previsível é considerado representativo do comportamento geral do protótipo. Essas seções fornecem dados de desempenho geral, devendo haver no mínimo duas. Como a seleção de áreas representativas pode estar incorreta, a instrumentação deve ser instalada também em outras seções para servir como comparação de comportamento.

2.5. Tipos de Instrumentos

Os tipos de instrumentos, entre os principais utilizados estão os pluviômetros, régua de reservatório, medidores de nível de água, piezômetros, inclinômetros, marcos superficiais, radares satelitais, radares interferométricos, estações totais robotizadas, sismógrafos de engenharia e instrumentos para acionamento automático de sirenes. Os usos, características, especificações técnicas e manuseio destes equipamentos serão apresentados.

2.5.1. *Pluviômetros*

De acordo com Freitas et al, (2021), os pluviômetros são instrumentos cuja instalação tem a finalidade de mensurar a precipitação ocorrida na bacia. O instrumento pode ser dotado também de evaporímetro e barômetro, com o objetivo de medir a evaporação e pressão atmosférica. É um instrumento importante na medida em que pode ser feita a correlação entre aumento do nível de água, piezômetro, bem como balanço hídrico da estrutura. O instrumento possui uma abertura na porção inferior em que é inserida uma bureta calibrada e obtido a altura de chuva em milímetros. A Figura 10 apresenta a ilustração de um pluviômetro.

Figura 10 : Foto esquemático da instalação do pluviômetro.
Fonte: De própria autoria.



2.5.2. *Régua de Reservatório*

De acordo com Freitas et al, (2021), régua limnimétrica (linígrafo) com o objetivo de realizar a medição do nível de água superficial a montante da estrutura. A régua possui gradação e seu ponto de instalação coordenadas de referência. Através da anotação de elevações sucessivas é possível identificar variações do nível do reservatório. A Figura 11 apresenta a instalação de uma régua de reservatório.

Figura 11: Régua liminimétrica instalada.
Fonte: De própria autoria.



2.5.3. *Medidores de nível de água*

Segundo Santos (2019), os medidores de nível d'água são os instrumentos mais simples utilizados nas barragens. Têm como função principal indicar o nível do lençol freático em maciços de terra. Por um furo de sondagem ou poço, é possível determinar a cota do nível d'água. Destaca-se que envolto a todo a profundidade do tubo é instalado material drenante.. A medição ocorre através da inserção de um equipamento milimetrado sendo conhecido como “PIO” no interior do tubo e após sinal sonoro é anotada na caderneta de campo a altura sem água do tubo.

2.5.4. *Medidor de vazão*

De acordo com Freitas et al (2021), medidores de vazão são instrumentos destinados para medidas das vazões efluentes dos sistemas de drenagem interna e/ou das ombreiras da barragem, bem como vazões dos sistemas extravasores. Eles podem ser medidores de geometria triangular ou retangular. A medição da vazão através da altura da lâmina d'água. A Figura 12 apresenta a figura esquemática de um medidor de vazão triangular.

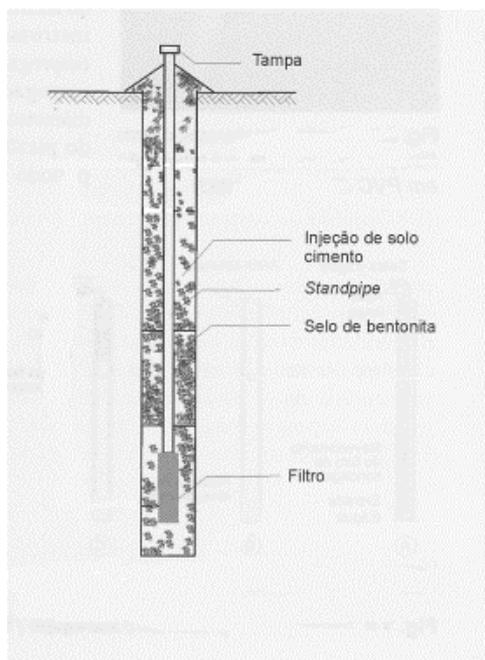
Figura 12 : Foto esquemática da instalação de medidor de vazão triangular.
 Fonte: Blog Irrigação.



2.5.5. *Piezômetros*

Os piezômetros são usados para medir a pressão da água (poropressão) em locais específicos de barragens, fundações e ombreiras. O objetivo de uma medição piezométrica é medir a pressão da água em um ponto específico dentro de uma massa de terra, rocha ou concreto (França, 2023). Entre as tecnologias existentes para construção do instrumento destaca-se piezômetro de tubo aberto, ou casagrande, o tipo pneumático, ou ainda os sensores elétricos de corda vibrante, resistivos e de fibra óptica. Assim como o medidor de nível de água o instrumento também é instalado após a perfuração no solo até atingir o local na qual deverá ficar instalada a célula piezométrica.

Figura 13 : Croqui de piezômetro instalado.
 Fonte:Site Maxwell – Puc Rio(2018)

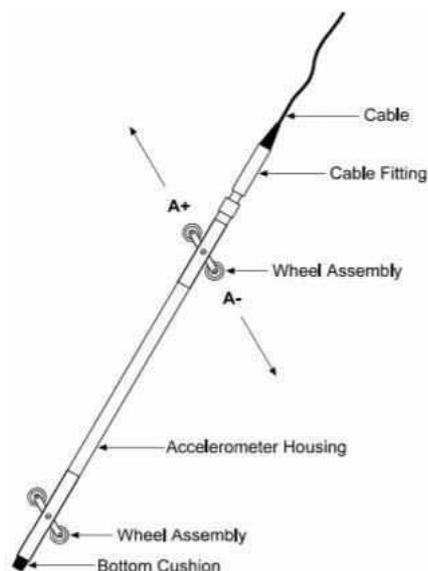


2.5.6. *Inclinômetros*

De acordo com Silveira (2015), o inclinômetro é um torpedo à prova d'água, dotado de um pêndulo interno, o qual é abaixado dentro de um tubo-guia aproximadamente vertical, medindo os deslocamentos angulares a intervalos igualmente espaçados e segundo direções preestabelecidas.

O objetivo geral do monitoramento por inclinômetro é verificar deslocamentos horizontais no interior do maciço, que podem estar relacionados a superfícies de cisalhamento.

Figura 14 : Detalhe do torpedo utilizado para medição de inclinômetro.
 Fonte: Geokon (2014) *apud* Santos (2019)

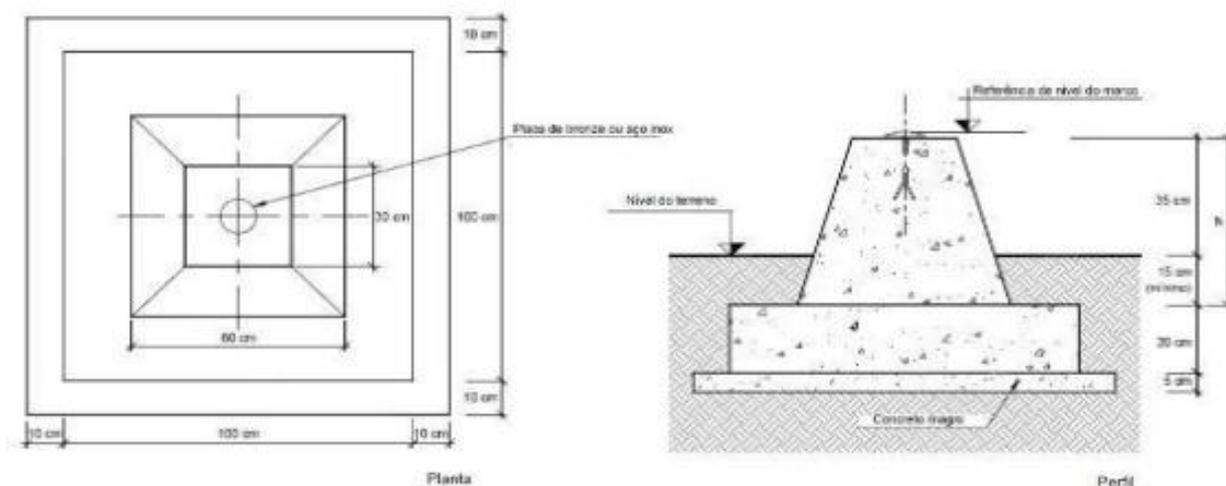


2.5.7. Marcos superficiais

Os marcos superficiais são instrumentos dedicados à determinação dos deslocamentos verticais e horizontais dos maciços de terra e enrocamento. São constituídos de vergalhões de aço CA-50 com 1,1 m de comprimento e diâmetro de meia polegada. No topo do vergalhão é alocada uma semiesfera. A estrutura é então chumbada com um bloco de concreto com 0,3 m de diâmetro e 1,2 m de profundidade, nas regiões de crista, bermas e talude de jusante (Fonseca, 2003).

Neste tipo de instrumento, os deslocamentos são medidos através de levantamentos topográficos periódicos, em relação a marcos de referência fixos, que devem ser instalados em locais fora da região de influência da barragem. O esquema de instalação dos marcos é apresentado na Figura 15. Entre as vantagens desta instrumentação estão os baixos custos e as leituras com precisões satisfatórias.

Figura 15 : Croqui de um marco superficial.
Fonte Site Idd.EDU



2.5.8. *Radares satelitais*

Conforme Freitas et al (2021), radares satelitais são eficientes para verificação de deslocamentos lentos, a medida em que utilizam micro-ondas do espectro eletromagnético, eliminando os ruídos atmosféricos, de vegetação, entre outros.

2.5.9. *Radares interferométrico terrestre*

Para Freitas et al (2021), os radares interferométricos terrestres (Figura 16), usam o mesmo princípio de interferometria para identificação de deslocamentos. O intervalo de aquisição entre os dados é pequeno (aproximadamente 02 a 03 segundos), por isso acumulam dados ruidosos, tais como vegetação, interferências atmosféricas. Para tanto é necessário realizar o sub-processamento dos dados, a fim de obter dados menos ruidosos.

Figura 16 : Foto de radar interferométrico terrestre.
 Fonte: GroundProbe(2023)



2.5.10. Estações totais robotizadas

De acordo com Freitas et al. (2021), para a medição pontual de deslocamentos, podem ser utilizados estações totais robotizadas (Figura 17) ou manuais, que realizam as leituras de distâncias e variações angulares entre o ponto de instalação, os alvos dispostos na estrutura e marcos de referências instalados fora da estrutura.

Figura 17 : Exemplo de estação total robotizada.
 Fonte: Leica (2023)



2.5.11. Sismógrafos de engenharia

De acordo com Dinadrill (2021), os sismógrafos de engenharia são dotados de geofones triaxiais e microfone, que nos permitem captar a vibração no maciço e a pressão acústica, (onda sonora) causadas pelas detonações. Eles são instalados a cada 0,50 m de profundidade ou em profundidade, sendo assim denominados geofones de abandono. São amplamente utilizados em controle de desmonte de rochas e vibrações induzidas.

2.5.12. Instrumentos para acionamento automático de sirenes

De acordo com a ANM,2019 há a exigência que barragens com dano potencial associado alto tenham em seus sistemas o acionamento automático de sirenes. Muitas podem ser as tecnologias empregadas para tal dispositivos, entre elas se destacam radares de colapso doppler e tiltímetros. A Figura 18 e a Figura 19 apresentam imagens dos equipamentos utilizados para detecção de colapso.

Figura 18 : Radar de colapso tipo doppler.
Fonte: GroundProb(2023)



Figura 19 : Visualizador do sistema de colapso(a). Aparelho para medição de colapso tipo tiltmeter(b).
 Fonte: Geomin(2023)



(a)



(b)

2.6. Critério para instalação de instrumentos

De acordo com Silveira (2015), os critérios para instalação dos instrumentos devem levar em conta desde a fase de concepção até a implantação e operação da estrutura geotécnica, na qual são avaliados pontos de fraqueza, é extremamente importante que os instrumentos sejam instalados em posições corretas e com a finalidade correta, levando-se em conta o objetivo na qual ele se propõe. Outro fator que deve ser levado em conta é o tempo de resposta da grandeza a ser medida para que se defina a frequência de medição.

De acordo com Silveira (2015), todo instrumento em um empreendimento deve ser selecionado e instalado para responder a questões específicas: se não há perguntas, não deve haver instrumentação. Antes de indicar os métodos de medição propriamente ditos, deve ser

feita uma lista das questões geotécnicas que provavelmente surgirão durante as fases de projeto, construção ou operação. Toda barragem de grande porte ou mesmo algumas de pequeno, possuem pontos mais susceptíveis a problemas na fundação, em decorrência de anomalias geológicas ou então, pontos de fraqueza estrutural na interface das estruturas de solo/concreto ou solo/enrocamento, os quais requerem, normalmente, uma instrumentação específica para observação de seu desempenho a longo prazo.

2.7. Métodos Geométricos e Eletromagnéticos

São utilizados quando se deseja investigar variações nas propriedades eletromagnéticas (a resistividade elétrica, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética) dos materiais que se encontram abaixo da superfície terrestre. Essas variações podem ser causadas por corpos geológicos que ocorrem naturalmente abaixo da superfície (por exemplo, mineralizações e camadas aquíferas), como também por materiais introduzidos pelo homem na subsuperfície (poluentes, dutos metálicos ou plásticos e artefatos arqueológicos, entre outros). Existe uma grande quantidade e diversidade de métodos geofísicos, entretanto o presente trabalho abordará apenas a Eletrorresistividade e o Potencial Espontâneo.

No Brasil, a principal fonte regulamentadora do levantamento de resistividade elétrica e determinação da estratificação do solo é NBR 7117 (ABNT NBR 7117, 2020) – norma que apresenta os métodos de sondagem geométrica e as técnicas de determinação do modelo geométrico 1D correspondente (camadas horizontais, planas e paralelas).

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) possui também uma norma para uso rodoviário de prospecção geofísica pelo método de eletrorresistividade, a DNER-ME 040/95, em que o objetivo é apresentar o método de eletrorresistividade para ensaios geofísicos, definindo campo de aplicação, conceituações, aparelhagem e execução de ensaio, assim como a obtenção e interpretação dos resultados.

2.7.1. Eletrorresistividade(ERT)

A ERT produz informação sobre as camadas, ou corpos, que tenham anomalias na sua condutividade elétrica. Segundo Borges (2002), o método da eletrorresistividade baseia-se no estudo do potencial elétrico tanto dos campos elétricos naturais, existentes na crosta terrestre, como dos campos artificialmente provocados. No ambiente geológico, os diferentes tipos

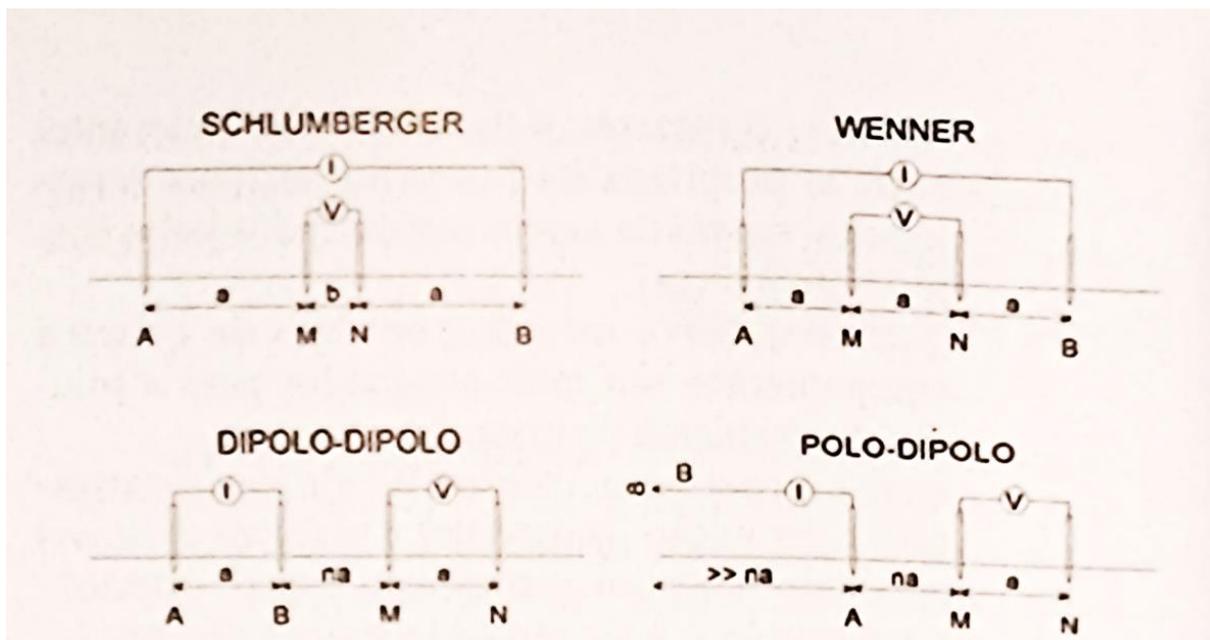
litológicos existentes, apresentam o parâmetro físico da resistividade elétrica como uma de suas propriedades fundamentais. Um mesmo tipo litológico pode apresentar uma ampla gama de variação nos valores de resistividade, devido inúmeros fatores que interferem no valor da resistividade de um determinado material.

De acordo com o ABGE (2018), o método ERT consiste na injeção de uma corrente elétrica (I) de intensidade conhecida no terreno, com o emprego de eletrodos de emissão (A e B) e a medida da diferença de potencial (ΔV), resultante da passagem dessa corrente por meio de outros dois eletrodos (M e N). Desta forma pode ser calculada a resistividade elétrica (ρ_a), que é o produto da resistência elétrica por um fator geométrico conhecido (K), que tem dimensões de comprimento e depende unicamente do espaçamento dos quatro eletrodos (A, B, M e N) no momento da medida. Os equipamentos utilizados nestes métodos recebem o nome de resistivímetros. A Equação (1) apresenta o cálculo da resistividade aparente, obtida a partir de um levantamento geofísico do tipo eletrorresistividade.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

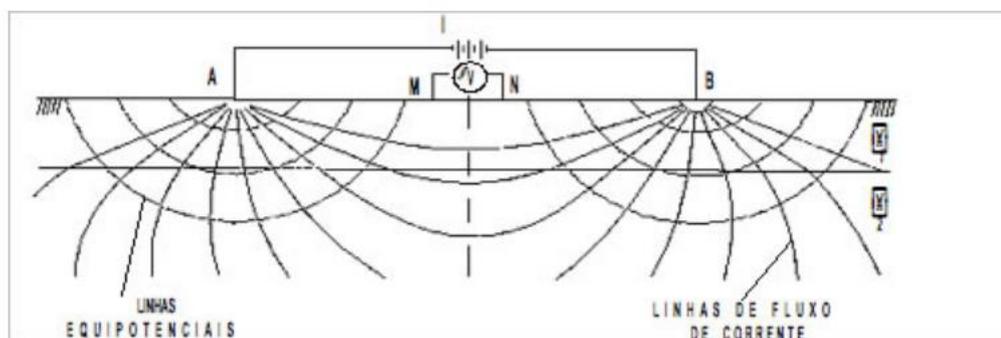
Os quatro eletrodos (A, B, M e N) podem assumir diversas posições geométricas sobre a superfície do terreno, sendo que cada disposição é denominada de “arranjo”. Muitos desses arranjos são utilizados nos levantamentos de campo, possuem nomes específicos (Schlumberger, Wenner dipolo-dipolo, polo-dipolo, polo-polo, gradiente), apresentando características peculiares em relação à geometria da disposição dos eletrodos, com vantagens e desvantagens uns em relação aos outros (ABGE, 2018).

Figura 20 : Arranjos de eletrodos comumente utilizados no método da eletrorresistividade. Fonte: ABGE(2018).



Algumas das principais técnicas utilizadas nas medidas da resistividade elétrica são: Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamento Elétrico (ABGE, 2018). Em linhas gerais a SEV consiste na determinação vertical da distribuição da resistividade elétrica em um ponto da superfície.

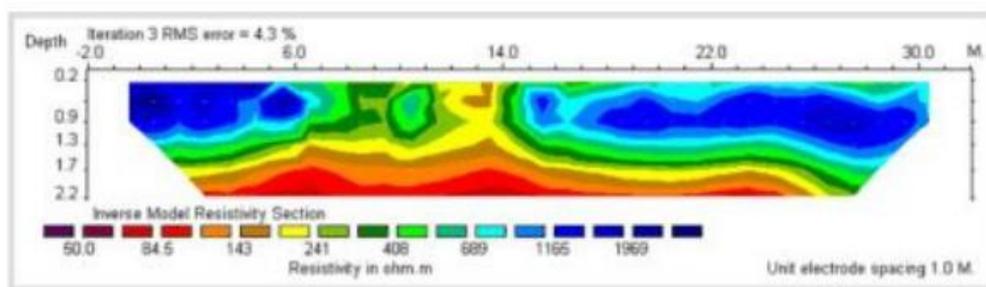
Figura 21 : Croqui para sondagem elétrica vertical. Fonte: ABGE (2018)



Já o caminhamento elétrico é uma técnica ERT que tem como objetivo o mapeamento das variações laterais do parâmetro de resistividade elétrica a uma ou várias profundidades. As investigações, dessa forma ocorrem ao longo de perfis e os resultados podem analisados e apresentados na forma de seções ou na forma de plantas, ou mapas construídos a partir da análise de várias seções (ABGE, 2018).

Figura 22 : Exemplo de uma seção obtida a partir da utilização do caminhamento elétrico.

Fonte: ABGE(2018)



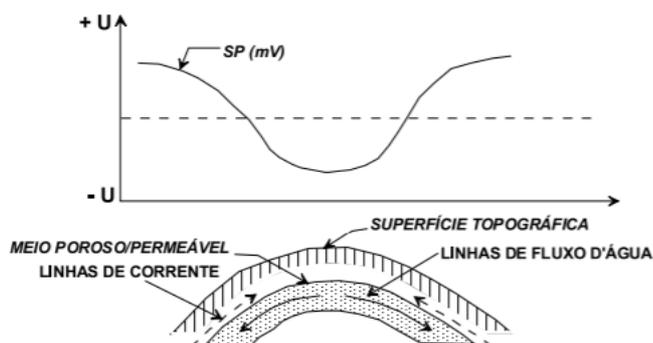
De acordo com Netto et al (2020), a eletrorresistividade é possivelmente o método geofísico de investigação mais aplicado em barragens, pois permite localizar zonas anômalas que apresentam baixos valores de resistividade elétrica, associadas a regiões com maior saturação de água no maciço terroso.

2.8. Potencial espontâneo

De acordo com o ABGE (2018), o Método do Potencial Espontâneo (SP, do inglês **self potential**) é um método geolétrico de campo natural. Baseia-se no fato de que, mesmo na ausência de qualquer campo elétrico criado artificialmente, é possível medir, por meio de um multímetro, uma diferença de potencial entre dois eletrodos introduzidos no terreno.

Figura 23 : Desenho esquemático do método do potencial espontâneo.

Fonte: Gallas (2005)



O Método do Potencial Espontâneo é normalmente utilizado para detectar a presença de certos minerais que, reagindo com eletrólitos presentes no solo, dão origem a potenciais eletroquímicos. Um corpo sulfuroso que esteja mais oxidado na sua superfície superior que na inferior, originará um potencial elétrico que será detectável por galvanômetros dispostos à superfície.

A principal aplicação do Método do Potencial Espontâneo está na determinação da direção e sentido do fluxo dos fluidos subterrâneos, identificação dos caminhos preferenciais de fluxos, características estas diretamente relacionadas a localização de pontos de fuga de água no corpo de barragens de terra, principalmente (ABGE, 2018).

De acordo com Netto et al (2020), o Método do Potencial Espontâneo pode ser aplicado no estudo de barragens de terra, fornecendo geralmente, junto com a eletrorresistividade, bons resultados. O conhecimento de sua eficácia para este tipo de aplicação não é recente (Bogoslovsky e Ogilvy, 1970). Como o SP possibilita a determinação de fluxos anômalos no interior do maciço, a aplicação conjunta destes métodos permite melhor caracterizar as regiões com maior percolação de água no corpo da barragem.

2.9. Utilização de métodos geofísicos aplicados no estudo de caracterização de barragens

Oliveira (2018) faz a seguinte pontuação: apesar desses métodos diretos serem eficientes e já bastante tradicionais na indústria da mineração, oferecem apenas dados pontuais sobre a barragem. O mesmo não ocorre com métodos geofísicos. Estes geram imagens contínuas de subsuperfície, possibilitando a identificação de possíveis irregularidades na estrutura da barragem.

Mailani (2006) *apud* Oliveira (2018) afirma que tais métodos possuem grande potencial para detectar processos de erosão interna e infiltrações anormais em estágios iniciais de desenvolvimento. Em seu trabalho, a autora conduziu testes para verificar a aplicabilidade de métodos geofísicos, principalmente eletrorresistividade e potencial espontâneo, a fim de detectar infiltrações anômalas em barragens de rejeito e monitorar as condições físicas da estrutura. Medidas de campo foram adquiridas nas barragens de rejeito de Kiruna, Aitik e Kristineberg, na Suécia.

Além dela, Rittgers et al. (2014) *apud* Oliveira (2018) apresentaram a aplicabilidade de métodos geofísicos ativos e passivos, a fim de monitorar barragens. Os autores demonstraram em um experimento de campo (Ijkdijk Experiment - Holanda), onde construíram uma estrutura análoga a uma barragem, que a combinação do Método do Potencial Espontâneo, associado com sísmica passiva, é capaz de detectar, localizar e monitorar distúrbios hidromecânicos em uma barragem.

No Brasil, alguns trabalhos foram realizados recentemente, como o de Martini (2016) que utilizou o método de GPR (Ground Penetrating Radar) - Radar de Penetração do Solo, a

fim de definir a existência de 19 padrões de sedimentação na subsuperfície do reservatório criado pela barragem de rejeito do Diogo, em Minas Gerais. Já Rodrigues (2018), além do GPR, utilizou os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida, a fim de desenvolver uma metodologia complementar ao sistema de monitoramento direto já existente na barragem de rejeito de Tapira (Minas Gerais).

Apesar da existência dos trabalhos supracitados, a utilização de métodos geofísicos em barragens de rejeito no país ainda não é uma prática usual, sendo que nos últimos anos vem sendo crescente a sua utilização. Adicionado a esse fato, os acidentes recentes, envolvendo estas estruturas, demonstram a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas que permitam o aperfeiçoamento dos métodos de monitoramento já existentes.

De acordo com Rocha et al. (2020), as metodologias geofísicas têm muito a contribuir com a investigação e monitoramento de todos os tipos de barragens. Os métodos geofísicos são não invasivos e possuem grande potencial para detectar erosões internas, infiltrações e separar regiões saturadas das secas ou com algum teor de umidade

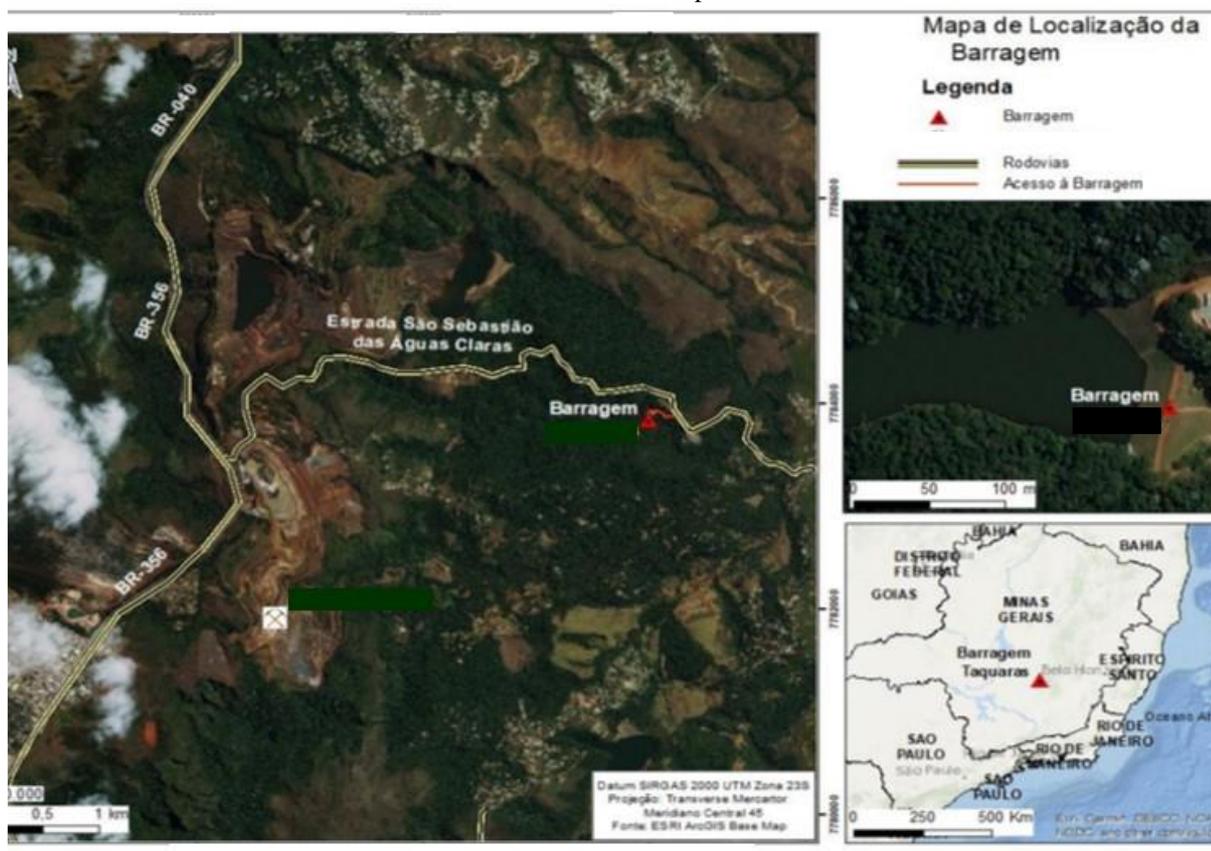
3. METODOLOGIA

Em linhas gerais a metodologia a ser empregada será a utilização de dados existentes de instrumentação da barragem, levantamentos de campo de dados geofísicos, emprego de correlações estatísticas para tratamento de dados e integração completa dos dados levantados e suas respostas com inspeções de campo, entre outras informações.

3.1. Área de Estudo

A área em estudo situa-se no município de Nova Lima, na região metropolitana de Belo Horizonte, numa mineração de ferro. A área está aproximadamente a 23 km da capital do estado, que é Belo Horizonte, tendo o acesso pela rodovia BR-040 até o trevo de São Sebastião de Águas Claras, como mostra a Figura 24.

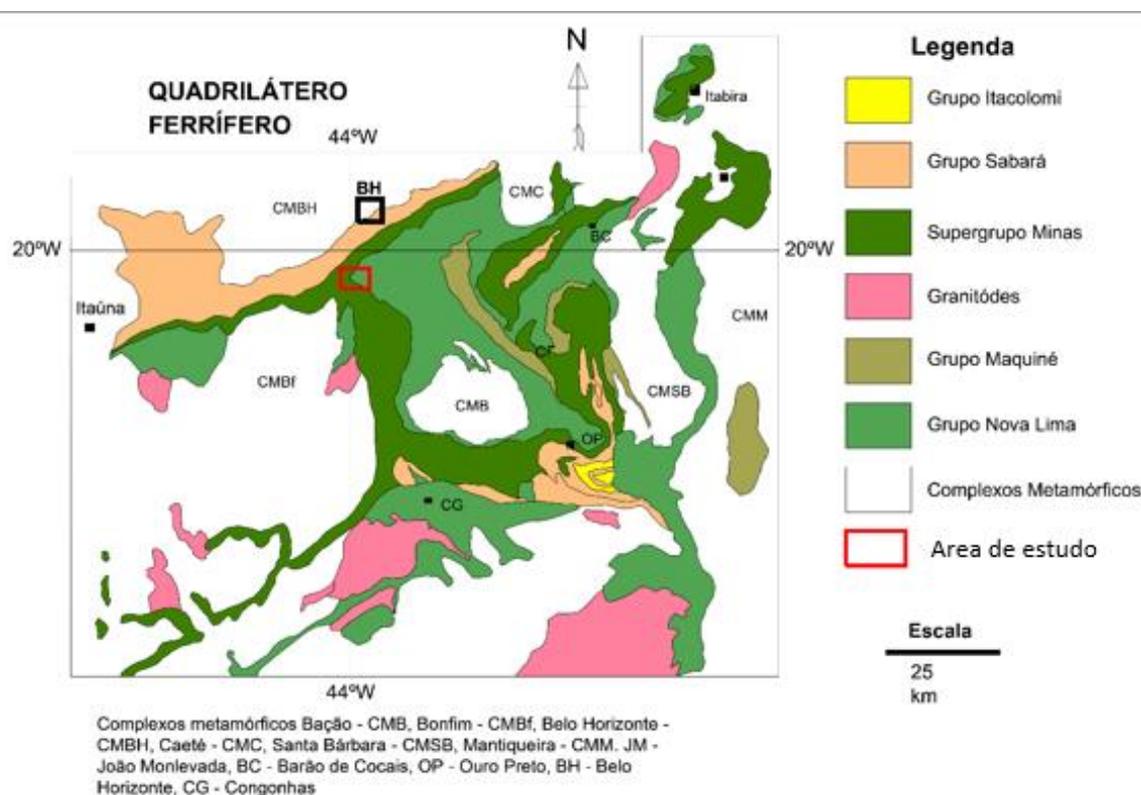
Figura 24 : Mapa de localização da área em estudo.
Fonte: Autoria Própria



3.2. Geologia regional

Regionalmente, a área de estudo está inserida na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero, região central do estado de Minas Gerais. O Quadrilátero Ferrífero constitui uma das regiões mais importantes do escudo pré-cambriano brasileiro, especialmente por se tratar de área com grandes reservas minerais e grande complexidade estrutural. Seu arcabouço é bastante complexo e resulta da superposição de diversos eventos deformacionais, configurando uma estruturação em domos e calhas (Alkmim & Marshak, 1998), onde os domos são representados pelos complexos metamórficos do embasamento e as calhas pelos megassinclinais (Figura 25).

Figura 25 : Localização da região da região de Estudo, no quadrilátero ferrífero.
Fonte: Endo *et al* 2005.

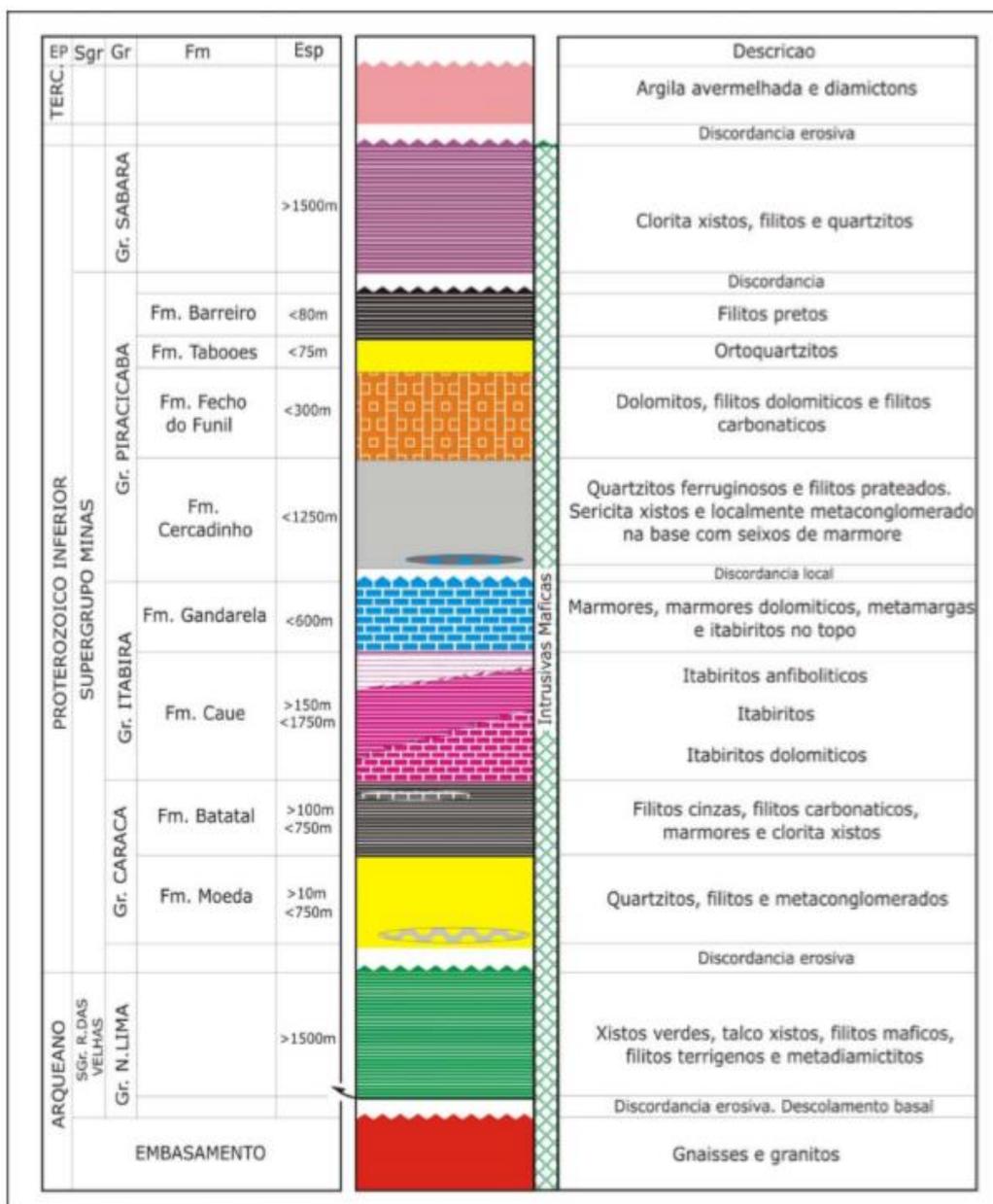


A estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero engloba os complexos gnáissicos do embasamento, a sequência vulcanossedimentar do Supergrupo Rio das Velhas e as sequências metassedimentares do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi (Dorr, 1969; Machado *et al.*, 1996; Almeida *et al.*, 2005).

A área de estudo se insere em região estruturalmente complexa, na porção norte do Sinclinal Moeda, em sua junção com o homoclinal da Serra do Curral, onde foi caracterizada a nappe Curral (Endo *et al.*, 2004). A sequência estratigráfica definida para a região está apresentada na Figura 27.

Figura 27: Coluna estratigráfica do segmento central da serra do Curral e setor norte do sinclinal Moeda
 Destaque em vermelho para as unidades presentes na área de estudo.

Fonte: Endo et al., 2004



3.3. Hidrografia

A região de interesse faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas que abrange áreas dos estados de Minas Gerais, envolvendo no total, 51 municípios. A área em estudo encontra-se situada no ribeirão Taquaras.

3.4. Características Gerais da Estrutura

A Barragem, objeto de estudo, possui 24,00 metros de altura, 95,00 metros de extensão, a crista possui 5,25 m de largura e berma intermediária com 3,00 metros de largura. Os taludes de jusante possuem inclinação entre bermas de 1V: 2H e o talude de montante possui inclinação de 1V: 1,7H. A Figura 26 apresenta uma imagem aérea da estrutura de estudo.

Figura 26 : Imagem aérea da estrutura de estudo.
Fonte :Google Earth (2023)



A estrutura foi construída em etapa única e o maciço foi construído por solo silto-arenoso fino a silto argiloso. Na fundação está presente solo coluvionar, solo residual de filito, rocha alterada de filito e material rochoso de filito.

3.5. Levantamentos de dados geotécnicos de campo

A Barragem possui 10 piezômetros e 7 indicadores de nível d'água com o objetivo de mensurar os níveis de água e piezométricos da estrutura. Além disso, conta com 14 prismas e 01 medidor de vazão da drenagem interna. A localização dos instrumentos pode ser visualizada nas Figura 27 a 32.

Figura 27 : Planta de Instrumentação da barragem (Marcos Topográficos)
Fonte: Própria Autoria

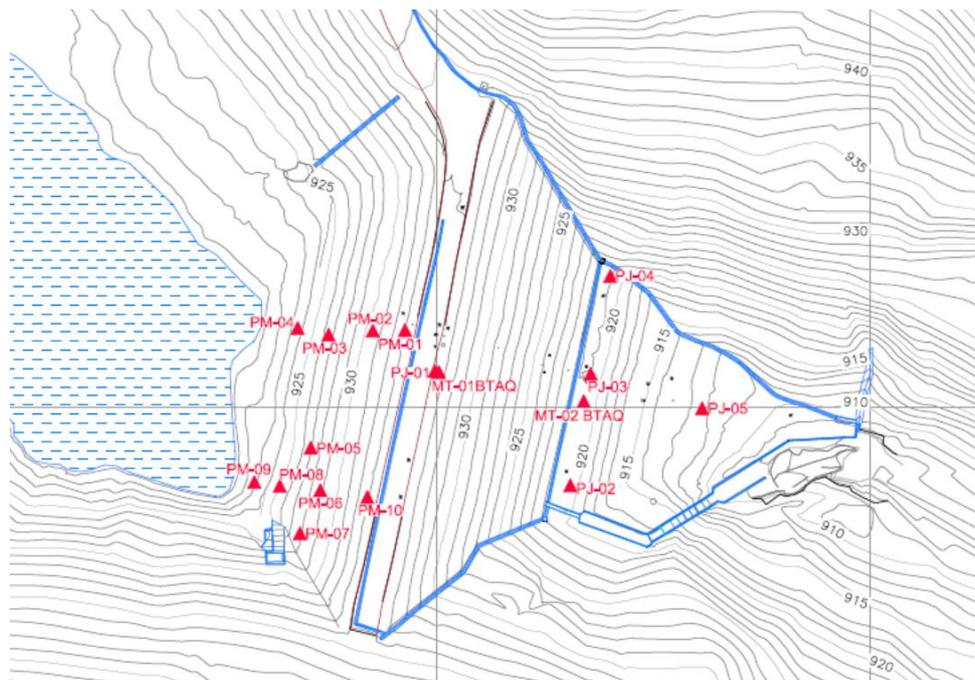


Figura 28 : Planta de Instrumentação da barragem (Indicadores de Nível de água)
 Fonte: Própria Autoria

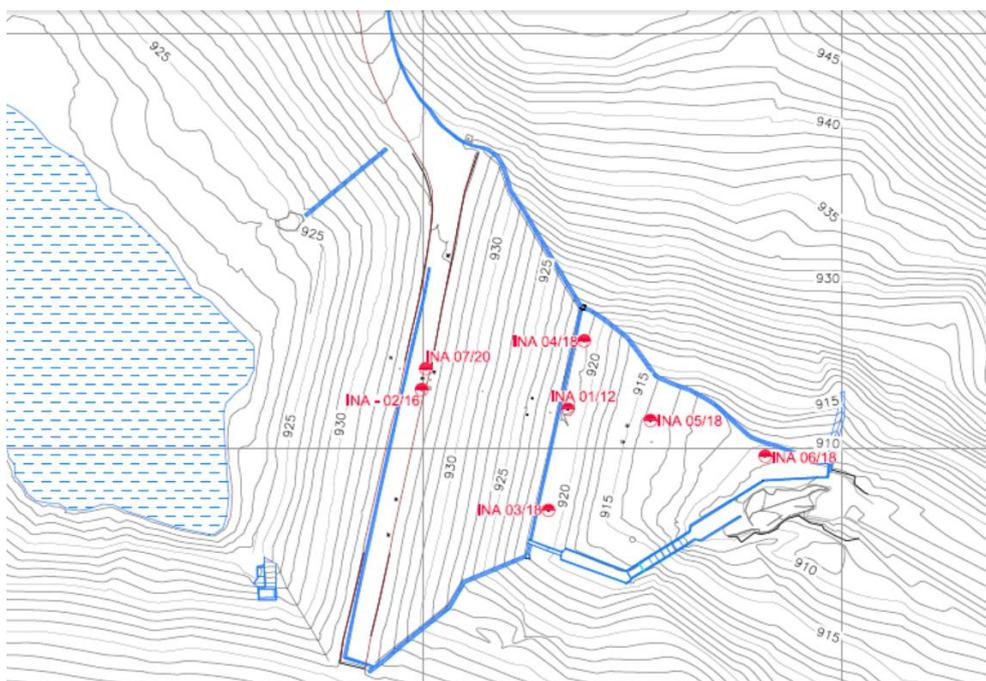
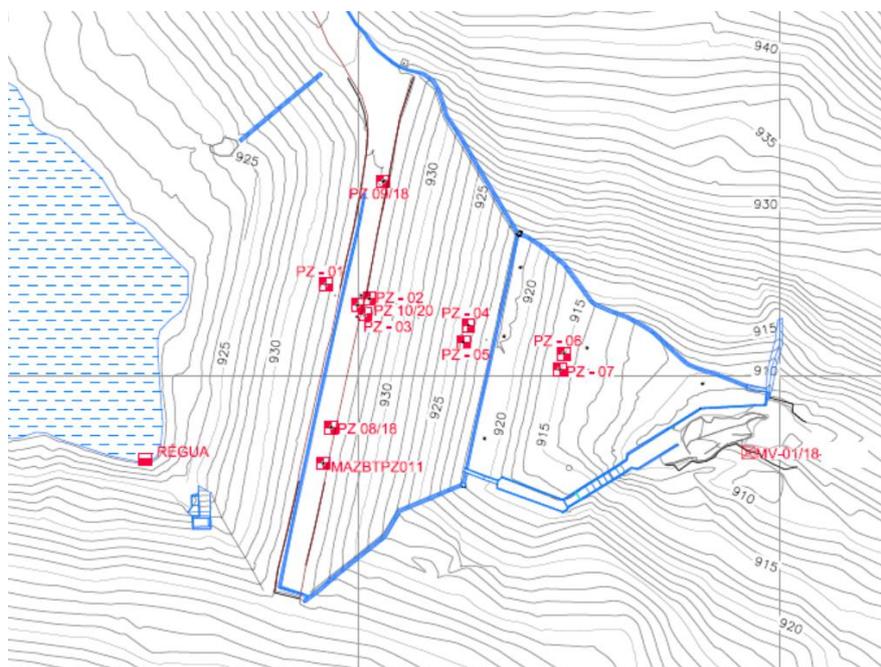


Figura 29 : Planta de Instrumentação da barragem (Piezômetros, Medidor de Vazão e Régua de Reservatório)
 Fonte: Própria Autoria



A estrutura existente já possui histórico e medições recorrentes de piezômetros, indicadores de nível de água, prismas, medidor de vazão, entre outros. A Tabela 1 apresenta os pontos a serem medidos, a grandeza mensurada em cada ponto e o tipo de medição (quantitativa e qualitativa).

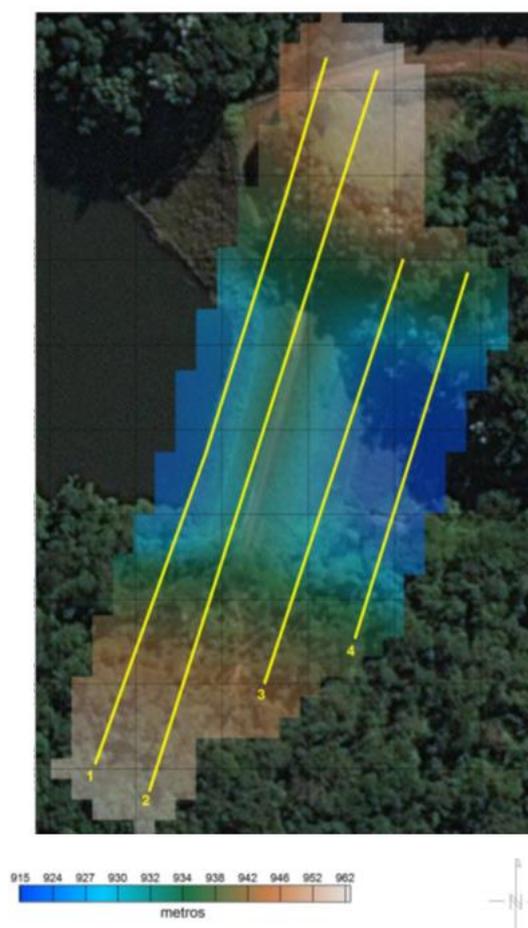
Tabela 1: Instrumentos, Pontos e tipos de variável.

Ponto	Grandeza Medida	Tipo de Variável	Tipo de Medição
PZ-01	Piezometria	Quantitativa	
PZ-02	Piezometria	Quantitativa	
PZ-03	Piezometria	Quantitativa	
PZ-04	Piezometria	Quantitativa	Piezometria relativa ao material da cota de base do instrumento
PZ-05	Piezometria	Quantitativa	
PZ-06	Piezometria	Quantitativa	
PZ-07	Piezometria	Quantitativa	
PZ-08	Piezometria	Quantitativa	
PZ-09	Piezometria	Quantitativa	
PZ-10	Piezometria	Quantitativa	
INA-01	Nível de água	Quantitativa	
INA-02	Nível de água	Quantitativa	
INA-03	Nível de água	Quantitativa	
INA-04	Nível de água	Quantitativa	Nível de água
INA-05	Nível de água	Quantitativa	
INA-06	Nível de água	Quantitativa	
INA-07	Nível de água	Quantitativa	
PR-01	Deslocamento	Quantitativa	
PR-02	Deslocamento	Quantitativa	
PR-03	Deslocamento	Quantitativa	
PR-04	Deslocamento	Quantitativa	
PR-05	Deslocamento	Quantitativa	
PR-06	Deslocamento	Quantitativa	Deslocamento superficial (Vertical e horizontal)
PR-07	Deslocamento	Quantitativa	
PR-08	Deslocamento	Quantitativa	
PR-09	Deslocamento	Quantitativa	
PR-10	Deslocamento	Quantitativa	
PR-11	Deslocamento	Quantitativa	
PR-12	Deslocamento	Quantitativa	
PR-13	Deslocamento	Quantitativa	
PR-14	Deslocamento	Quantitativa	
MV-01	Vazão	Quantitativa	Vazão de saída do dreno de fundo
Talude de Jusante	Inspeção Visual (Observação de Surgências)	Qualitativa	-
Talude de Jusante	Inspeção Visual (Observação de Trincas)	Qualitativa	-

3.6. Levantamentos geofísicos de campo (eletrorresistividade e potencial espontâneo)

Em julho de 2019 foi realizada na estrutura uma campanha de aquisição de dados de Eletrorresistividade e SP. O Método da Eletrorresistividade foi realizado através da técnica do Imageamento Elétrico Bidimensional (também conhecido por Tomografia Elétrica 2D) com o emprego do arranjo Schlumberger. O espaçamento entre os eletrodos foi de 5,00m. O levantamento compreendeu 4 seções de eletrorresistividade paralelas ao eixo da barragem de 320,00m de comprimento, totalizando mais de 1000 metros de levantamento. A Figura 30 apresenta o mapa com a localização das linhas geofísicas na estrutura.

Figura 30 : Mapa com localização das seções geofísicas levantadas.
Fonte: Própria Autoria



Foi possível observar nas seções bidimensionais pontos de baixa resistividade, que sinalizam presença de água (Figura 31). A partir das seções bidimensionais são realizadas as interpolações e gerados os sólidos tridimensionais da estrutura (Figura 32).

Figura 31 : Seção de eletrorresistividade (2D) do levantamento preliminar da Barragem.
 Fonte: Própria Autoria

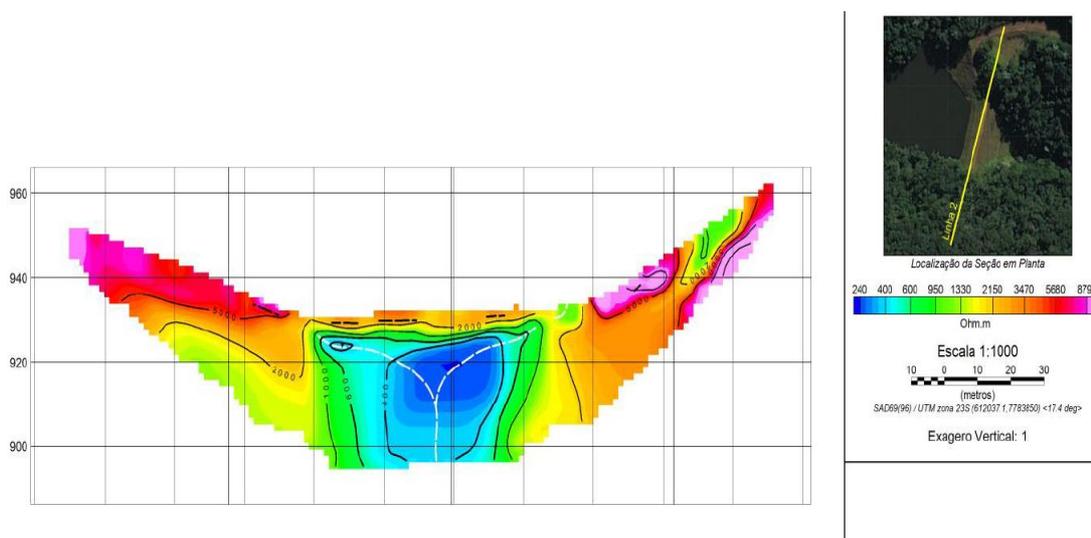
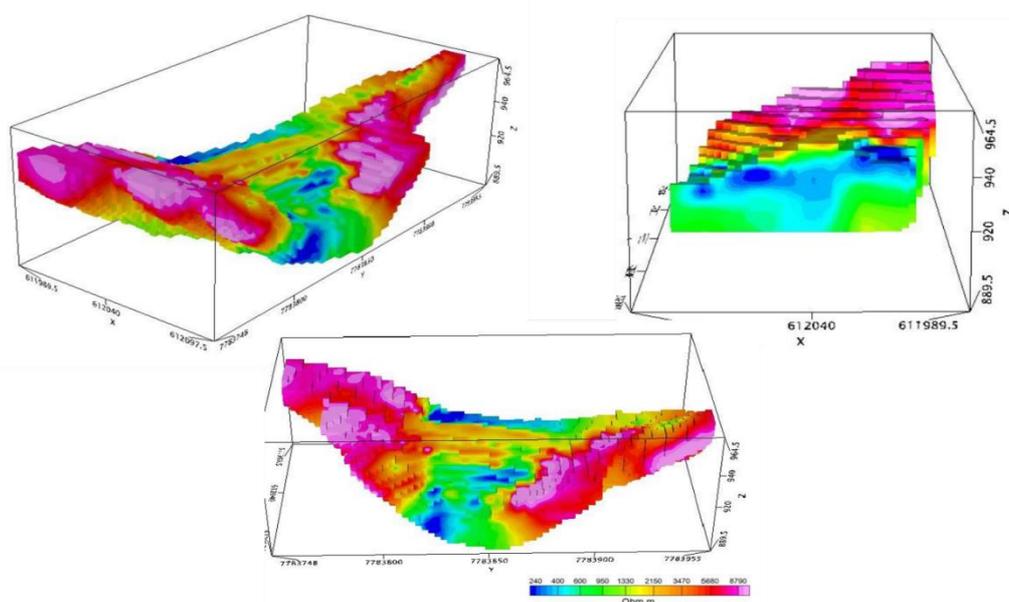


Figura 32 : Modelo tridimensional de eletrorresistividade da barragem.
 Fonte: Própria Autoria



Os levantamentos periódicos foram realizados nas mesmas seções do levantamento inicial, ou seja, quatro seções paralelas ao eixo da barragem a cada 15 dias, com a utilização do arranjo Schlumberger e espaçamento entre os eletrodos com espaçamento de 5,00 metros.

3.7. Levantamentos geofísicos de campo (eletrorresistividade) periódico

Os levantamentos periódicos foram realizados nas mesmas seções do levantamento inicial, ou seja, quatro seções paralelas ao eixo da barragem a cada 15 dias, iniciando no dia 17/05/2023 e finalizando no dia 31/03/2023, totalizando 22 (vinte e dois) levantamentos. A tabela 02 apresenta o histórico dos dias de levantamento dos dados.

Tabela 2: Levantamentos de dados geofísicos.

Levantamento	Data do Levantamento
1	17/05/2022
2	30/05/2022
3	08/06/2022
4	17/06/2022
5	27/06/2022
6	08/07/2022
7	30/07/2022
8	08/08/2022
9	29/08/2022
10	05/09/2022
11	30/09/2022
12	17/10/2022
13	28/10/2022
14	09/11/2022
15	29/11/2022
16	08/12/2022
17	23/01/2023
18	10/02/2023
19	27/02/2023
20	10/03/2023
21	20/03/2023
22	31/03/2023

3.8. Construção do banco de dados

Os levantamentos periódicos de eletrorresistividade (em formato grid) foram importados para o software Leapfrog Versão 2022.1.0, na qual foram criados sólidos tridimensionais de medidas de eletrorresistividade (Figura 33). Os instrumentos (piezômetros e indicadores de nível de água) também possuíam coordenadas geográficas (Norte, Leste e Cota) e dessa forma também foram importadas com as respectivas leituras das datas iguais aos dias de levantamentos geofísicos (Figura 34).

Figura 33 : Modelo tridimensional de eletrorresistividade da barragem. Levantamento do dia 31/03/2023.
 Fonte: Própria Autoria

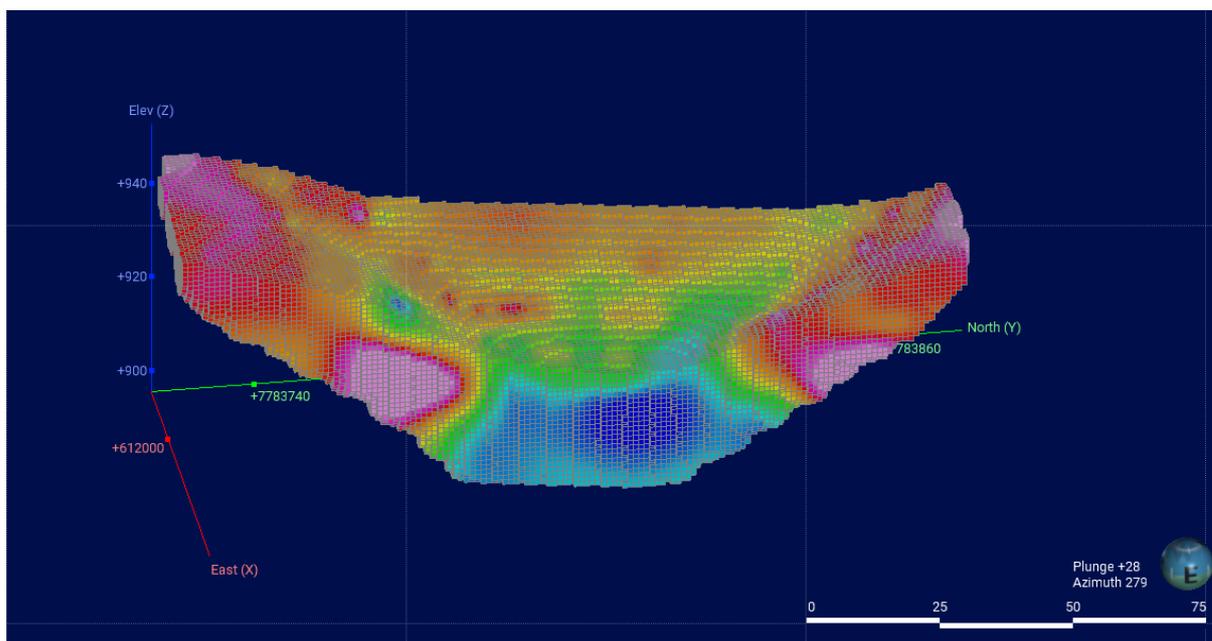
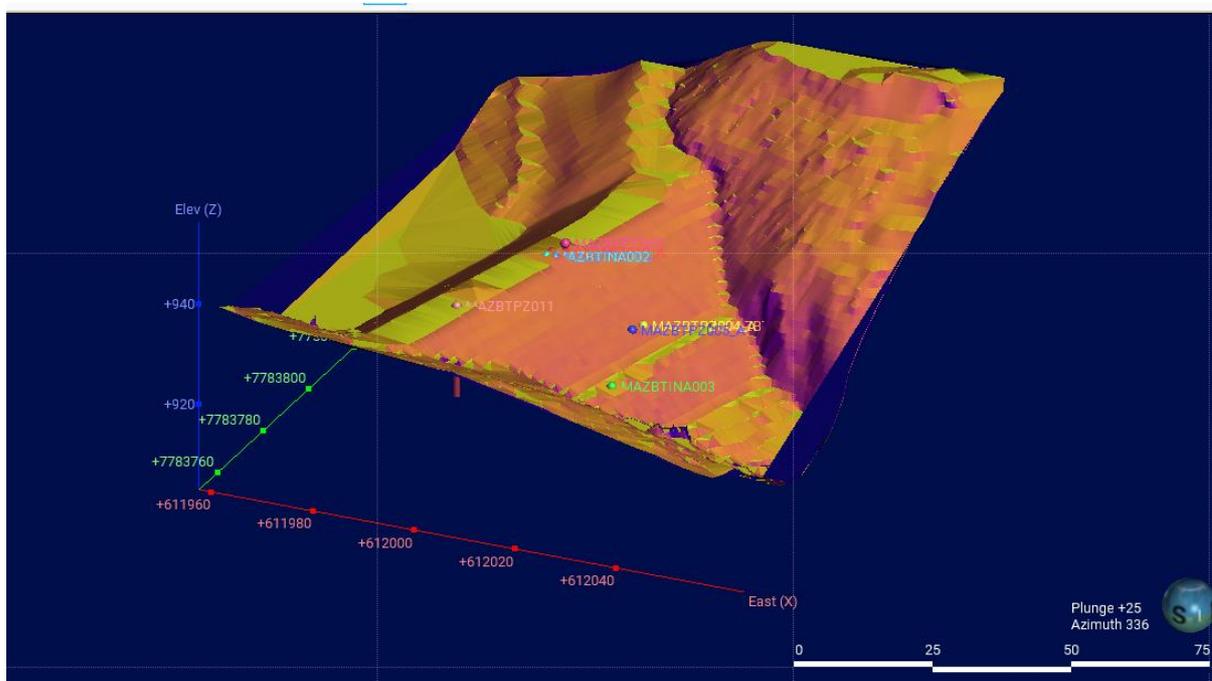


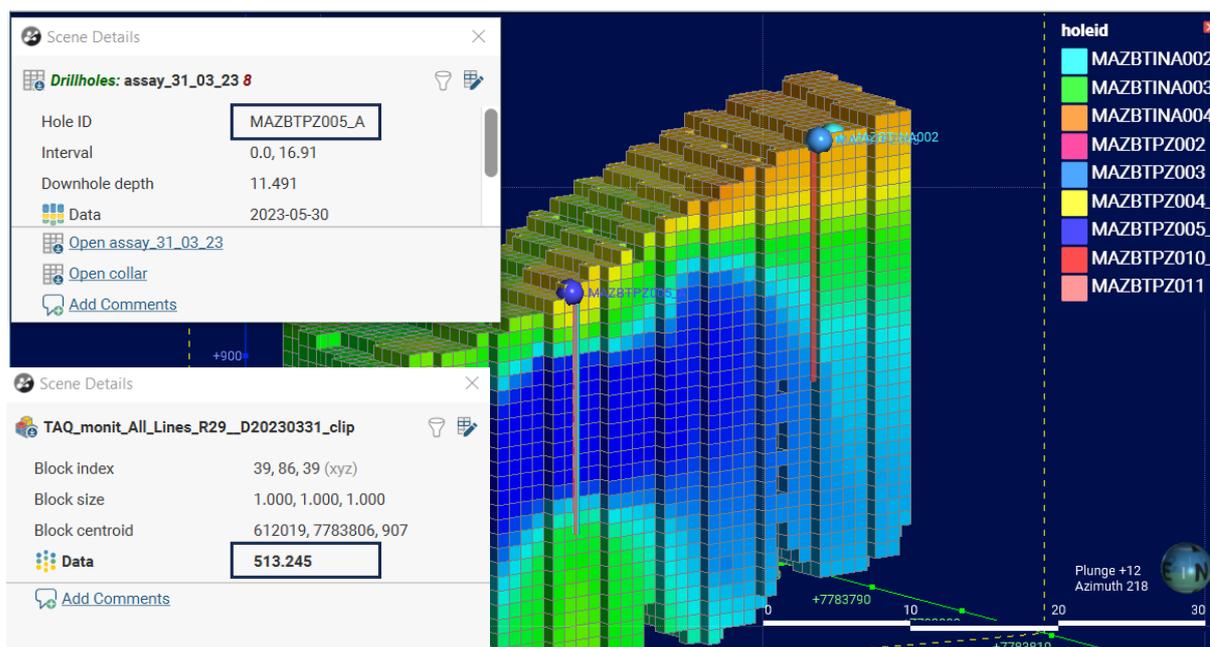
Figura 34 : Modelo tridimensional de piezometria e nível de água da barragem. Levantamento do dia 31/03/2023.
 Fonte: Própria Autoria



A partir da importação dos modelos foram definidos os pares de dados (eletrorresistividade e nível de água/ nível piezométrico) para cada instrumento e a referida data. Importante observar se instrumento seco foi selecionada a base do instrumento como ponto para levantamento. A Figura 35 apresenta o exemplo de um levantamento do dia 31/03/2023, por exemplo e do instrumento MAZBTPZ005_A.

Figura 35 : Exemplo da forma como foi realizada a compilação dos dados de eletrorresistividade e piezometria da barragem.

Fonte: Própria Autoria



Então foi possível gerar o banco de dados para avaliação das correlações entre dados geotécnicos e geofísicos da estrutura. Ademais, foi utilizado também o banco de dados de pluviometria de um pluviômetro locado próximo à estrutura. Para tais dados além da leitura pontual diária também foi feita a avaliação da pluviometria acumulada entre levantamentos geofísicos.

3.9. Análises estatísticas

A fim de verificar a correlação entre dados geofísicos e dados geotécnicos foram realizadas análises estatísticas dos dados, utilizando a ANOVA, Correlação de Pearson, regressão múltipla sem interação, regressão múltipla com interação e regressão linear. Foi utilizado o programa R para verificação estatística. Foi considerada a probabilidade de 95% para rejeição da hipótese nula($p < 0,05$).

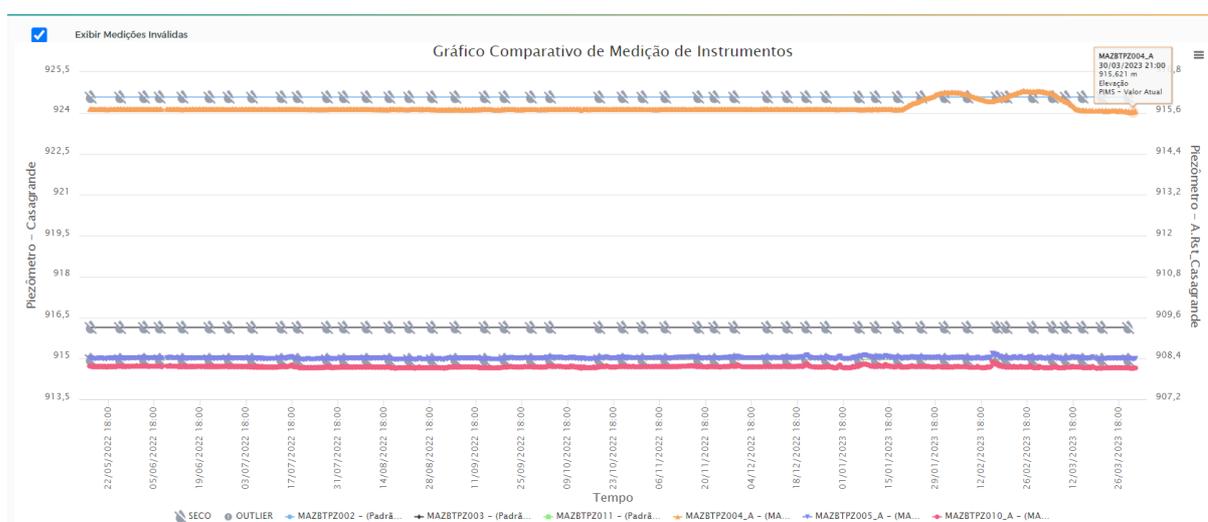
A análise ANOVA realizou o teste no qual o objetivo era ter a Eletroresistividade explicada pela ocorrência de precipitação (em mm) e pelo tempo (quantidade de dia que amostragem foi realizada). Já a correlação de Pearson objetivou identificar a relação entre eletroresistividade e leitura do piezômetro, bem como a eletroresistividade e levantamento da precipitação.

Já as regressões múltiplas objetivaram explicar a Eletroresistividade pelo número de dias de chuva bem como a regressão linear.

4. RESULTADOS

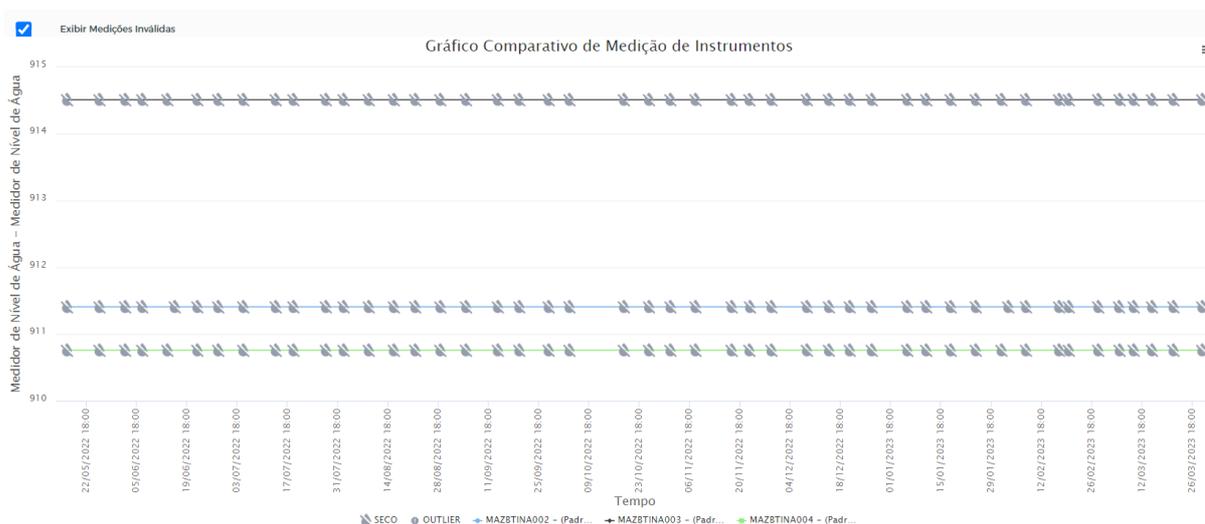
Com objetivo de verificar as correlações entre os dados geofísicos e dados geotécnicos foram avaliados de forma gráfica os dados e suas correlações. Nota-se que com exceção do instrumento MAZBTPZ002 os demais estiveram secos ou tiveram pouca variação ao longo do tempo, conforme mostrados na Figura 39 e Figura 40.

Figura 36 : Série histórica dos piezômetros instalados na barragem.
Fonte: Própria Autoria



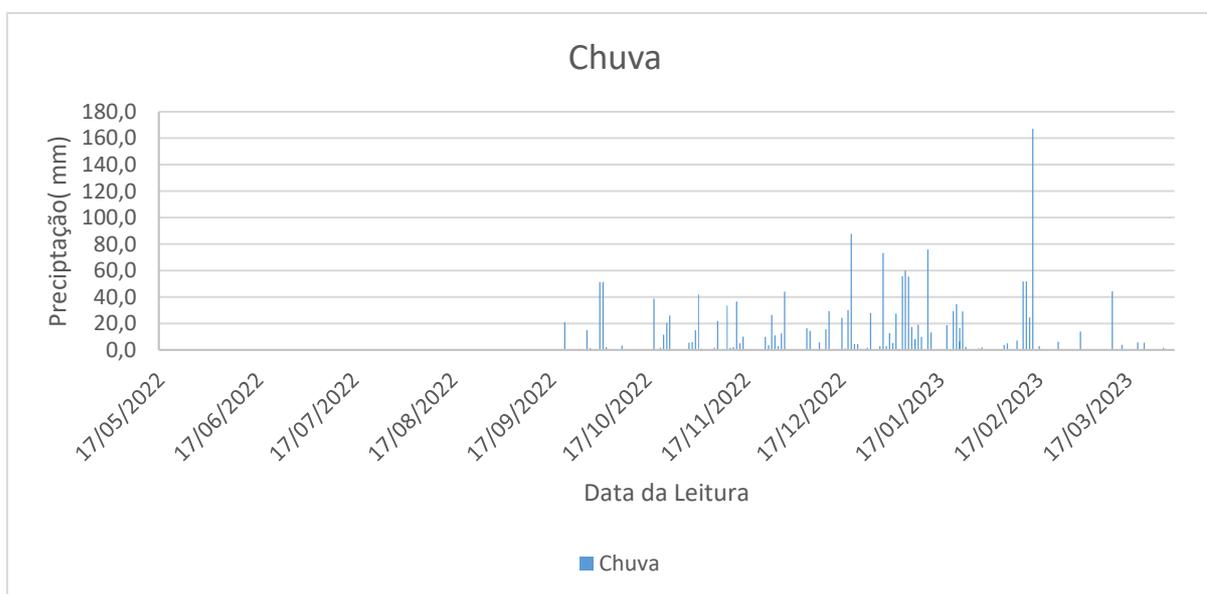
Os medidores de nível de água instalados na estrutura mantiveram seco durante todo o período levantado, como pode ser observado na Figura 39.

Figura 37 : Série histórica dos indicadores de nível de água instalados na barragem.
Fonte: Própria Autoria



No período observado nota-se que as medições de maior precipitação ocorreram no mês de fevereiro. Observa ainda que a menor precipitação foi nula e a maior precipitação em torno de 160,0mm.

Figura 40: Série histórica da chuva de um pluviômetro instalado próximo à barragem.
Fonte: Própria Autoria



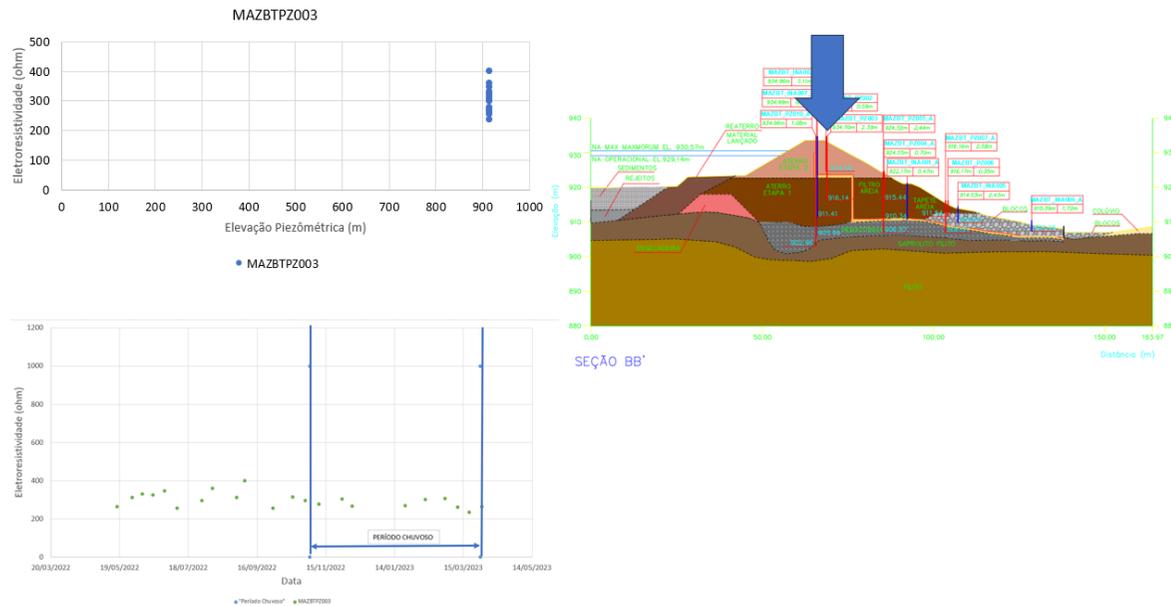
4.1. Avaliação qualitativa dos dados

Será apresentado a seguir cada ponto de amostragem de forma qualitativa para verificar a correlação entre dados.

O piezômetro MAZBTPZ002 possui 10,00m de profundidade, e sua cota de topo está localizada na crista da estrutura, na seção principal (de maior altura), conforme pode ser evidenciado na seção geológica da Figura 38. O bulbo piezométrico está no Aterro Etapa 02. Os valores de resistividades elétricas para os pontos de leitura desse instrumento variaram de 412ohm até 939ohm. O instrumento não teve variação de leitura do nível piezométrico no período.

O piezômetro MAZBTPZ003 possui 18,50m de profundidade, e sua cota de topo também está localizada na crista da estrutura, na seção principal conforme pode ser evidenciado na seção geológica da Figura 39. O bulbo piezométrico está no Aterro Etapa 01. Os valores de resistividades elétricas para os pontos de leitura desse instrumento variaram de 235ohm até 398ohm, com comportamento cíclico da resistividade elétrica ao longo do tempo e nenhuma variação significativa no período chuvoso. O instrumento não teve variação de leitura do nível piezométrico no período.

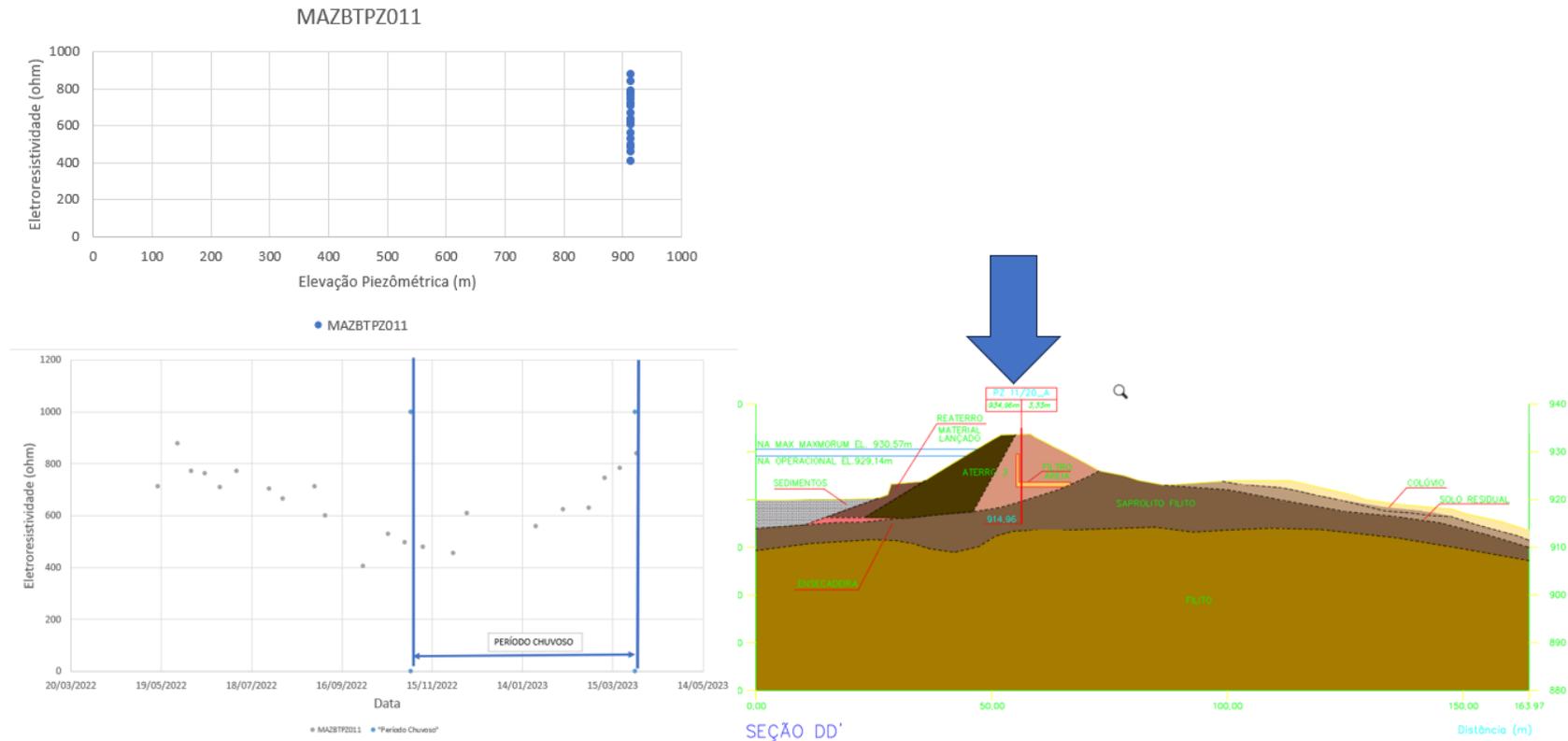
Figura 39 : Avaliação qualitativa das leituras do piezômetro MAZBTPZ003.
Fonte: Própria Autoria



O piezômetro MAZBTPZ011 possui 20,00m de profundidade, e sua cota de topo também está localizada na crista da estrutura, na seção de ombreira direita, conforme pode ser evidenciado na seção geológica da Figura 40. O bulbo piezométrico está no Saprolito de Filito. Os valores de

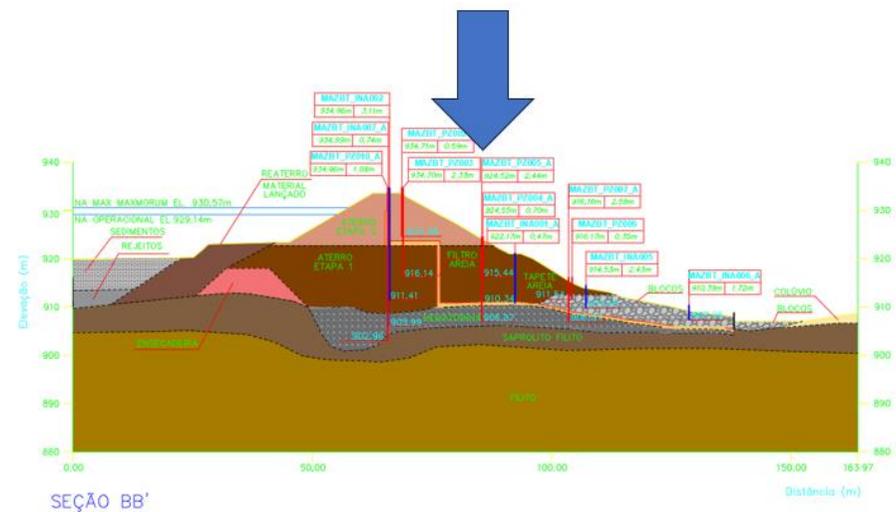
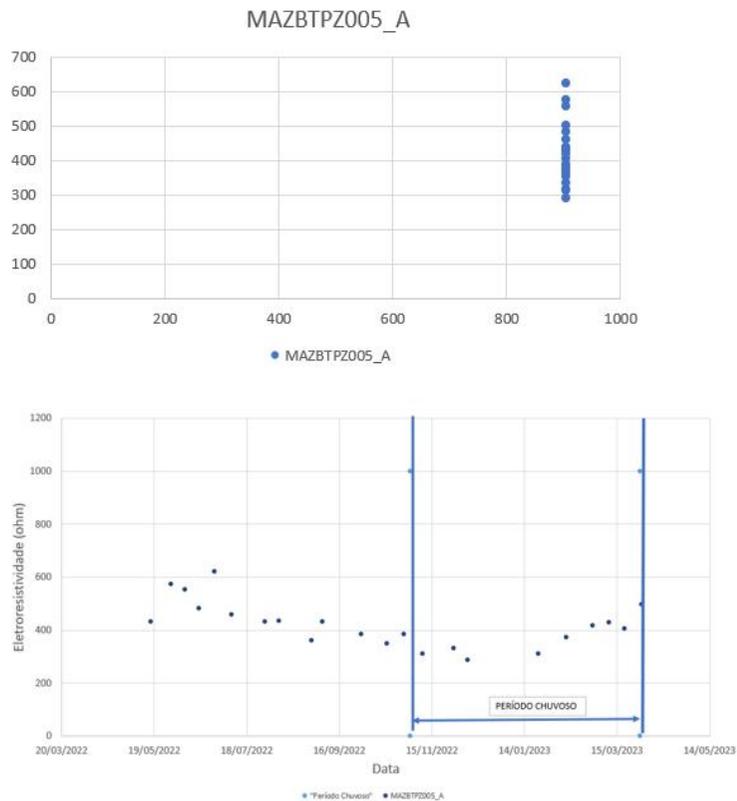
resistividades elétricas para os pontos de leitura desse instrumento variaram de 404 ohm até 877 ohm, com decréscimo de leituras de eletrorresistividade no período seco e acréscimo de eletrorresistividade no final do período chuvoso. O instrumento não teve variação de leitura do nível piezométrico no período.

Figura 40 : Avaliação qualitativa das leituras do piezômetro MAZBTPZ011.
 Fonte: Própria Autoria



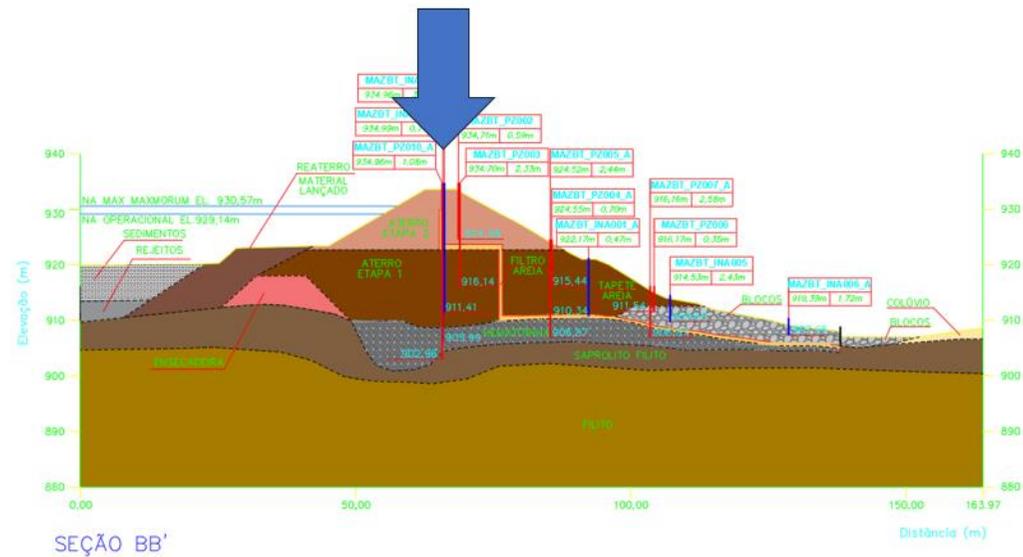
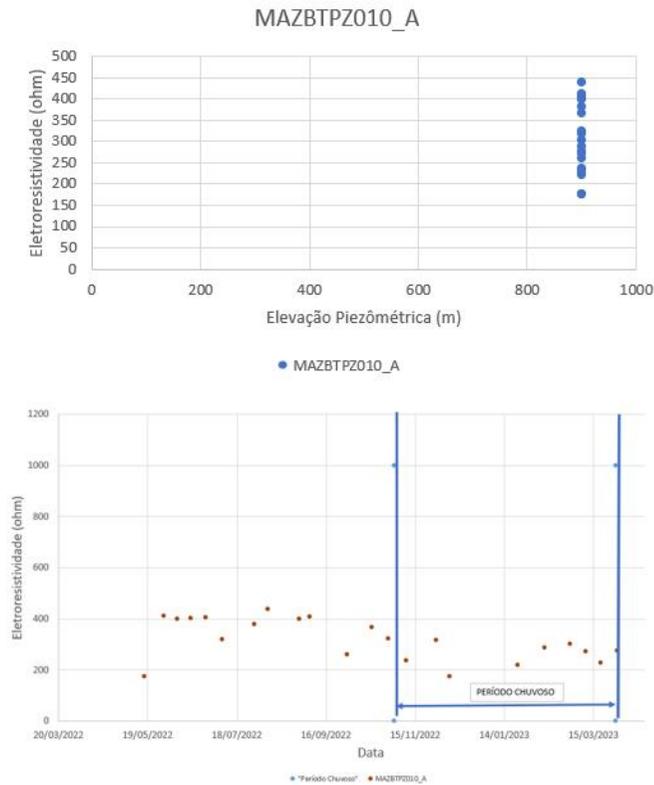
O piezômetro MAZBTPZ005_A possui 17,62m de profundidade, e sua cota de topo está localizada no talude de jusante, na região de maior altura da barragem, conforme pode ser evidenciado na seção geológica da Figura 41. O bulbo piezométrico está na Hematitinha. Os valores de resistividades elétricas para os pontos de leitura desse instrumento variaram de 287ohm até 621ohm, com leve decréscimo de leituras de eletrorresistividade no período chuvoso. O instrumento não teve variação de leitura do nível piezométrico no período.

Figura 41 : Avaliação qualitativa das leituras do piezômetro MAZBTPZ05_A.
 Fonte: Própria Autoria



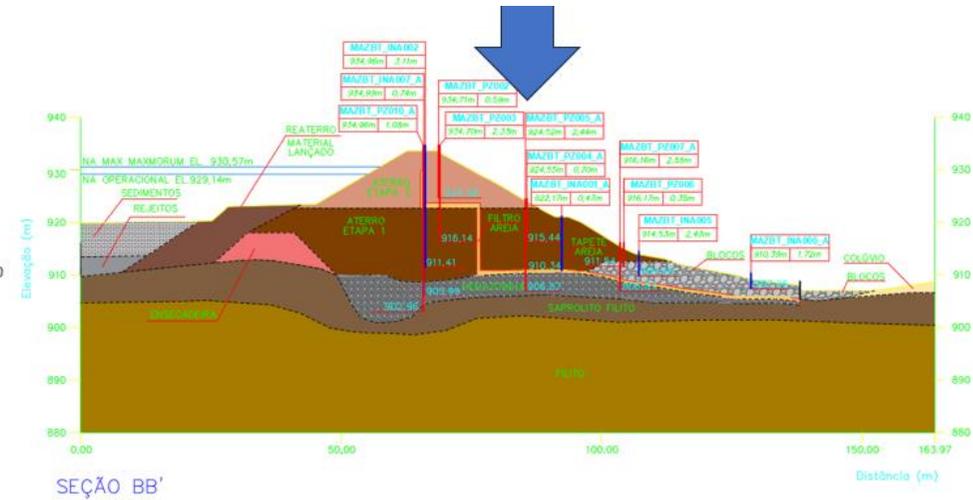
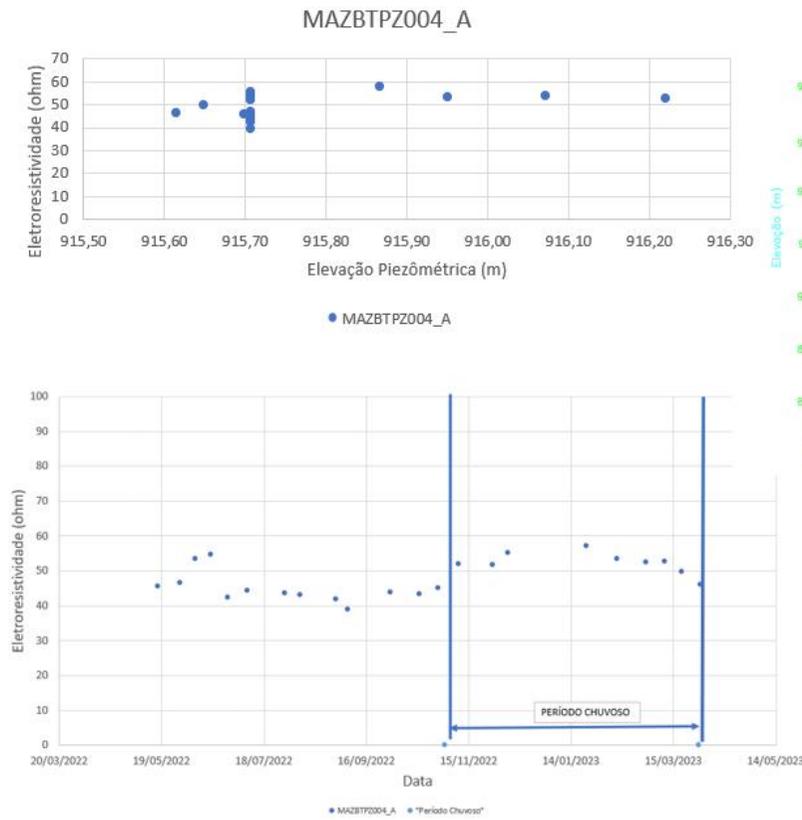
O piezômetro MAZBTPZ010_A possui 31,62m de profundidade, e sua cota de topo está localizada na crista da estrutura, na região de maior altura da barragem, conforme pode ser evidenciado na seção geológica da Figura 42. O bulbo piezométrico está no Saprolito de Filito/Hematitinha. Os valores de resistividades elétricas para os pontos de leitura desse instrumento variaram de 174ohm até 437ohm, com leve decréscimo de leituras de eletroresistividade no período chuvoso e comportamento cíclico. O instrumento não teve variação de leitura do nível piezométrico no período.

Figura 42 : Avaliação qualitativa das leituras do piezômetro MAZBTPZ010_A.
 Fonte: Própria Autoria



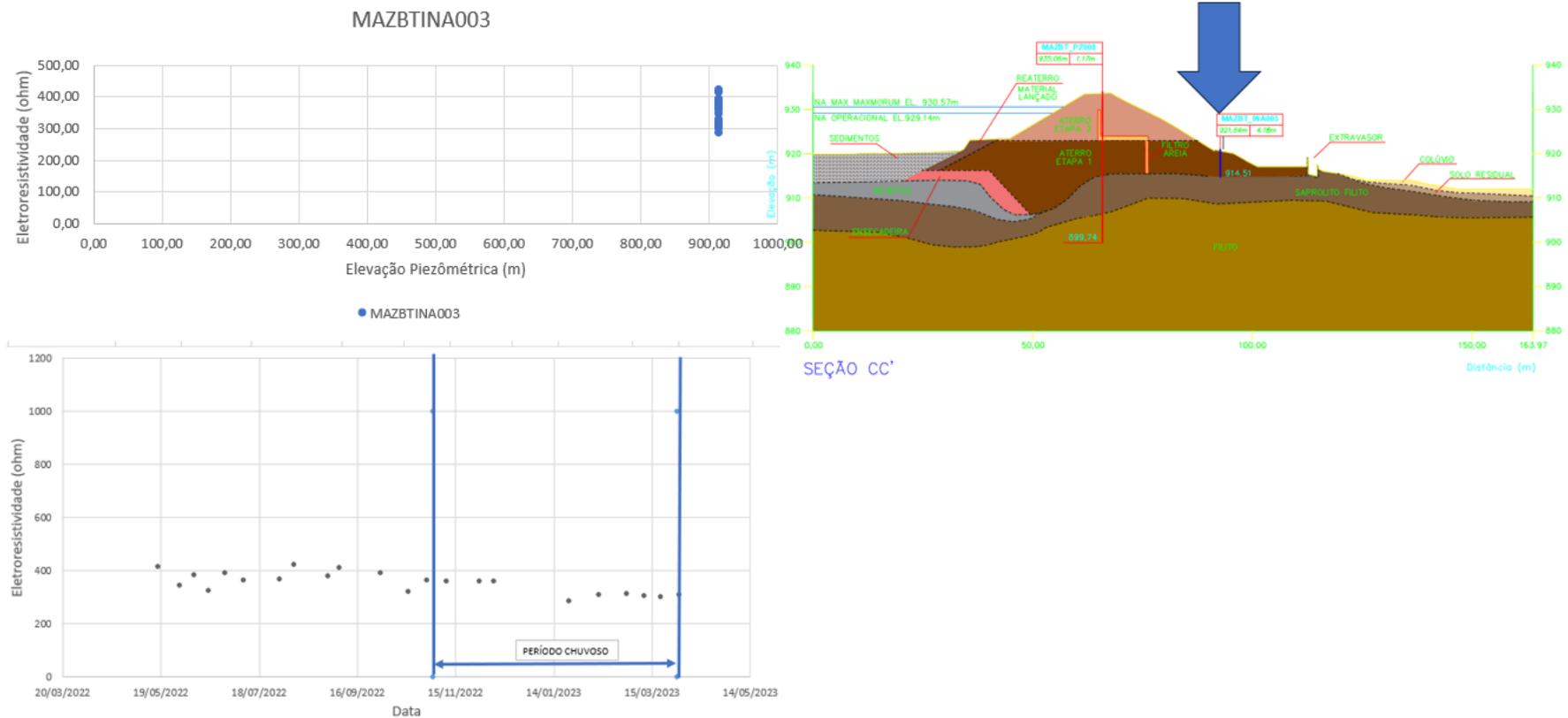
O piezômetro MAZBTPZ004_A possui 8,34m de profundidade, e sua cota de topo está localizada no talude de jusante, conforme pode ser evidenciado na seção geológica na Figura 43. O bulbo piezométrico está no Aterro Etapa 01. Os valores de resistividades elétricas para os pontos de leitura desse instrumento variaram de 39ohm até 57ohm, sem muita variação ao longo do período chuvoso / seco. O instrumento teve variação de leitura do nível piezométrico no período, no qual foi possível observar que menor carga piezométrica está associada a menor eletrorresistividade.

Figura 43 : Avaliação qualitativa das leituras do piezômetro MAZBTPZ004_A.
Fonte: Própria Autoria



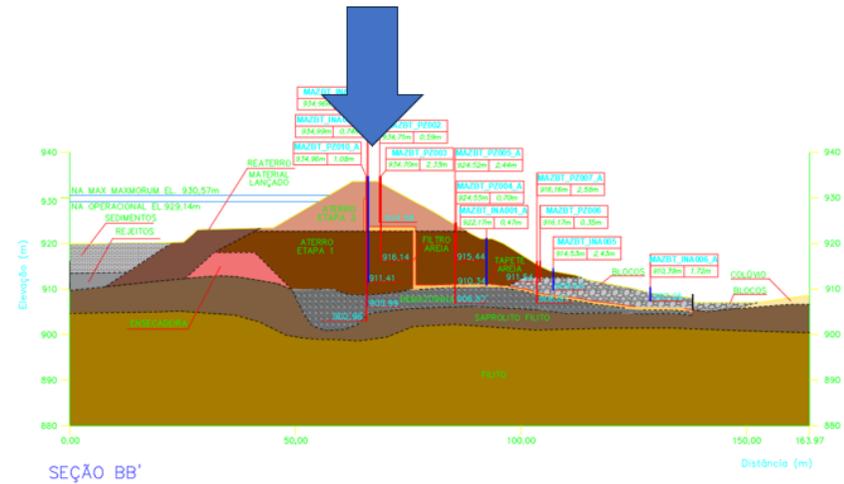
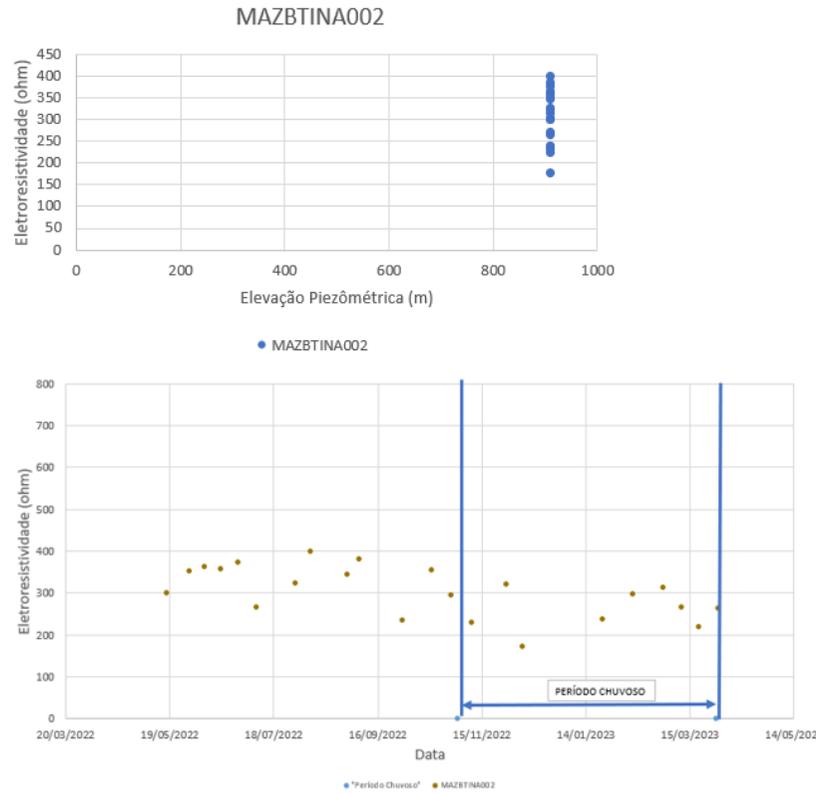
O indicador de nível de água MAZBTINA003 possui 6,34m de profundidade, e sua cota de topo está localizada na bermagem intermediária de jusante, conforme pode ser evidenciado na seção geológica na Figura 44. O instrumento passa pelo aterro etapa 01. Os valores de resistividades elétricas para os pontos de leitura desse instrumento variaram de 286ohm até 442 ohm, com menores medidas no final do período chuvoso. O instrumento não teve variação de leitura do nível de água no período.

Figura 44 : Avaliação qualitativa das leituras do piezômetro MAZBTINA003.
 Fonte: Própria Autoria



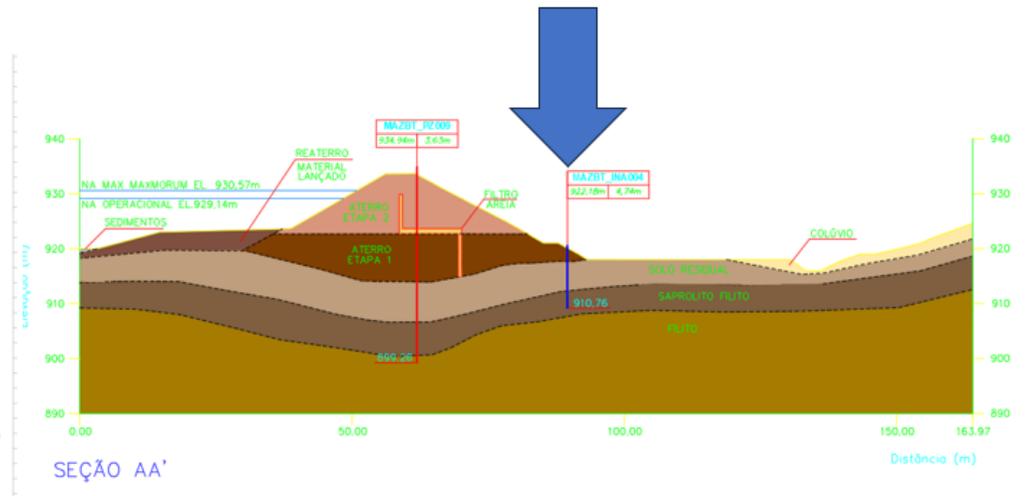
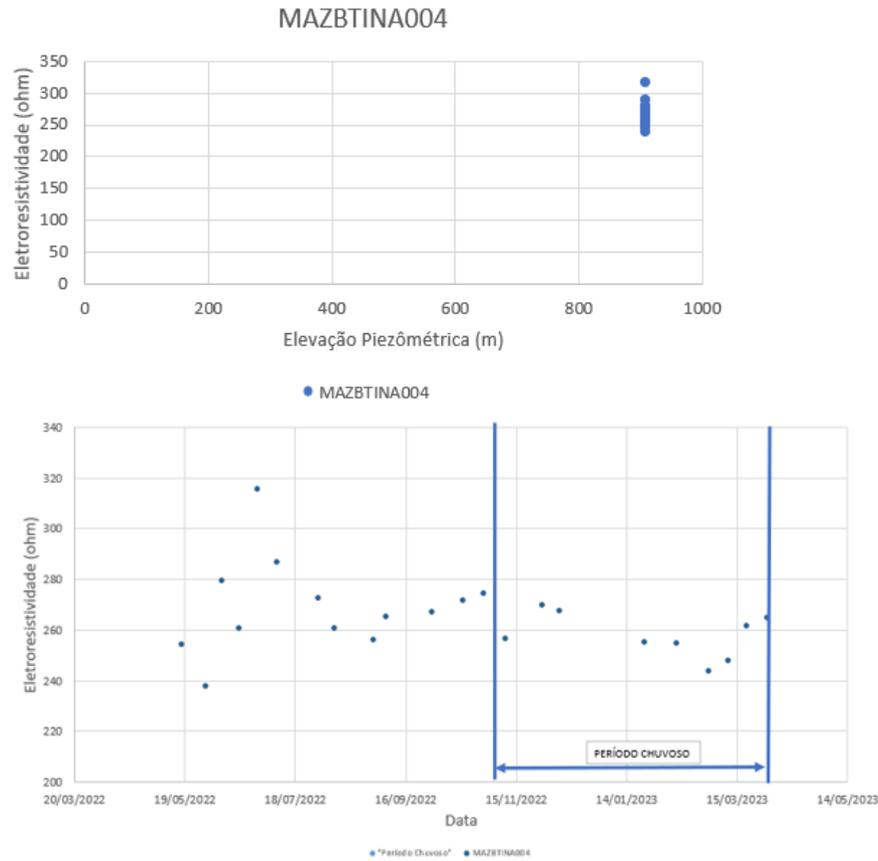
O indicador de nível de água MAZBTINA002 possui 23,23m de profundidade, e sua cota de topo está localizada crista da estrutura, conforme pode ser evidenciado na seção geológica na Figura 45. O instrumento passa pelo aterro etapa 01 e aterro etapa 02. Os valores de resistividades elétricas para os pontos de leitura desse instrumento variaram de 174ohm até 399 ohm, com menores medidas no final do período chuvoso. O instrumento não teve variação de leitura do nível de água no período.

Figura 45 : Avaliação qualitativa das leituras do piezômetro MAZBTINA002.
 Fonte: Própria Autoria



O indicador de nível de água MAZBTINA004 possui 11.42m de profundidade, e sua cota de topo está localizada na berma intermediária de jusante, conforme pode ser evidenciado na seção geológica na Figura 46. O instrumento passa pelo aterro etapa 01 e saprólito de filito. Os valores de resistividades elétricas para os pontos de leitura desse instrumento variaram de 238ohm até 316 ohm, com menores medidas no período chuvoso. O instrumento não teve variação de leitura do nível de água no período.

Figura 46 : Avaliação qualitativa das leituras do piezômetro MAZBTINA004.
 Fonte: Própria Autoria



4.2. Avaliação quantitativa dos dados

A planilha com o banco de dados encontra-se no anexo A desse documento.

4.1.1 Resultados ANOVA

A ANOVA, análise de variância, tem como objetivo comparar a média de população amostral, e assim identificar se essas médias diferem significativamente entre elas. O fator precipitação e nem a questão temporal explicou não significativamente a variação da média dos valores de resistividade ($p < 0,05$) (Tabela 4).

Tabela 3: Tabela ANOVA

Fator	Soma	Média quadrática	Somatório F	F	P valor
Precipitação (mm)	1	31588	31588	0.806	0.371
Tempo (dias)	20	73038	3652	0.093	1.000
Resíduos	176	69000817	39209		

4.1.2 Resultados Regressão Linear Múltipla sem Interação

A regressão múltipla pode ser usada no intuito de melhorar o modelo desenvolvido para explicar o comportamento das variáveis do banco de dados que estão sendo estudadas. Em regressão múltipla, a variável determinada é aquela que tenha correlação significativa com a variável a ser prevista. O resultado da regressão linear indicou que a eletrorresistividade é explicada significativamente pela variação piezométrica (Tabela 5).

Tabela 4: Tabela Regressão linear múltipla

	Varição	Erro	t	P-valor
Intercepto	-7307,49	2043	-3,577	0,00044
Precipitação (mm)	-0,6535	1,393	-0,469	0,639405
Varição piezométrica (m)	8,4216	2,375	3,764	0,000222
Tempo (dias)	-0,1217	0,131	-0,928	0,35475

4.1.3 Resultados Regressão Linear Múltipla com Interação

A regressão linear múltipla com interação objetivou verificar se de forma combinada as variáveis teriam influência sobre o resultado final da análise. A interação entre os fatores não foi capaz de explicar (p -valor $> 0,05$) os valores de resistividade encontrados (Tabela 6)

Tabela 5: Tabela Regressão linear múltipla com interação.

	Varição	Erro	t	P-valor
Intercepto	-1567	3690	-0,425	0,672
Precipitação (mm)	335	1936	0,173	0,863

Varição piezométrica (m)	2,134	4,04	0,528	0,598
Tempo (dias)	-36,91	22,7	-1,626	0,106
Precipitação (mm) : Varição piezométrica (m)	-36,59	2,12	-0,173	0,863
Precipitação (mm) e Tempo (dias)	-1,819	9,573	-0,198	0,849
Varição piezométrica (m) e Tempo (dias)	0,04029	284,6	1,621	0,107
Precipitação (mm), Varição piezométrica (m) e Tempo (dias)	0,001984	0,01	0,189	0,85

5. DISCUSSÃO

A utilização de métodos indiretos aplicados aos métodos diretos é de suma importância, uma vez que existe um ganho expressivo na lateralidade das informações e possibilidade de extrapolação delas. Oliveira (2018) afirma que os dados geofísicos geram imagens contínuas de subsuperfície, possibilitando a identificação de possíveis irregularidades na estrutura da barragem. Mailani (2006) *apud* Oliveira (2018) afirma que os métodos têm grande possibilidade de detectar modos de falha tal como erosão interna. Dessa forma fica nítido a potencialidade da utilização de dados geofísicos integrados com dados geotécnicos para ganho de confiança nas informações das estruturas.

Através da análise dos dados coletados ao longo do período de onze meses de monitoramento foi possível obter os seguintes resultados: 1) a resistividade foi explicada significativamente através da variação piezométrica; 2) a precipitação não teve relação significativa com a eletrorresistividade e 3) a eletrorresistividade não apresentou variação com relação ao tempo na amostragem coletada.

A variação entre eletrorresistividade e piezometria era esperado uma vez que baixas resistividades elétricas são associadas com a presença de água.

A eletrorresistividade não respondeu imediatamente à pluviometria. De acordo com Canatto (2021), no estudo em uma pequena barragem localizada em Minas Gerais houve uma variabilidade nos valores de eletrorresistividade entres os levantamentos, com os meses de baixa pluviometria (agosto, setembro e outubro) apresentando maiores amplitudes de resistividade, enquanto os meses com maior acúmulo de chuvas (novembro, dezembro e

janeiro) apresentaram baixos valores em resistividade com pouca amplitude. Isso foi explicado pela grande influência que a pluviosidade causa nos padrões de saturação de barragens. É importante destacar que o tempo de resposta das medições e variação da eletrorresistividade podem desencadear diferentes resultados. Ou seja, para um trabalho futuro, poderia ser relacionado a correlação temporal entre os dados com a variação de tempo.

A correlação entre a variação entre eletrorresistividade ao longo do tempo também era esperada. No entanto para o presente estudo não foi possível observar correlação temporal entre os dados geofísicos. Foi possível observar que no ano dos levantamentos não houve dias sucessivos com pluviometria e sim picos isolados de chuva, o que não gerou uma saturação constante do solo com alterações significativas na eletrorresistividade.

O monitoramento geofísico mostrou-se importante e poderá ser um incremento de informações para estruturas geotécnicas. Novas pesquisas podem ser realizadas de forma a verificar a aplicabilidade das correlações entre eletrorresistividade e piezometria em levantamentos de outras barragens, para identificar se a correlação se aplica a outras estruturas, que possuem diferentes condições de contorno, tais como método construtivo, material de construção, variações de piezometria interna, etc

6 CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE AVALIAÇÕES FUTURAS

O presente trabalho teve como objetivo correlacionar dados geotécnicos com dados geofísicos de levantamento periódicos de uma barragem de rejeitos.

Através da análise dos resultados foi possível constatar:

- Em termos de variações de níveis de água bem como de cota piezométrica nota-se que os pontos de levantamento não tiveram variações significativas, tendo muitos instrumentos com leituras secas grande parte dos levantamentos. Com isso não foi possível observar dispersão grande dos dados geotécnicos;
- A grandeza que mais se correlacionou com os levantamentos de eletrorresistividade foram as cotas piezométricas através das análises estatísticas realizadas;
- Destaca-se que através do banco de dados levantados a data do levantamento não influenciou na resposta da eletrorresistividade. A tal fato atribui-se o pequeno

índice pluviométrico e a capacidade de resposta do maciço frente a pequenas variações internas de nível de água (corroborada pela variação de leitura dos piezômetros)

Como sugestão de estudos futuros, propõem-se:

- Integrar os bancos de dados geofísicos de outras barragens com piezometria/ nível de água e testar as correlações existentes;
- Tratar de forma específica os dados de períodos em que houve maiores índices pluviométricos.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 7117-1 **Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geolétrica**. Brasil: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

ABNT NBR 13028. **Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água— Requisitos**-. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

Almeida L. G., Castro P. T., Endo I., Fonseca M. A. 2005. **O Grupo Sabará no Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: Uma Revisão Estratigráfica**. Rev. Bras. Geoc. 35(2):177-186

Alkmim, F.F.; Marshak, S. **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero** 1998.

ANA – Agência Nacional de Águas. Curso de Segurança de Barragens. Disponível em https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/14/Unidade_1-modulo3.pdf. Último acesso em 08/02/2022.

Araujo, E.H.S. de. **Sistema inteligente para estimar a porosidade em sedimentos a partir da análise de sinais GPR**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, 2013.

Borges, W. R. **Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade.** 2002. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

Braga, A.C. de O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização Induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem - Metodológica e prática.** Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, São Paulo, Brasil, 2006.

Canatto, B.F. **Geofísica eletrorresistiva aplicada ao monitoramento temporal da percolação de fluidos no interior de estruturas de barragens.** Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, Julho de 2021.

Coulibaly, Y., Belem, T., & Cheng, L. Z. (2017). **Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine.** International Journal of Mining Science and Technology, 27(4), 701–710. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.012>.

Dorr J. V. N. II. 1969. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** USGS/DNPM. Professional Paper 641-A. 110p.

Endo I., Oliveira A. H., Peres G. G., Guimarães M. L. V., Lagoeiro L. E., Machado R., Zavaglia. G., Rosas C. F.Melo R. J. 2005. **Nappe Curral: Uma megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização.** X Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos / Iv International Symposium on Tectonics, Curitiba. Boletim de Resumos Expandidos, p. 279-282.

Fonseca, A. da R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica - Estudo de caso das barragens da UHE São Simão.** 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2003.

França, T. R. do S. **Monitoramento geotécnico em estruturas de disposição de rejeitos..** Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal de Ouro Preto, 2023.

Freitas, G.A.S.C.de; Freitas, I.V.L.de, Cruz, F.A.R. da. **Proposição metodológica para análise de instrumentação e monitoramento de barragem de rejeitos**. 17º Congresso Nacional de Geotecnia, Portugal, 2021.

Gallas, J.D.F. **O método do potencial espontâneo (SP) – uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais**. Revista Brasileira de Geofísica, 2005.

Geologia de engenharia e ambiental, volume 2: métodos e técnicas/ editores Antônio Manoel dos Santos Oliveira, João Jerônimo Monticelli. São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2018.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. (2019). Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeito, Brasília, Brasil. <https://www.altaresolucao.com.br/sondagemeletrica.php>. Último acesso em 21/01/2022.

<http://www.geolosfera.com.br/geofisica.html>. Último acesso em 21/01/2022.

<https://www.dinadrill.com.br/servicos/sismografia>. Último acesso em 23/08/2022.

<https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. Último acesso em 23/08/2022.

<https://igeologico.com.br/voce-sabe-quais-sao-os-tipos-de-barragens/>. Último acesso em 22/11/2023.

<https://www.inovacivil.com.br/barragens/> . Último acesso em 22/11/2023.

<https://irrigacao.blogspot.com/2014/07/vertedor-triangular-para-aferir-vazao.html>.

Último acesso em 22/11/2023.

https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11080/11080_5.PDF. Último acesso em 22/11/2023.

<https://www.idd.edu.br/downloads-idd/?tcc=14>. Último acesso em 22/11/2023.

ICOLD(2014). Billetin 158. Dam Surveillance Guide, Paris.

<https://www.groundprobe.com/groundprobe-extends-fleet-with-new-tactical-vehicle-mounted-monitoring-solution/>. Último acesso em 22/11/2023.

<https://www.geomin.com.br/produtos>. Último acesso em 22/11/2023.

<https://minerajr.ufop.br/blog.texto26setembro.html> . Ultimo acesso em 26/11/2023

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. Disponível em https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/14/Unidade_1-modulo3.pdf.
Último acesso em 08/02/2022.

Ladeira, J.E.R. **Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos o caso UHR– São Simão.** Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007

Lago, A. L; Elis, V.R; Giacheti , H.L. **Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP.** Revista Brasileira de Geofísica, 2006.

Lima, D.S; Lambiazzi, G; Santos; G.C. dos; Godoy,M. C. M. de; Pamboukian, S.V.de. **Análise do rompimento de barragens de rejeitos. 2021.**

Machado, W. G. F.. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeito da mineração.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. Tese de Mestrado. 155 p, 2007.

Machado N., Schrank A. Noce C.M., Gauthier G. 1996. **Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: implications for greenstone belt setting and evolution of a transamazonian foreland basin in Quadrilitero Ferrifero, Southeast Brazil.** Earth and Planetary Science Letters. 141 (1996) 259-276.

Mailani, G. 2006. **Monitoring of Tailing Dams with Geophysical Methods.** Luleå University of Technology, Department of Chemical Engineering and Geosciences, Division of Ore Geology and Applied Geophysics, Licentiate Thesis, 74 p.

Mainali, G., Nordlund, E., Knutsson, S., & Thunehed, H. (2015). **Tailings dams monitoring in Swedish mines using self-potential and electrical resistivity methods.** *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20(13), 5859–5875.

Martini Martini R. J.; Caetano T. R.; Santos H. A.; Aranha P. R.A. 2016. **Deposição de rejeitos de minério de ferro em reservatórios: uma aplicação do método GPR.** Revista Ambiente&Água, 11(4): 878-890.

MIRANDA, T. M. **Análise do potencial de liquefação de um rejeito de minério de ferro por meio de ensaios de laboratório e de campo.** 2018. 136 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

Netto, L.G.; Gandolfo, O.C.B; Filho, W.M; Dourado, J.C ; Moreira, C.A; Camarero, P.L.

A. utilização de métodos geofísicos na investigação de uma pequena barragem de terra.
Revista Brasileira de Geofísica, 2020.

Nikonow, W., Rammlmair, D., & Furche, M. (2019). **A multidisciplinary approach considering geochemical reorganization and internal structure of tailings impoundments for metal exploration.** Applied Geochemistry, 104, 51–59.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.03.014>

Oliveira, L.A. **Caracterização de barragens de rejeito através de métodos geofísicos elétricos: estudo de caso na barragem b1 de Cajati, São Paulo.** Trabalho Final de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018. Rio de Janeiro, Brasil.

Rittgers, J. B.; Revil, A.; Planes, T.; Mooney, M. A.; Koelewijn, A. R. 2014. **4-D imaging of seepage in earthen embankments with time-lapse inversion of self-potential data constrained by acoustic emissions localization.** Geophysical Journal International, 200 (2), 758-772.

SANTOS, Laryssa Cortes. **Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

Silveira, J.F. A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento.** Oficina de Textos. 2nd ed., São Paulo, Brasil, 2015.

. A. Bogoslovsk Y, A. A. Ogilvy. **Application of geophysical methods for studying the technical status of earth dam.** Geophysical Prospector, 1970

Zarroca, M., Linares, R., Velásquez-López, P. C., Roqué, C., & Rodríguez, R. (2015). **Application of electrical resistivity imaging (ERI) to a tailings dam project for artisanal and small-scale gold mining in Zaruma- Portovelo, Ecuador.** Journal of Applied Geophysics, 113, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.11.022>