

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ
ENGENHARIA DE MINAS

IARA FERNANDES MOREIRA

MENSURAÇÃO E AVALIAÇÃO DA PRESSÃO NEUTRA EM BARRAGENS:
UM ESTUDO DE CASO

ARAXÁ-MG

2022

IARA FERNANDES MOREIRA

**MENSURAÇÃO E AVALIAÇÃO DA PRESSÃO NEUTRA EM BARRAGENS:
UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: M.Sc. Leonardo Vinícius Paixão Daciolo.

Coorientador: Dr^o Allan Erlikhman Medeiros dos Santos

ARAXÁ-MG

2022

RESUMO

Barragem é o método mais comum de disposição de rejeitos em mineração. Tais estruturas são bastante complexas e exigem monitoramento e inspeção durante as fases de construção, operação até o processo de descaracterização. Toda essa atenção deve ocorrer principalmente em barragens de grande porte e/ou aquelas que envolvam algum nível de emergência, como apresenta este estudo de caso da Barragem Sul Inferior localizada no Estado de Minas Gerais. O rompimento de uma barragem pode acarretar perdas humanas, ambientais, materiais e econômicas. Citam-se como principais fatores que ocasionam o rompimento de barragens, a percolação excessiva de água na estrutura, deformações, liquefação e galgamento. A fim de investigar o comportamento da estrutura, há a necessidade do acompanhamento do controle de nível de água do reservatório, da poropressão, das deformações do maciço e das vazões máximas esperadas para o extravasores. Considerando a grande importância do entendimento das barragens diante as empresas e a sociedade, o presente trabalho objetiva identificar técnicas e procedimentos de monitoramento de poropressão destas estruturas, reunindo dados históricos de medição dos instrumentos e propostas de distribuição de pressões neutras no interior da barragem, além de possibilitar a análise de percolação mediante um estudo de caso, reproduzindo a partir de informações geomecânicas do projeto. A metodologia empregada no estudo contou com revisão bibliográfica, análise dos dados dos piezômetros instalados na barragem, comparação dos elementos entre a literatura clássica e o estudo de caso e simulação da percolação na barragem pelo *software* Slide2 da Rocscience. A partir dos resultados encontrados, avaliou-se a similaridade da poropressão nos instrumentos da seção longitudinal do maciço, transversal da fundação, da seção principal e a divergência da pressão neutra na seção longitudinal da fundação. Os valores encontrados para os parâmetros r_u e na análise de percolação analisada no modelo matemático foram satisfatórios, sendo que na comparação da análise de percolação foi encontrado um erro máximo de 7,90% para um único piezômetro.

PALAVRAS-CHAVE: Geotecnia. Barragem. Poropressão. Percolação.

ABSTRACT

Dam is the most common method of mining tailings provision. They are quite complex and require monitoring and configuration, up to the construction process, operation and de-characterization. All this attention must occur mainly in dams and/or those that involve some level of emergency of the Sul Inferior Dam located in the State of Minas Gerais. Optimization of the dam, construction capacity and material efficiency. The main factors that cause structuring obstruction, excessive structuring, deformations and overtopping are mentioned. In order to investigate the behavior of the structure, there is a need to monitor the water level of the reservoir, the pore pressure, deformations of the massif of the maximum flows and the control of the maximum flows to the overflows. The great importance of understanding dams in the face of objective society, objective work as society and the procedures for monitoring technical structures, gathering historical data from instrument tools and proposals for the distribution of neutral figures inside the dam, in addition to enabling an analysis of percolation from a case study, reproducing the geomechanical information of the project. The methodology employed with literature review, data analysis of piezometers installed in the dam, comparison of elements between the scientific literature in the case study and the case study and simulation of seepage in the dam by the Slide2 software. From the results, it was evaluated the similarity of pore pressure in the instruments of the longitudinal section of the massive foundation, transversal of the found foundation, of the main section and the divergence of the neutral pressure in the longitudinal section of the foundation. The values found for the parameters of percolation and percolation analysis, being 7,90% of the comparison model of percolation analysis found a maximum piezometer error.

KEYWORDS: Geotechnics. Dam. Pore pressure. Water flow.

Dedico este trabalho a Zezé (*in memoriam*), que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos da minha formação. À senhora, mãe, meu muito obrigada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Nossa Senhora das Graças que sempre estiveram ao meu lado e me concederam forças para conseguir realizar meu sonho.

A minha mãe Zezé que sempre lutou e sonhou meus sonhos ao meu lado. Obrigada pelos ensinamentos, pelo apoio e por me fazer ser a pessoa quem sou. A senhora, meu eterno amor e gratidão e a Deus novamente a gratidão por ter me feito sua filha.

As minhas irmãs Camila, Carolina e Carina pelo incentivo e por sempre estarem ao meu lado e esperaram este momento junto a mim. Ao meu noivo Natan, pelo apoio, ajuda, paciência e amor durante estes longos anos.

Agradeço a todos os professores do CEFET unidade Araxá, por todos os conhecimentos repassados ao longo do curso, que com certeza levarei para minha trajetória pessoal e profissional. De maneira especial, agradeço ao professor Leonardo, por toda paciência e dedicação durante a realização deste trabalho.

Agradeço aos amigos que o CEFET me proporcionou, principalmente ao André, Augusto, Carlos, Ítalo, Lorena e Renata que sempre estiveram comigo nesta jornada. A vocês minha sincera gratidão pelo companheirismo nos dias difíceis e pela amizade.

Por fim, agradeço aos meus colegas da Vale S/A que me ajudaram durante o desenvolvimento deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Configuração típica de barragem	18
Figura 2.2 - Régua do reservatório graduada	19
Figura 2.3 - Exemplo de indicador de nível de água	20
Figura 2.4 - Acúmulo de água no medidor de nível d'água.....	21
Figura 2.5 - Medidor de vazão.....	22
Figura 2.6 - Pluviômetro.....	23
Figura 2.7 - Pluviógrafo	23
Figura 2.8 - Representação do piezômetro Casagrande	25
Figura 2.9 - Representação do piezômetro pneumático	27
Figura 2.10 - Representação do piezômetro de corda vibrante	28
Figura 2.11 - Representação do piezômetro hidráulico	29
Figura 2.12 - Barragem sem sistema de drenagem interna	30
Figura 2.13 - Sistema de drenagem interna horizontal	31
Figura 2.14 - Sistema de drenagem interna vertical	31
Figura 2.15 - Sistema de drenagem interna por enrocamento	31
Figura 2.16 - Extravasador tipo tulipa.....	33
Figura 2.17 – Esquema do extravasador tipo tulipa	33
Figura 2.18 - Extravasador tipo galeria de encosta	34
Figura 2.19 - Canal extravasador	35
Figura 2.20 - Balanço hídrico em barragem de rejeito	37
Figura 2.21 - Tensão vertical total em camadas da subsuperfície	41
Figura 2.22 - Rede de fluxo	42
Figura 2.23 - Configuração de análise de estabilidade.....	44
Figura 2.24 - Variação das razões de r_u ao longo de uma superfície de deslizamento.....	45
Figura 2.25 - Configuração do problema pelo Geostudeo.....	47
Figura 2.26 - Limites piezométricos.....	50
Figura 3.1 - Vista geral da Barragem Sul Inferior	52
Figura 3.2 - Localização da estrutura	52
Figura 3.3 - Sistema Extravasador	53
Figura 3.4 - Barragem à montante da Barragem Sul Inferior	54
Figura 3.5 - Localização dos piezômetros no Google Earth.....	55

Figura 3.6 - Seções da Barragem Sul Inferior	57
Figura 3.7: Seção A-A'	57
Figura 4.1 – Dispersão da base de dados coletada	61
Figura 4.2 - Gráfico histórico piezômetro PZ005.....	63
Figura 4.3 - Gráfico histórico piezômetro PZ007.....	63
Figura 4.4 - Gráfico histórico piezômetro PZ008.....	64
Figura 4.5 - Gráfico histórico piezômetro PZ009.....	64
Figura 4.6 - Gráfico histórico piezômetro PZ022.....	65
Figura 4.7 - Gráfico histórico piezômetro PZ023.....	65
Figura 4.8 - Gráfico histórico piezômetro PZ024.....	66
Figura 4.9 - Gráfico histórico piezômetro PZ036.....	66
Figura 4.10: Comparação da poropressão dos instrumentos da crista.....	68
Figura 4.11 - Comparação do r_u dos instrumentos da crista.....	69
Figura 4.12 - Comparação longitudinal da poropressão dos instrumentos da fundação	70
Figura 4.13 - Comparação longitudinal do r_u dos instrumentos da fundação	71
Figura 4.14 - Comparação transversal da poropressão dos instrumentos da fundação	73
Figura 4.15 - Comparação transversal do r_u dos instrumentos da fundação	74
Figura 4.16 - Comparação da poropressão dos instrumentos da seção A-A'	75
Figura 4.17 - Comparação do r_u dos instrumentos da seção A-A'.....	76
Figura 4.18 - Linha freática da seção A-A'.....	77
Figura 4.19 - Equipotenciais da seção A-A'	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Níveis de controles baseados no fator de segurança	49
Tabela 3.1 - Parâmetros geotécnicos	53
Tabela 3.2 - Dados gerais da estrutura	54
Tabela 3.3 - Informações dos piezômetros	55
Tabela 4.1 - Dados estatísticos dos piezômetros	60
Tabela 4.2: Tarps dos instrumentos da barragem Sul Inferior	62
Tabela 4.3 - Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros PZ022 e PZ024	69
Tabela 4.4 - Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros PZ007 e PZ008	72
Tabela 4.5 - Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros PZ009 e PZ023	74
Tabela 4.6 - Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros da seção A-A'	76
Tabela 4.7 - Comparação da poropressão real e estimada.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS

CMG – Centro de Monitoramento Geotécnico

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

SNISB – Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
1.1	Panorama atual.....	13
1.2	Objetivos.....	14
2	Revisão bibliográfica	16
2.1	Instrumentação e monitoramento de barragens.....	16
2.1.1	Seleção e instalação dos instrumentos.....	17
2.1.2	Monitoramento de campo.....	17
2.2	Medição de nível d'água, vazão e precipitação	19
2.2.1	Medidor de nível d'água.....	19
2.2.2	Medidor de vazão	21
2.2.3	Medidores de precipitação.....	22
2.3	Piezômetros.....	24
2.3.1	Piezômetro de tubo aberto	24
2.3.2	Piezômetro pneumático	26
2.3.3	Piezômetro elétrico de corda vibrante	27
2.3.4	Piezômetro hidráulico.....	29
2.4	Sistema de drenagem e impermeabilização em barragens.....	29
2.4.1	Sistema de drenagem interna em barragens.....	29
2.4.2	Sistema extravasores de barragens	32
2.4.3	Impermeabilização de barragens	35
2.5	Balanco hídrico em barragens de rejeito	36
2.6	Métodos analíticos e numéricos para distribuição de poropressão.....	38
2.6.1	Poropressão.....	38
2.6.2	Determinação analítica simplificada da poropressão em condições geostáticas.....	40
2.6.3	Determinação analítica simplificada da poropressão em condições de fluxo	41
2.6.4	Determinação analítica da poropressão pelo parâmetro r_u	44
2.6.5	Determinação analítica da poropressão pelo parâmetro B-bar	46
2.6.6	Comentários gerais sobre a inserção da poropressão em softwares.....	48
2.7	Níveis de referência do monitoramento	48
3	Metodologia	51
3.1	Descrição do estudo de caso	51
3.2	Piezômetros de monitoramento	54

3.3	Níveis de controle	56
3.4	Seções da Barragem Sul Inferior.....	56
3.5	Pluviometria	58
3.6	Dados dos gráfico dos instrumentos.....	58
4	<i>Resultados e discussões</i>	60
4.1	Tarps de controle	60
4.2	Dados históricos dos piezômetros.....	62
4.3	Varição longitudinal da poropressão no maciço	67
4.4	Varição longitudinal da poropressão na fundação	70
4.5	Varição transversal da poropressão na fundação.....	72
4.6	Análise de poropressão na seção A-A'	74
4.7	Análise de percolação na seção A-A'.....	77
5	<i>Conclusões</i>	80
6	<i>Sugestões para trabalhos futuros</i>	82
7	<i>Referências</i>	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 PANORAMA ATUAL

O Brasil se destaca como um grande produtor e exportador de recursos minerais devido a intensa exploração de suas riquezas. Logo, o setor mineral dispõe de um papel significativo na economia do país, na produção de bens e serviços, desenvolvendo e contribuindo na qualidade de vida da população. No entanto, a atividade minerária é responsável por grandes impactos ambientais em seus processos de lavra, disposição de estéril em pilhas e dos rejeitos em barragens (CARVALHO e CORTELETTI, 2021).

Os rejeitos são materiais provenientes do processo de beneficiamento mineral e devem ser depositados em locais apropriados, como em barragens, considerados uma das estruturas com grande risco de falha operacional para as empresas. O estabelecimento de barragens em uma região, implica em uma série de impactos ambientais e limitações socioeconômicas, o que tem realizado o questionamento da construção destas estruturas geotécnicas (SOUZA, 2018).

Dois grandes desastres ambientais envolvendo barragens de rejeitos foram presenciados no Brasil nos últimos anos. Em 2015 no município de Mariana/MG a barragem de rejeitos da empresa Samarco Mineração S/A registrou a morte de 19 pessoas com o colapso da barragem de Fundão que extravasou aproximadamente 40 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro. Já em 2019 no município de Brumadinho/MG, houve o rompimento de aproximadamente 14 milhões de toneladas de rejeitos da barragem de B1 da empresa Vale S/A, provocando a morte de 262 pessoas e 8 vítimas ainda desaparecidas (ESTADO DE MINAS, 2021; G1, 2019).

Em razão das tragédias provocadas pelo rompimento das barragens de rejeitos, a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) em 2019 estabeleceu a Lei de número 23.291 que estabelece a Política Estadual de Segurança de Barragens que compete a fiscalização destas estruturas, aumentando as exigências para a emissão do licenciamento ambiental, além intimar ao empreendedor a apresentação de documentos técnicos para contribuir no processo de fiscalização do Estado (FEAM, 2021).

Apesar da intensa fiscalização aplicada pelo Estado, sabe-se que o rompimento das estruturas é algo real e danoso para a população e para o meio ambiente que nela está envolvida, por isso, torna-se necessário o entendimento dos métodos de possíveis rupturas. Os mecanismos de rompimento de barragens podem ocorrer por ação isolada ou conjunta de diferentes fatores,

tais como: erosão interna (*piping*), galgamento, instabilidade de taludes, falhas na fundação e na estrutura e liquefação. Todos estes métodos de ruptura são capazes de ocasionar instabilidades em barragens, provocando o seu colapso e estão diretamente associados com a qualidade do material que o compõe (BARBOSA e AMARAL, 2022).

O método de rompimento por liquefação possui relação direta com a poropressão presente nas estruturas. Este fenômeno pode ser entendido como a perda da resistência de cisalhamento do material quando ele possui características finas, fofas e encontra-se saturado. A redução das tensões efetivas por meio do aumento significativo da poropressão, faz com que o barramento possua comportamento de líquido, resultando em uma condição de fluxo do solo por falta de suporte (DRUMOND, 2018; GALO, 2017).

Vários estudos estão sendo desenvolvidos sobre a liquefação em barragens, no que compete ao acionamento deste tipo de ruptura por causas sísmicas ou por vibrações e na aferição dos parâmetros de resistência não drenada por meio de ensaios de campo e de laboratório. No entanto, ainda não há metodologias bem definidas nos campos de estudos probabilísticos e das incertezas relacionadas a caracterização dos materiais, bem como na ineficiência da detecção da liquefação em áreas onde a instrumentação é ineficiente (SOUZA, 2018). O monitoramento e análise da instrumentação de barragens podem auxiliar na compreensão do comportamento real das estruturas, refinando e adequando modelos propostos e possibilitando suas correlações com diferentes parâmetros tais como: nível de água do reservatório, pressão neutra, deformações verticais e longitudinais, além de indicar problemas operacionais dos sensores e do sistema de instrumentação, desde defasagens de leitura, ruídos de dados, sensibilidade, avarias e colmatação.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principal objetivo analisar a distribuição das pressões neutras da barragem de contenção de sedimentos e água denominada de Sul Inferior, a partir dos dados obtidos das leituras dos piezômetros presentes na estrutura.

Complementando o objetivo geral do trabalho, estudos e análises foram realizadas com o intuito de apoiar o tema central da pesquisa.

- Reunir informações da literatura acerca de instrumentos utilizados no monitoramento de barragens;
- Avaliar dados históricos de poropressão e sua distribuição ao longo da barragem;

- Comparar as pressões internas do Estudo de Caso com os modelos de poropressão presentes na literatura;
- Realizar a análise de percolação dos instrumentos na seção principal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE BARRAGENS

Uma das metodologias empregadas para o monitoramento de barramentos é a utilização de instrumentos em barragens para a avaliação da performance geotécnica destas estruturas. Diante da resposta da instrumentação, é possível avaliar o comportamento e o desempenho da barragem à possíveis mudanças que podem interferir na estabilidade da estrutura. O principal objetivo da instalação de instrumentos em barragens é garantir o monitoramento regular das estruturas, buscando uma maior segurança e confiabilidade, além de exercer o cumprimento legal da legislação (MARTINS, 2019; VIEIRA *et al.*, 2017).

Em seu trabalho, Cruz (2004) elenca três funções da instrumentação em barragens: (1) analisar as hipóteses, os critérios e os parâmetros empregados no projeto; (2) examinar os métodos construtivos; e (3) investigar as condições de segurança do barramento. A segurança de uma barragem está associada ao projeto e as medidas de construção. Logo, a instalação de instrumentos não garante a segurança da estrutura, mas seu uso é fundamental para a obtenção de dados e tomadas de decisões referentes ao projeto.

Segundo Silveira (2006), os parâmetros a serem controlados pela instrumentação em barragens são: a pressão de água nos poros, a pressão da água na rocha de fundação, as pressões totais, os recalques, os deslocamentos horizontais, as cargas e as tensões dos elementos estruturais, a temperatura, as vazões de drenagem, os materiais sólidos carregados e entre outros.

Embora a utilização de instrumentos seja indispensável para acompanhar as condições de segurança da estrutura, a mensuração e leitura dos instrumentos pode ser comprometida por alguns fatores, sendo eles: (1) alteração nas medições de tensão, em casos de instalações equivocadas do instrumento; (2) indicação do comportamento médio do maciço e não dos extremos; (3) ausência de verificação de funcionamento após a instalação; (4) comportamentos inesperados de um instrumento, considerando-o defeituoso; (5) alguns tipos de instrumentos podem apresentar danos irreparáveis; (6) há fenômenos que os instrumentos não conseguem identificar, o que reduz a probabilidade de detectar, através de instrumentação, ocorrência de condições normais de segurança, (7) existência de erros sistemáticos, erros aleatórios e incertezas de medição inerentes ao processo. Por isso, é de extrema importância não só a escolha dos instrumentos, mas também a instalação adequada, manuseio, análise e tratamento dos dados (CRUZ, 2004).

2.1.1 Seleção e instalação dos instrumentos

A etapa de selecionar os instrumentos influencia diretamente na qualidade dos resultados e desempenho do monitoramento. Santos (2019), afirma que é necessário realizar previsões dos campos de variação das medidas, de forma a escolher o melhor local da instalação dos instrumentos e o uso da instrumentação, deve atender as necessidades desde o período de construção até o processo de descaracterização da barragem.

Em relação a localização de cada instrumento na estrutura, Silveira (2006) apresenta três princípios básicos a serem seguidos. Em primeiro lugar, deve-se identificar as áreas de risco, conhecidas como áreas de carregamento mais intenso, onde é estruturalmente mais frágil e encontram-se as maiores pressões d'água. O segundo princípio é a seleção das seções transversais, denominadas de seção principal capaz de representar toda a estrutura. E por fim, devem ser estabelecidos seções secundárias com o intuito de comparar o comportamento dos instrumentos instalados na seção principal.

De acordo com Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), conforme citado por Santos (2019), quando se trata de instalação de instrumentos em barragens, recomenda-se que a maior seção da barragem seja instrumentada, devido às maiores tensões e pressões hidrostáticas contidas na estrutura, como também, devem ser instrumentadas seções que dispõem de anomalias geológicas na fundação.

A instalação dos instrumentos deve ser realizada de forma a mitigar erros sistemáticos de medição, garantindo uma adequada calibração dos equipamentos e representatividade dos dados captados. Os instrumentos também devem conter dados apurados, tais como: (1) coordenadas de topo e de fundo; (2) profundidade e (3) localização do sensor, pois estes valores interferem diretamente nas leituras realizadas.

2.1.2 Monitoramento de campo

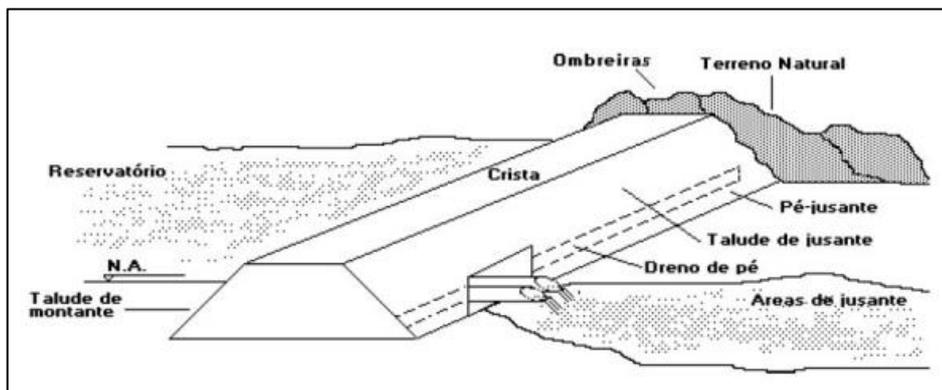
Para assegurar o controle da segurança das estruturas geotécnicas, é necessário a inspeção e monitoramento por meio da instrumentação e análise visual. Dessa forma, o monitoramento é capaz de auxiliar a prever possíveis incidentes e/ou acidentes, minimizando impactos humanos, ambientais, técnicos e econômicos associados a ruptura de barragens (ANA; 2016).

O acompanhamento de estruturas geotécnicas pode ocorrer por monitoramento e inspeção visual. O monitoramento ocorre pela análise da instrumentação de forma manual ou automatizada, como podem ocorrer em instrumentos de medição de poropressão e aferição de nível d'água. Segundo Drumond (2018), além das inspeções visuais realizadas por engenheiros e técnicos de campo, a instrumentação instalada em barragens é indispensável para aferir medidas de deslocamento, pressão, vazão de percolação, drenagem, precipitação, nível do reservatório, entre outros parâmetros. Com o monitoramento de instrumentos e a inspeção visual, é possível monitorar, prever e evitar que os mecanismos de ruptura ocorram na estrutura, como aconteceu em acidentes recentes em barragens de rejeitos.

Outro ponto indispensável para o monitoramento de estruturas geotécnicas é a implantação do Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG), conforme proposto pela Resolução de número 95 de acordo com a Agência Nacional de Mineração. Este ambiente é projetado para o monitoramento de barragens, acionamento de dispositivos de alarme e alerta, tratamento de dados provenientes da instrumentação e controle de câmeras, com operação constante 24 horas por dia.

Por outro lado, a inspeção trata-se do acompanhamento visual por meio de fotos ou vídeos de anomalias geotécnicas, tais como: trincas, erosões, umidades e/ou aspectos de efluente percolado. É importante ressaltar que na inspeção visual de barragens devem ser inspecionadas as seguintes partes da estrutura (Figura 2.1): (1) talude montante, (2) talude jusante, (3) crista, (4) reservatório, (5) ombreiras esquerda e direita, (6) pé do talude jusante, (7) sistema extravassor, (8) drenagem superficial e (9) instrumentação. Qualquer alteração do estado normal da estrutura deve ser comunicada aos responsáveis para evitar possíveis mecanismos de ruptura.

Figura 2.1 - Configuração típica de barragem



Fonte: Melo *et al.* (2018)

2.2 MEDIÇÃO DE NÍVEL D'ÁGUA, VAZÃO E PRECIPITAÇÃO

2.2.1 Medidor de nível d'água

Existem dois métodos para a medição de níveis d'água em barragens que auxiliam na avaliação da estabilidade da estrutura. O primeiro método é pela instalação de uma régua graduada no reservatório. Neste tipo de instrumento as cotas de elevação do instrumento e do reservatório devem estar definidas e cadastradas de forma correta. A medição do instrumento pode ser realizada de forma manual ou automatizada em campo, no qual mediante o valor da régua no reservatório e a cota de topo ou de base do instrumento, é capaz de determinar a cota do nível d'água (SILVA, 2019). A Figura 2.2 apresenta um exemplo de uma régua graduada instalada em reservatórios.

Figura 2.2 - Régua do reservatório graduada

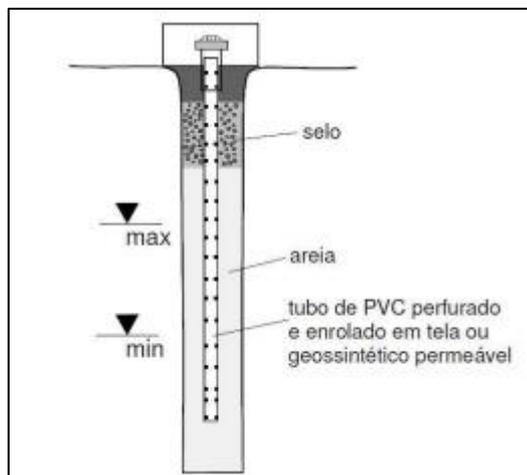


Fonte: Própria autora (2022)

Um outro método para medição de nível é indicador de nível d'água. Este instrumento pode ser instalado na estrutura ou no entorno para o conhecimento do nível do lençol freático. Em relação ao método de construção do equipamento, Fusaro (2007) afirma que ele é constituído por um tubo de PVC perfurado, instalado em um furo de sondagem. O tubo possui perfurações na parte inferior para a passagem de água e é envolvido por uma manta geotêxtil. O espaço entre a parede do furo e o tubo de PVC é preenchido com uma areia filtrante que tem

como finalidade impedir o carreamento do solo. A Figura 2.3 apresenta um perfil de um indicador de nível d'água.

Figura 2.3 - Exemplo de indicador de nível de água



Fonte: Georio (2000)

Embora o medidor de nível d'água seja considerado um dos instrumentos simples empregados em barragens, há problemas que podem ocasionar a perda de sensibilidade do instrumento ou torná-lo inoperante. Dentre os principais danos causados no medidor de nível são: (1) obstrução no interior do tubo por meio da queda de objetos; (2) cisalhamento do tubo inserido no maciço; (3) colmatação dos orifícios do tubo de PVC ou do material drenante; (4) ruptura do tubo de plástico e (5) elevado tempo ou nenhuma resposta na leitura do instrumento devido à colmatação (SOUZA, 2018).

Adicionalmente, Fusaro (2007) apresenta em seu trabalho os erros mais frequentes na instalação e na leitura dos medidores de nível, como a ausência ou má execução do selo superior, ocorrendo alterações nas leituras pela entrada de água pluvial ou de irrigação dos taludes gramados (Figura 2.4) e deformação ou corte do cabo de leitura, além de problemas com a medição manual como o cabo do medidor com leitura deficiente e também problemas com as leituras automatizadas com o cadastramento incorreto das cotas de base e de topo do tubo.

Figura 2.4 - Acúmulo de água no medidor de nível d'água



Fonte: Própria autora (2022)

A fim de evitar os erros recorrentes na leitura e na instalação do medidor de nível, devem ser executadas ações como a proteção do topo da tubulação contra a entrada de água e contra lançamentos de objetos e a calibração periódica do cabo de leitura mediante a aferição do equipamento, utilizando trena de referência calibrada.

2.2.2 Medidor de vazão

A medição de vazão em diques e barragens, é indispensável para garantir a segurança da estrutura e deve ser uma das primeiras investigações para garantir a estabilidade, uma vez que existe correlação entre a análise de desempenho da barragem com as vazões de drenagem e as vazões com os níveis à montante do reservatório, pois a quantidade e a qualidade de água que percola no barramento podem ser indícios de problemas, como drenos obstruídos, erosão interna ou pressões excessivas no barramento (ZUCULIN *et al.*, 2020; CASTRO, 2008)

Os medidores de vazão são instrumentos destinados a aferição do fluxo de água do reservatório, onde são posicionados na saída de drenagem externa como canais extravasores ou em calhas de curso d'água. Quando os medidores são construídos na saída do dreno de fundo de uma estrutura, é necessário a montagem de uma bacia de estabilização do fluxo, de um vertedor de seção trapezoidal ou triangular e de uma régua ou sensor para determinação da vazão. Já os medidores de vazão instalados em curso d'água, necessitam apenas de um canal

ou calha extravasora (Figura 2.5) para dissipar a energia do fluxo e uma régua ou sensor para a aferição da vazão (CERQUEIRA, 2017).

Figura 2.5 - Medidor de vazão



Fonte: Própria autora (2022)

Para Zuculin *et al.* (2020), o medidor de vazão de seção triangular é mais usual e possibilita uma maior exatidão para vazões reduzidas, de até 30 litros por segundo. Este tipo de instrumento consiste em uma chapa metálica no formato em “V”, no qual a vazão é obtida de forma direta de acordo com a regra de Thompson conforme apresentado na Equação 2.1.

$$Q = 1,4 \times H^{\frac{5}{2}} \quad \text{Equação 2.1}$$

onde, Q é a vazão em m³/s, e H é altura da lâmina d’água em relação ao vértice do “V” em metros.

2.2.3 Medidores de precipitação

O pluviômetro e o pluviógrafo são exemplos de instrumentos meteorológicos importantes para a captação de dados de precipitação (SOUZA, 2018). O pluviômetro convencional (Figura 2.6), consiste em um aparelho com um depósito para a captação da água cujo área é conhecida e as medições são aferidas em milímetros. Já o pluviógrafo (Figura 2.7)

é um instrumento com as mesmas características que o pluviômetro, no entanto, possui a capacidade de registrar a coleta de água ao longo do tempo.

Figura 2.6 - Pluviômetro



Figura 2.7 - Pluviógrafo



Fonte: Própria autora (2022)

As medições pluviométricas são importantes para o acompanhar o comportamento da estrutura mediante a precipitação. Diante dos dados pluviométricos, é possível analisar o comportamento dos instrumentos no período chuvoso e observar se há alguma modificação na estrutura. Os dados pluviométricos podem ser utilizados para comparar e correlacionar os valores de poropressão e analisar visualmente a estrutura mediante os medidores de vazão localizados à jusante do barramento. Desta forma, as leituras de precipitação podem ser utilizadas na avaliação da estrutura, tornando as análises mais consistentes e embasadas (CASTRO, 2008).

2.3 PIEZÔMETROS

O piezômetro é um dos dispositivos mais empregados no monitoramento de barragens. Este equipamento é posicionado selado dentro do solo e é capaz de monitorar a pressão da água *in loco*. O piezômetro pode ser dividido em categorias distintas de acordo com sua finalidade. Há instrumentos que monitoram o padrão de fluxo da água subterrânea, diante de testes de bombeamento, observando a permeabilidade *in situ*, monitorando as infiltrações nas barragens de aterro e nos taludes, além das pressões de soerguimento no pé do barramento. Além disso, os piezômetros também monitoram as pressões neutras atuantes nas estruturas ao longo de um plano de falha e a pressão da água presente nas fundações.

Entre os principais modelos de piezômetros encontrados no mercado são: (1) piezômetro de tubo aberto; (2) pneumático; (3) elétrico de corda vibrante e (4) hidráulico. Segundo Santos (2019), não é possível determinar qual o melhor piezômetro para a estrutura, sem antes conhecer as necessidades de cada projeto. A escolha do tipo de piezômetro pode ser influenciada por diferentes fatores, como os tipos de medidas (estáticas ou dinâmicas), a localização do instrumento, as medições das pressões neutras negativas, disponibilidade do instrumento no mercado, entre outros.

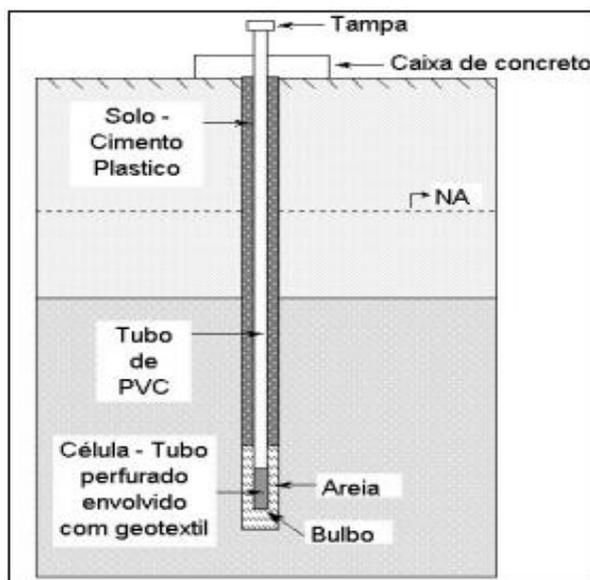
2.3.1 Piezômetro de tubo aberto

Os piezômetros de tubo aberto também podem ser conhecidos como piezômetro Casagrande ou piezômetro *Standpipe*. Consistem em um tubo PVC, metálico ou geomecânico, que afere a carga piezométrica afetada por ações barométricas. Nas etapas de construção deste

instrumento, é importante o estudo do local da instalação, para avaliar o tempo de resposta do instrumento em relação as condições do fluxo (CERQUEIRA, 2017).

O método de construção deste piezômetro é similar ao do medidor de nível d'água, diferenciando apenas pela presença de um elemento poroso denominado bulbo, instalado na parte inferior do piezômetro. Em relação a medição, a água é permeável por entre o bulbo formando uma coluna d'água correspondente à pressão hidrostática no ponto de instalação, podendo ser aferida pelo mesmo equipamento do medidor de nível d'água. A porção inferior do instrumento é ocupada por uma areia filtrante e na porção restante é preenchida com bentonita ou outro material selante (SOUZA, 2018). A Figura 2.8 apresenta um modelo esquemático com suas devidas dimensões de um piezômetro Casagrande.

Figura 2.8 - Representação do piezômetro Casagrande



Fonte: Fonseca (2003)

Segundo Silveira (2006), o piezômetro de tubo aberto apresenta várias vantagens, como por exemplo: alta confiabilidade; maior durabilidade; grande sensibilidade; possibilidade de verificação do seu desempenho por meio de ensaios de recuperação do nível d'água; estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo onde se encontra instalado o instrumento; facilidade na instalação e vantagens financeiras. No entanto, podem ser observadas as seguintes limitações deste piezômetro, tais como: interferência na área do empreendimento sujeito a ser danificado; não é adequado para determinar a poropressão no período construtivo; tempo de resposta alto para solos de baixa permeabilidade; a precisão da leitura depende da habilidade e experiência do operador (MACHADO, 2007).

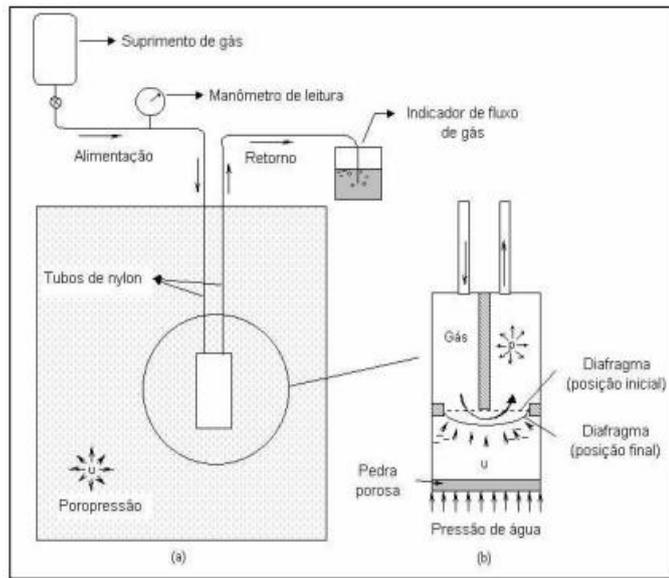
É importante ressaltar que entre os erros mais comuns na instalação e na leitura do piezômetro Casagrande, estão: graduação deficiente, deformação ou corte no cabo de leitura; instalação dos instrumentos fora das áreas de injeção de rejeitos na barragem; falha na execução do material selante ao longo do tubo; cadastro incorreto da cota de boca e de fundo do instrumento (FUSARO, 2007).

Para evitar os principais erros na instalação e na leitura do piezômetro de tubo aberto, Fusaro (2007), apresenta as principais manutenções necessárias no instrumento sendo elas: proteger a tubulação contra a entrada de água e de queda de materiais dentro do tubo; calibrar periodicamente o cabo de leitura, com a verificação do seu comprimento por meio de uma trena; e limpar a célula para remover sedimentos presentes no interior do tubo, por meio de injeção de água sob pressão controlada.

2.3.2 Piezômetro pneumático

O piezômetro pneumático realiza medições por meio de um processo pneumático com a injeção do gás nitrogênio, que tem como objetivo igualar as pressões internas das células pneumáticas e forçar a deflexão do diafragma. A célula piezométrica é ligada a um manômetro por meio de dois tubos, um de alimentação e o outro de retorno. Na aferição da leitura do piezômetro, o indicador pneumático é conectado junto com a tubulação. Quando a pressão do gás apresenta valores superiores aos da água, o diafragma é forçado para fora do tubo de ventilação e ele é retirado por escape. Dessa forma, a pressão do gás diminui-se gradativamente até que a pressão da água faça com que a membrana assuma a posição inicial. Com isso, a pressão do gás se iguala a da água sendo possibilitada a aferição de forma indireta do valor da poropressão (DGSI, 2017). A Figura 2.9 apresenta um modelo esquemático de um piezômetro pneumático com o seu princípio de operação.

Figura 2.9 - Representação do piezômetro pneumático



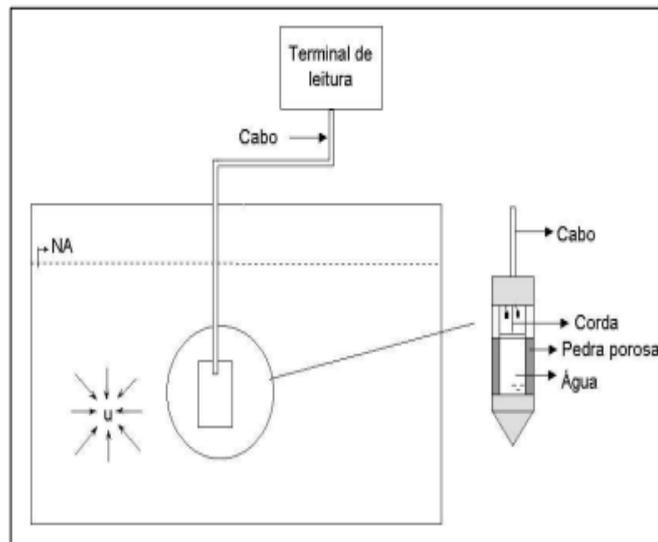
Fonte: Fonseca (2003)

Fusaro (2007) cita que os erros mais frequentes na instalação e na leitura dos piezômetros pneumáticos estão relacionadas as fórmulas de calibração incorretas, a inadequação rigorosa do tempo de estabilização para realizar as leituras e por fim, o cadastramento incorreto da cota de instalação da célula. O autor menciona também que dentre as manutenções necessárias no equipamento, encontram-se a calibração do manômetro, checagem das conexões do instrumento e a verificação do cadastro da cota de instalação da célula.

2.3.3 Piezômetro elétrico de corda vibrante

O piezômetro elétrico de corda vibrante consiste em um fio tensionado ligado a um diafragma e uma pedra porosa. Quando estes componentes são submetidos a pressão da água, ocorre deflexões nos instrumentos e mudanças na tensão do fio. A medição é realizada por uma bobina elétrica e este valor é transmitido por um transdutor que apresenta o valor da leitura em Hertz (SESTREM, 2012). A Figura 2.10 apresenta um esquema do piezômetro elétrico de corda vibrante.

Figura 2.10 - Representação do piezômetro de corda vibrante



Fonte: Fonseca (2003)

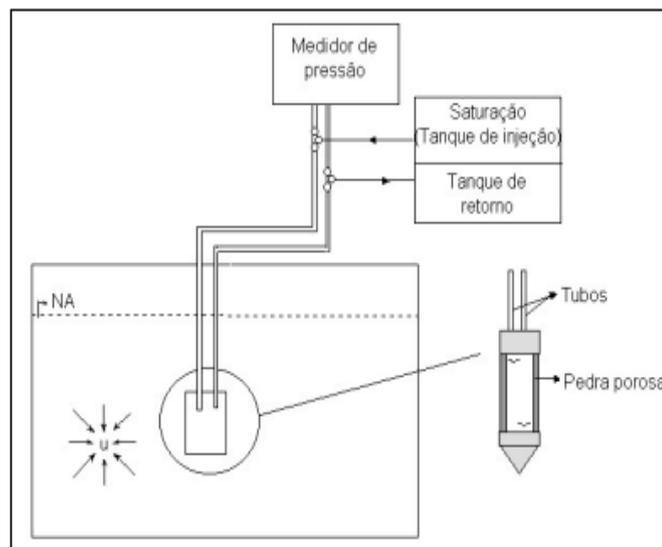
Para Silveira (2006), o piezômetro elétrico de corda vibrante é altamente utilizado devido sua alta precisão e sensibilidade de medição da poropressão em solos de baixa permeabilidade. O autor ressalta também, a possibilidade de automação do instrumento de corda vibrante, o que permite a utilização de sistemas automatizados no monitoramento, reduzindo os erros de leitura e de coleta de dados. No entanto, para que a automatização ocorra, é necessário a calibração do instrumento para evitar possíveis erros sistemáticos.

Apesar de apresentar diversas vantagens, este instrumento possui algumas limitações que podem acarretar problemas nas medições. De acordo com Fusaro (2007), os erros mais frequentes na instalação e na leitura dos piezômetros elétricos de corda vibrante são: aterramento das células e da caixa terminal ineficiente; calibração incorreta do instrumento; e cadastro incorreto da cota de instalação da célula. Para o autor, as principais manutenções que devem ser realizadas neste instrumento consistem na: calibração periódica da unidade de leitura; proteção do terminal contra agentes externos; verificar a proteção contra raios; e manter a identificação *in loco* do instrumento.

2.3.4 Piezômetro hidráulico

O piezômetro hidráulico (Figura 2.11) é conhecido como piezômetro hidráulico de tubo fechado ou piezômetro inglês. O sistema de medição deste instrumento consiste em uma pedra porosa conectada a um painel de leitura, por meio de dois tubos flexíveis de nylon envolvidos de polietileno de pequeno diâmetro que são saturados com água. A água compreendida entre os poros do solo ou nas fraturas da estrutura fica em contato com a pedra porosa. Logo, qualquer alteração do nível de água na estrutura e da pressão neutra no instrumento é registrada no medidor de pressão (SANTOS, 2019; FONSECA, 2003).

Figura 2.11 - Representação do piezômetro hidráulico



Fonte: Fonseca (2003)

2.4 SISTEMA DE DRENAGEM E IMPERMEABILIZAÇÃO EM BARRAGENS

2.4.1 Sistema de drenagem interna em barragens

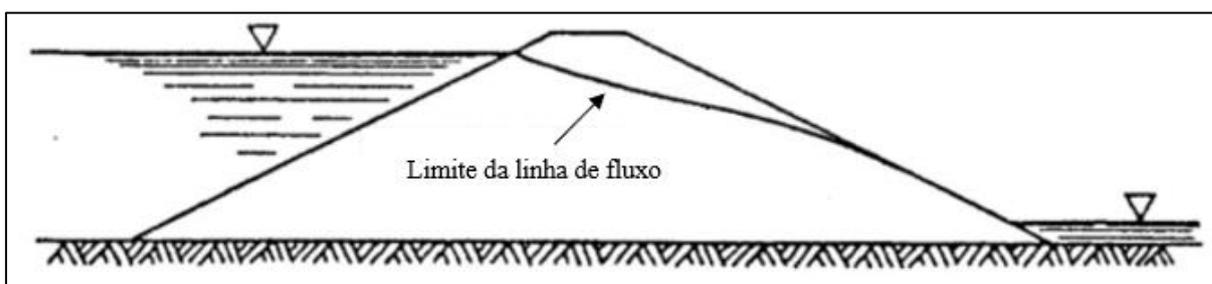
Para Petrocelli (2019), os sistemas de drenagem interna de uma barragem são indispensáveis para a estabilidade da obra, por diminuir as pressões no interior da estrutura, proteger o barramento em relação aos riscos de fluxo provenientes da erosão interna e evitar ou minimizar a saturação de água do talude jusante, o que poderá provocar a diminuição da resistência ao cisalhamento da estrutura.

O sistema de vedação e drenagem das estruturas é o principal mecanismo de defesa contra os processos de erosão interna, fluxos concentrados e preferenciais. Logo, a vedação da barragem e da sua fundação torna-se indispensável na elaboração de projetos, pois estes sistemas de drenagem controlam a saída do fluxo da barragem e da fundação, além de cessar os efeitos das poropressões na região jusante do eixo da estrutura. Assim, pode-se concluir que em fundações permeáveis ou com saídas preferenciais de fluxo, o sistema de drenagem permite o controle das pressões na saída de água (CRUZ, 2004).

Em seu trabalho, Silva (2016) apresentou os principais instrumentos que compõe o sistema de drenagem interna de barragens, sendo eles: dreno vertical ou inclinado; dreno horizontal; dreno de saída ou de pé; trincheira drenante na fundação das ombreiras; e furos de drenagem e poços de alívio na fundação. O material adequado do filtro deve ser permeável para permitir o fluxo de escoamento de água e fino para evitar o deslocamento dos grãos das partículas de solo.

Sem o sistema de drenagem, a linha de fluxo irá interceptar a face do talude jusante (Figura 2.12), provocando o galgamento da estrutura. Desta forma, o talude poderá erodir gradativamente, pois a água tenderá a carrear as partículas do solo. Quando há evolução no processo de erosão na crista do talude jusante, as partículas carregadas darão lugar aos vazios, formando um caminho regressivo de erosão, acarretando o rompimento da estrutura (SILVA, 2016).

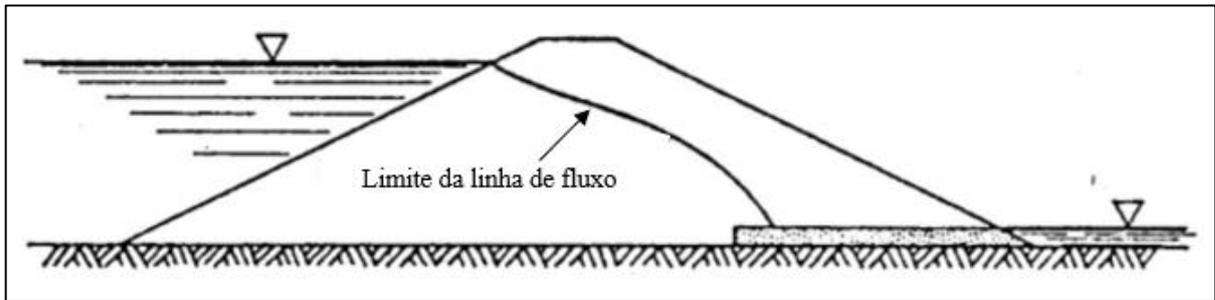
Figura 2.12 - Barragem sem sistema de drenagem interna



Fonte: Lambe e Whitman, (1969) *apud* Petrocelli, (2019)

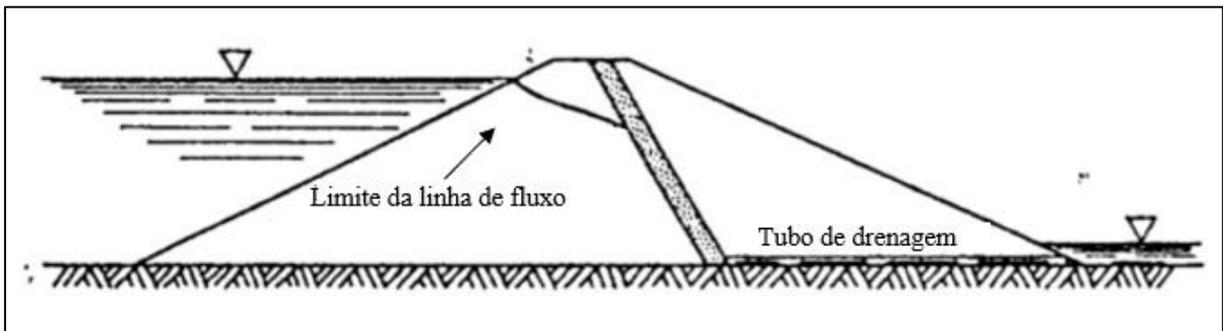
Segundo Silva (2016), para evitar que o maciço fique saturado e que o fluido carregue as partículas do talude jusante, é necessário inserir drenos que proporcionem o rebaixamento do nível d'água dentro do aterro da barragem. As Figuras Figura 2.13, Figura 2.14 e Figura 2.15 apresentam esquemas de possíveis sistemas de drenagem interna encontradas em barragens.

Figura 2.13 - Sistema de drenagem interna horizontal



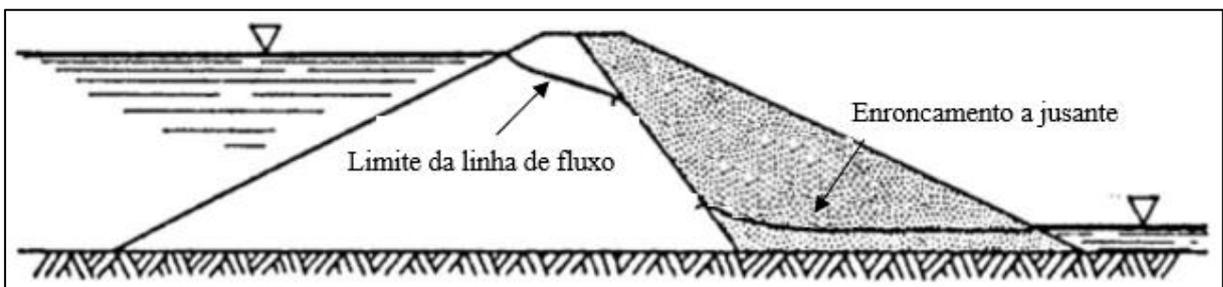
Fonte: Lambe e Whitman, (1969) *apud* Petrocelli, (2019)

Figura 2.14 - Sistema de drenagem interna vertical



Fonte: Lambe e Whitman, (1969) *apud* Petrocelli, (2019)

Figura 2.15 - Sistema de drenagem interna por enrocamento



Fonte: Lambe e Whitman, (1969) *apud* Petrocelli, (2019)

Os dispositivos de drenagem interna podem ser compostos de areia e brita, porém, há estudos que testam materiais geossintéticos para substituir estes materiais. Segundo Barbosa

(2016) os geossintéticos podem exercer diversas funções em processos de drenagem, erosivos, filtração, barreira e reforço de estruturas geotécnicas.

De acordo com Cruz (2004), quando o fluxo de fluido da fundação for superior ao fluxo do maciço compactado, o projeto de vedação deve conter os seguintes sistemas de drenagem:

- Injeção de calda ou argamassa de cimento para a proteção de fundações em rochas;
- *Cut off* para proteção de fundações com granulometria heterogênea, colúvios com permeabilidade mais elevada que o elemento vedante e descontinuidades permeáveis em solos residuais;
- Tapetes drenantes;
- Diafragmas rígidos, plásticos, colunas injetadas, colunas secantes de concreto, para controle do fluxo em materiais arenosos e em cascalhos.

Cruz (2004) cita ainda sobre a quantidade de água percolada no conjunto maciço e fundação que pode ser admitida em projetos de monitoramento, para que projetistas se orientem quanto aos valores de referência das estruturas. Para controles de cheias ou hidroelétricas, são recomendados valores inferiores a 5 l/min por metro de barragem. Já as barragens utilizadas para abastecimento de água e irrigação, elas devem ser inferiores a 0,1% da média das vazões naturais.

2.4.2 Sistema extravasores de barragens

Os sistemas extravasores são locais destinados à descarga da água quando o reservatório está em níveis acima do limite ou casos de emergência. O projeto do sistema extravasor, leva em consideração variáveis como: (1) tamanho da barragem; (2) capacidade do reservatório da estrutura e a (3) hidrogeologia local e regional. Sugere-se que os extravasores sejam construídos fora de áreas com água natural e encostas, a fim de diminuir o valor do projeto. Na etapa de construção do projeto, sugere-se a análise de três sistemas: tulipa, galeria de encosta e vertedor de superfície, sendo o último o mais utilizado em barragens (OVANDO, 2019; SOARES, 2010;).

De acordo com Turella (2010), o principal componente do sistema extravasor é o vertedor, pois ele visa escoar as águas que excedem o reservatório com segurança para a jusante da barragem. O dimensionamento preciso e o funcionamento adequado do vertedor, evita que a água passe sobre a crista da estrutura, provocando carreamento e conseqüentemente erosão do material.

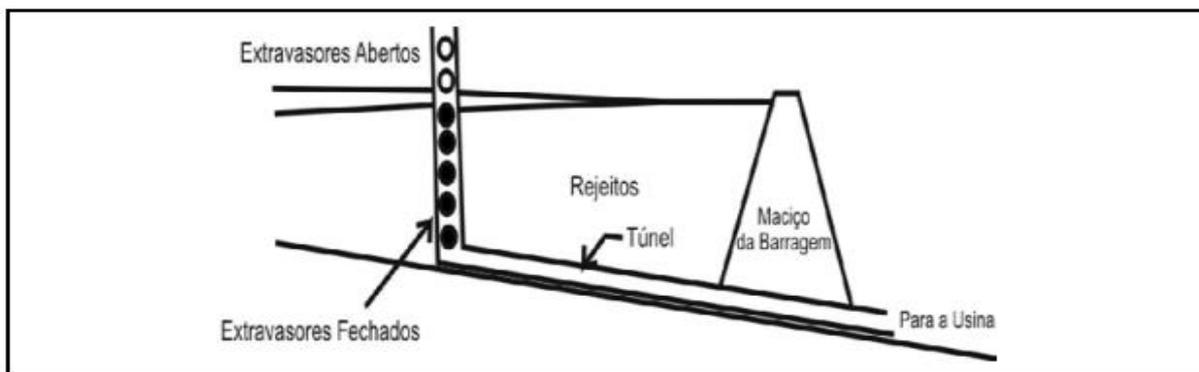
O vertedor do tipo tulipa corresponde a uma torre de concreto armado ou tubulação de metal construída dentro do reservatório (Figura 2.16). Este vertedor possui aberturas que permitem o controle da altura do nível d'água, proveniente da sedimentação de materiais argilosos. A torre direciona as águas à uma galeria de fundo que atravessa o maciço da barragem, guiando a água até a jusante. A tulipa é um dos sistemas mais utilizados em função da sua fácil construção, possibilidade de alteamentos, manutenção, limpeza e ausência de equipamentos mecânicos de operação (SOARES, 2010). A Figura 2.17 apresenta um desenho esquemático do extravasor tipo tulipa.

Figura 2.16 - Extravasor tipo tulipa



Fonte: Própria autora (2022)

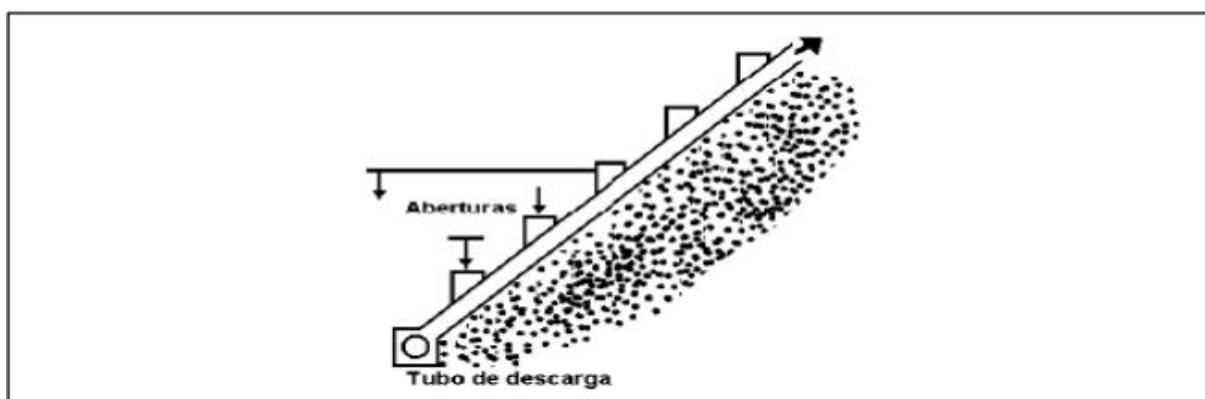
Figura 2.17 – Esquema do extravasor tipo tulipa



Fonte: Vick, (1983) *apud* Soares, (2010)

Outro tipo de sistema extravasador é o de galeria de encosta. Este tipo de extravasador é composto por uma galeria de concreto ou tubos metálicos inclinados sobre a encosta, situado na ombreira da barragem. Esta galeria está interligada a outra, localizada no fundo, que dirige as águas a jusante acima do maciço da barragem ou um túnel escavado na ombreira. A galeria inclinada pode estender-se, gradativamente, com a subida do nível d'água ou de rejeitos e possui aberturas ao longo de toda sua extensão, que podem ser fechadas para reter os rejeitos ou o maior volume d'água (SOARES, 2010). A Figura 2.18 ilustra um esquema de extravasador de galeria de encosta interligado a galeria de fundo.

Figura 2.18 - Extravasador tipo galeria de encosta



Fonte: Vick, (1983) *apud* Soares (2010)

Já o sistema extravasador de superfície pode ser construído de concreto (Figura 2.19) ou blocos de mão, como soleiras e canais, no qual o bom funcionamento é fundamental para garantir a estabilidade das estruturas. Deste modo, em toda a fase de existência do barramento é importante que o vertedor de superfície esteja completamente desobstruído, para que a funcionalidade deste sistema seja satisfatória. É recomendável, para estruturas de contenção de água ou rejeitos, que o vertedor de superfície seja livre e de canal aberto, dispensando o uso de comportas (OVANDO, 2019).

Figura 2.19 - Canal extravasor



Fonte: Própria autora (2022)

2.4.3 Impermeabilização de barragens

O tratamento de impermeabilização de barragens e fundações visa garantir o bom comportamento estrutural e hidráulico a fim de assegurar as características mecânicas do maciço e o controle da percolação de água na barragem. Esta impermeabilização auxilia na diminuição da percolação de água da barragem e da fundação, e a utilização de geossintéticos como barreiras estão tem ganhado espaço em obras da engenharia geotécnica.

Em seu trabalho, Sanfona (2018) apresenta os diferentes tipos de geossintéticos, sendo eles: geomembranas, geotêxtis, georredes, geogrelhas, geotubos e geocompósitos. Estes materiais podem desempenhar funções diferentes, como por exemplo: barreira, drenagem, filtragem, reforço, separação ou controle de erosão, variando de acordo com o local da sua instalação. O principal geossintético utilizado em barragens são as geomembranas poliméricas. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010), as geomembranas podem ser definidas como um produto bidimensional, com baixa permeabilidade de fluídos, composto predominantemente por asfaltos, elastômeros ou polímeros, utilizados para controle de fluxo.

Outro método de barreira utilizado é por argila betonítica. A argila é composta por mineral de baixa permeabilidade, além de ser moldada em água e de difícil desagregação. Este argilomineral é capaz de controlar a permeabilidade por meio da hidratação, expansão e

separação do espaço entre as camadas do solo, obstruindo a passagem de fluxo do fluido (FARACE *et al.*, 2016).

Complementar à utilização de argilas como impermeabilizantes, tem-se os geocompostos argilosos para barreiras impermeabilizantes do inglês *geosynthetic clay liners* (GCL). Este tipo de material é formado basicamente pela união de um ou mais geossintéticos e é considerado bastante versátil por apresentar baixa permeabilidade, características favoráveis de resistência mecânica e química, além da facilidade de instalação deste produto.

2.5 BALANÇO HÍDRICO EM BARRAGENS DE REJEITO

O entendimento e a utilização eficiente da água na mineração desempenham um papel estratégico na busca de processos sustentáveis e econômicos. A reutilização de água no processo de beneficiamento mineral reduz os custos de captação e, conseqüentemente, um menor impacto ao meio ambiente. Deste modo, uma das etapas responsáveis pelo reaproveitamento de água é a decantação de rejeito em barragens, para o reaproveitamento da água no processo industrial (AMORIM, 2018).

Rocha (2021) afirma que os estudos de balanços hídricos em barragens são de suma importância para as etapas de projeto e operação destas estruturas. O objetivo destes estudos, visam acompanhar o comportamento hídrico dos reservatórios, permitindo que os responsáveis entendam melhor os cenários de escassez, que podem acarretar operações de beneficiamento interrompidas, devido à falta de água no processamento mineral ou de excesso de água nos reservatórios que podem gerar acidentes graves por galgamento da crista da barragem ou por vazões descontroladas.

Segundo Amorim (2018), a concepção da ideia do balanço hídrico é baseada na equação da continuidade de massas. A associação entre a quantidade de matéria que entra em um sistema, durante um determinado período, com a quantidade de matéria que sai do mesmo, corresponde à variação de volume neste intervalo de tempo, conforme apresentado na Equação 2.2:

$$\Delta V = \sum I - \sum O \quad \text{Equação 2.2}$$

onde ΔV é a variação de volume (m^3) em um determinado intervalo de tempo; $\sum I$ é o somatório do volume (m^3) de água que entra no sistema; e $\sum O$ é o somatório do volume (m^3) de água que sai do sistema.

Usualmente, o balanço hídrico de um reservatório de uma barragem pode conter os componentes da vazão afluyente, que representa o fluxo natural da bacia hidrográfica e o componente de vazão defluente, que corresponde aos fluxos que saem dos sistemas. As variáveis como precipitação e evaporação atuam sobre a superfície do reservatório, consideradas como balanço positivo em períodos chuvosos e negativo em épocas de estiagem (PINHEIRO, 2011). A Figura 2.20 apresenta um esquema de balanço hídrico em barragens de rejeitos, onde ocorre a recuperação da água para o beneficiamento mineral.

Figura 2.20 - Balanço hídrico em barragem de rejeito



Fonte: Pinheiro (2011)

De acordo com Pinheiro (2011), a maioria das construções de barragens de rejeitos, ocorre em vales de curso de água, o que dificulta a contabilização desta variável no balanço hídrico. O sistema em reservatórios de barragens de rejeito opera em regimes não permanentes, ou seja, há variações do volume do reservatório.

Como aponta Rocha (2021), dentre as principais variações que os estudos hídricos podem fornecer, destacam-se: a do nível de água no reservatório; da área alagada; do volume de água dentro do reservatório; a capacidade de armazenamento disponível; percentual do volume do reservatório ocupado por água e por rejeito; volume de água extravasada e superávit ou déficit hídrico.

2.6 MÉTODOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS PARA DISTRIBUIÇÃO DE POROPRESSÃO

As características dos materiais incluindo os rejeitos depositados em barragens variam de acordo com o tipo de processamento destinados a eles. Dessa forma, um dos aspectos do estudo da geotecnia aplicada à mineração, engloba a utilização dos fundamentos da Mecânica dos Solos, a fim de entender a complexibilidade do material depositado em barragens para evitar que danos potenciais aconteçam (REZENDE, 2013).

Com o propósito de estudar a representação da água nos poros de uma estrutura, Duncan e Wright (2005), afirmaram que sempre quando a resistência de cisalhamento de um ou mais materiais presentes na estrutura é expresso em termos de tensões efetivas, as poropressões devem ser determinadas e representadas por meio de análises de estabilidade das barragens. Com isso, foram criados vários métodos para a avaliação da poropressão, cujo parâmetros variam de acordo com a infiltração, a água subterrânea, as condições da estrutura e o grau de rigor exigido.

2.6.1 Poropressão

A poropressão ou pressão neutra pode ser definida como a pressão da água atuante nos espaços vazios do solo ou da rocha em todas as direções. Em locais abaixo do lençol freático, o valor da pressão neutra é resultante do peso da coluna de água contra os grãos ou as fraturas. A poropressão é considerada positiva, quando os pontos medidos estão abaixo do lençol freático, nula quando os pontos estão no mesmo nível do lençol e negativa quando os pontos aferidos, encontram-se acima do lençol freático, condição denominada sucção (CERQUEIRA, 2017; COELHO, 2017).

A percolação descontrolada de água na estrutura, pode acarretar o carregamento de partículas finas no solo, aumentando assim os vazios presentes no barramento e diminuindo a poropressão e o gradiente hidráulico. Esta situação é bastante prejudicial para o barramento, pois pode provocar o rompimento por erosão interna em barragens de rejeito. Assim, é preponderante o entendimento da pressão neutra e do gradiente hidráulico no monitoramento das estruturas, visando manter a segurança e a estabilidade da estrutura (CARVALHO e CORTELETTI, 2021).

A determinação da poropressão pode ser realizada de forma analítica, numérica, experimental e *in situ*. Analiticamente, são utilizadas expressões, ábacos e soluções geométricas (como as redes de fluxo) para retornar estimativas de valores de pressão neutra ao longo de uma seção ou pontualmente na estrutura. Numericamente, diferentes *softwares* (Seep/W, Slide, Ábacus, entre outros) utilizam propriedades hidromecânicas e teorias de fluxo de água em meios confinados e não confinados para retornar gradientes de pressão neutra na estrutura. Experimentalmente, modelos físicos reduzidos e reais são construídos e monitorados seus valores de pressão neutra para a calibração de expressões e proposição de estudos geotécnicos. *In situ*, a instrumentação utilizada possibilita a aferição pontual para retroanálises e melhoria dos modelos utilizados no projeto e monitoramento das estruturas.

É importante ressaltar que apesar dos valores serem determinados pelos métodos supracitados, a poropressão pode variar em função das (1) condições hidrológicas que alteram as cargas geostáticas e dinâmicas; (2) carregamentos rápidos ou em condições não-drenadas de fluxo, como no processo de adensamento de solos finos saturados; (3) sismos originários de explosões, carregamentos dinâmicos, movimentos tectônicos, que alteram a condição hidromecânica do fluido; (4) condições executivas em obras de engenharia, como colmatação do sistema de drenagem interna, ineficiência do sistema de drenagem superficial, rebaixamento rápido do reservatório (ROCSCIENCE, 2021).

Em regiões de estado estacionário de um declive, a determinação das pressões de água nos poros pode ser obtida mediante a solução de fluxo do líquido. Para isso, é necessário determinar uma linha de infiltração que representa a linha de fluxo mais alto e posteriormente construir linhas de vazão equipotenciais na região de vazão saturada, abaixo da linha de infiltração. Depois de definido a rede de fluxo de fluido correto, é possível calcular o valor da poropressão em qualquer ponto desejado (DUNCAN e WRIGHT, 2005).

Segundo Moreira (2005), o grande avanço das técnicas de simulação computacional, permitiu a resolução de problemas complexos relacionados a determinação de poropressão nas estruturas geotécnicas. Usualmente, a grande maioria das análises de infiltração de água subterrânea é realizada pelas soluções numéricas de diferenças finitas ou de elementos finitos, devido a sua grande flexibilidade.

A definição dos métodos dos elementos finitos consiste na divisão dos domínios em subdomínios chamados de elementos finitos. Cada ponto de controle do elemento finito é definido através dos nós, onde ocorre a comunicação dos diversos elementos finitos. Assim, pode-se concluir que a análise de elementos finitos consiste no valor da pressão neutra em cada

ponto nodal. A determinação da poropressão ao longo de uma faixa de deslizamento, deve ser calculada a partir de interpolação dos resultados dos pontos nodais (DUNCAN e WRIGHT, 2005; MOREIRA, 2005).

O método de interpolação é bastante utilizado para calcular a poropressão em superfícies de deslizamento a partir da análise dos elementos finitos. De acordo com Duncan e Wright (2005), um dos métodos clássicos de calcular a interpolação da pressão neutra para cálculos de estabilidade de taludes foi baseado na interpolação de três ou quatro pontos. Neste método, os pontos onde as pressões de água foram definidas, estão próximos aos pontos que devem ser calculados as poropressões.

2.6.2 Determinação analítica simplificada da poropressão em condições geostáticas

O dimensionamento adequado dos cálculos das tensões atuantes e resistentes do solo são indispensáveis para qualquer tipo de obra geotécnica, seja ela de contenção ou fundação. Para isso é importante o estudo das tensões sejam elas induzidas ou geostáticas. Denomina-se tensões induzidas aquela que causam deformações por agentes externos e nomeia-se tensões geostáticas aquela que são decorrentes do peso próprio do solo e da água presente no seu interior.

Nos solos podem ocorrer tensões derivadas do peso próprio e das cargas a ele aplicadas. Estas tensões não podem ser desconsideradas, pois são essenciais para o desenvolvimento de projetos. Quando a superfície do terreno é horizontal, aceita-se que a tensão que ocupa o plano horizontal a uma dada profundidade seja normal ao plano. Neste caso, não existem tensões de cisalhamento no plano (PINTO, 2006). Assim, a tensão vertical pode ser compreendida considerando o peso do solo a uma dada profundidade, conforme apresentado na Equação 2.3.

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad \text{Equação 2.3}$$

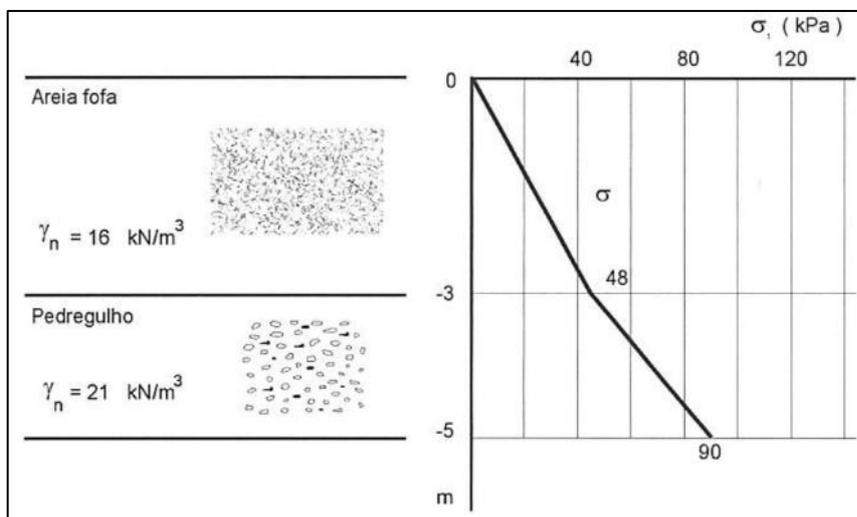
onde, σ_v (kN/m²) é a tensão vertical; γ (kN/m³) é o peso específico do solo; e z (m) é a profundidade.

Há casos em que os solos podem estar estratificados. Dessa forma, a tensão vertical resulta do somatório das diversas camadas, como apresentado na Equação 2.4. A Figura 2.21 ilustra um diagrama de tensões com a profundidade da seção do solo.

$$\sigma_v = \sum \gamma_i \cdot z_i$$

Equação 2.4

Figura 2.21 - Tensão vertical total em camadas da subsuperfície



Fonte: Pinto (2006)

A pressão neutra pode ser determinada de forma análoga, porém, considerando os parâmetros da água (peso específico e distância vertical da lâmina de água). A tensão efetiva é determinada pela diferença entre a tensão total e a poropressão de um ponto e é responsável pelo comportamento mecânico que o solo vai ir apresentar em termos de resistência e deformação.

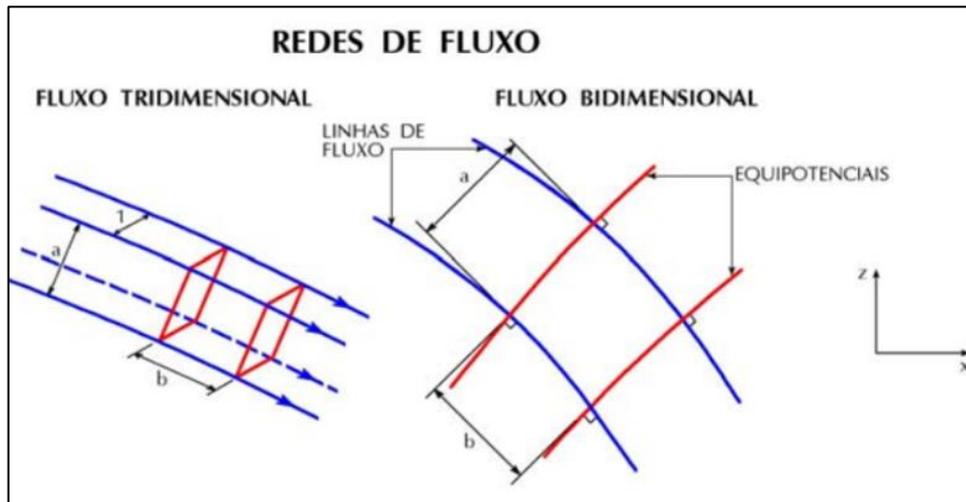
2.6.3 Determinação analítica simplificada da poropressão em condições de fluxo

Na construção e operação de barragens, há a necessidade de analisar e quantificar a água que penetra na estrutura e na fundação e ainda observar o carreamento de sólidos que saem no dreno de fundo, a fim de evitar o mecanismo de ruptura por *piping*. Sabe-se que a água é incompressível, o que permite que, sobre elevadas pressões, ela invadir as microfissuras e os poros e exercer altas pressões que podem levar o maciço a se romper. Um ponto importante para a avaliação de qualquer projeto é o conhecimento das particularidades, não basta apenas realizar verificações matemáticas com modelos computacionais, é preciso julgar criteriosamente cada caso, pois mesmo com modelos matemáticos há diferenças no que acontece na condição real (VILAR *et al.*, 2004).

O estudo do fluxo da água em solos usualmente utilizado é o procedimento conhecido como rede de fluxo. Segundo Ortigão (2007), a rede de fluxo é uma figura que apresenta os fluxos da água em um meio poroso e consiste em um conjunto de linhas de fluxo e linhas

equipotenciais, que se cruzam em um ângulo de 90° (Figura 2.22). Com a rede de fluxo, é possível determinar as poropressões e os gradientes hidráulicos em qualquer ponto da rede. Conhecendo-se a permeabilidade do material, com a rede de fluxo é possível definir a vazão percolada.

Figura 2.22 - Rede de fluxo



Fonte: VILAR *et al.* (2004)

As redes de fluxo podem ser definidas de quatro formas: (1) fluxo confinado no qual as condições limites são determinadas; (2) fluxo não confinado onde pode ser encontrado em barragens; (3) linha freática que apresenta uma série de particularidades sendo um problema de fluxo não confinado e (4) redes de fluxo particulares como ocorrem em situações de enchimento do reservatório, chuvas intensas e rebaixamento do nível de água do reservatório e ocasiões de épocas de seca (VILAR *et al.* 2004).

Dentro das redes de fluxo existem os dois elementos de rede que são: as linhas de fluxo e as linhas equipotenciais. Ortigão (2007) define as linhas de fluxo sendo uma indicação do percurso das partículas e do fluido percolado. Pode-se calcular as linhas de fluxo mediante a Equação 2.5.

$$n_c = n_{lf} - 1 \quad \text{Equação 2.5}$$

onde, n_c corresponde ao número das linhas de fluxo e n_{lf} ao número de linhas de fluxo verticais.

Ortigão (2007) descreve também as linhas equipotenciais como os lugares geométricos que possuem o mesmo potencial total ou a mesma carga hidráulica total, interceptando as linhas de fluxo perpendicularmente. É importante ressaltar que entre duas equipotenciais adjacentes ocorre uma perda de carga. A Equação 2.6 apresenta o cálculo do número de quedas de carga, utilizado para o cálculo das linhas equipotenciais.

$$n_q = n_{eq} - 1 \quad \text{Equação 2.6}$$

onde, n_q corresponde ao número de quedas de carga e n_{eq} ao número de equipotenciais.

Conhecendo os elementos geométricos de rede (n_c e n_q) é possível estabelecer a vazão da rede de fluxo mediante a Equação 2.7:

$$Q_1 = kH \frac{n_c}{n_q} \quad \text{Equação 2.7}$$

onde, Q_1 (m^3/s) é a vazão por unidade de comprimento da rede; k (m/s) é a permeabilidade; a relação n_c/n_q é o fator de forma da rede de fluxo e H (m) é a perda de carga total que ocorre na rede.

As redes de fluxo de um maciço também podem ser utilizadas para calcular as cargas hidráulicas. Estas cargas hidráulicas possuem a unidade de medida de comprimento e seu cálculo pode ser realizado pelas Equação 2.8 e Equação 2.9:

$$h_t = h_p + h_a \quad \text{Equação 2.8}$$

onde, h_t (m) é a carga hidráulica total; h_p (m) é a carga hidráulica piezométrica; e h_a (m) é a carga hidráulica altimétrica que pode ser igual a cota ou a elevação referente a um ponto arbitrário.

$$h_p = \frac{u}{\gamma_w} \quad \text{Equação 2.9}$$

onde, u (kPa) é a poropressão; e γ_w (kN/m^3) é o peso específico da água.

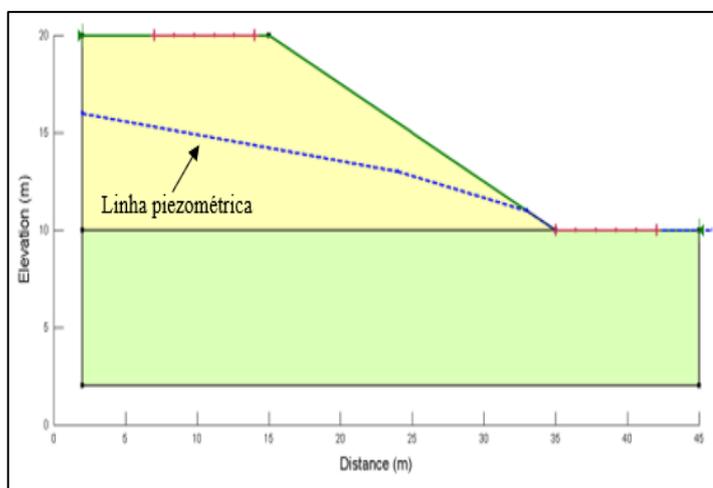
2.6.4 Determinação analítica da poropressão pelo parâmetro r_u

Com o intuito de expressar as condições de poropressão de forma simplificada, criou-se o parâmetro conhecido como r_u , capaz de definir a pressão de água nos poros em função da tensão de sobrecarga (GEOSTUDIO, 2021). Por vários anos, a definição de poropressão foi simulada pelo parâmetro r_u que de acordo com a Equação 2.10 representa a relação entre a poropressão estática (u_s) e a tensão vertical total (σ_v).

$$r_u = \frac{u_s}{\sigma_v} \quad \text{Equação 2.10}$$

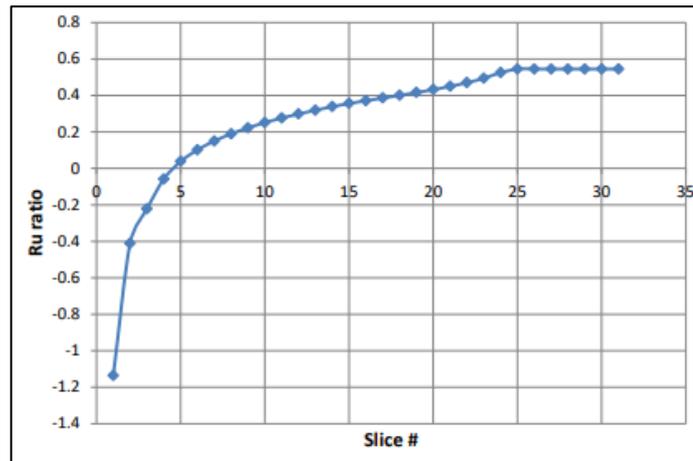
Para a determinação do parâmetro r_u utilizando o *software* Geoslope, é necessária a representação das condições de pressão da água dos poros com a utilização de uma linha piezométrica (Figura 2.23). O software permite a análise da variação dos valores de r_u ao longo das superfícies de deslizamento (Figura 2.24).

Figura 2.23 - Configuração de análise de estabilidade



Fonte: Adaptado de Geostudio (2021)

Figura 2.24 - Variação das razões de r_u ao longo de uma superfície de deslizamento.



Fonte: Geostudio (2021)

Neste caso, a variação das razões para as superfícies de deslizamento variou de -1,14 a 0,54 aproximadamente. Uma limitação encontrada desta metodologia seria a admissão de um valor fixo e constante, a determinação do parâmetro r_u . No entanto, este valor constante só seria possível se a linha piezométrica estivesse na superfície do solo, no qual é uma situação raramente encontrada. Diante deste fato, é necessário utilizar um valor médio ao longo das superfícies de deslizamento.

Segundo Costa (2009), o parâmetro r_u juntamente com os valores de m (coeficiente de estabilidade) e n (coeficiente obtido em ábacos) podem ser utilizados para definir o fator de segurança (FS) de maneira rápida, conforme apresentado na Equação 2.11.

$$FS = m - n \cdot r_u \quad \text{Equação 2.11}$$

Costa (2009) afirma sobre a dificuldade de utilizar o parâmetro r_u , já que ele varia em toda a extensão da superfície de ruptura, caso ela não seja paralela à superfície do terreno. Assim, os projetistas que utilizam estes parâmetros consideram-no como constante, seja calculado por média aritmética ou ponderada. Existem muitas cartas de risco que apresentam valores pressupostos para o r_u simulado pela elevação da linha freática ou pela geração de poropressão, como em condições de fluxo permanente e estático em que o valor do parâmetro é em média de 0,5. No entanto, mesmo com os valores estipulados para o r_u , há pouca representatividade deste parâmetro, podendo ser variáveis em relação as condições reais em campo.

2.6.5 Determinação analítica da poropressão pelo parâmetro B-bar

O método B-Bar permite contabilizar mudanças de curto prazo na poropressão devido ao carregamento rápido da pressão. Conforme apresentado por Rocscience (2004) este método possui uma relação diretamente proporcional entre a mudança da poropressão e a tensão vertical, conforme apresentado na Equação 2.12:

$$\Delta u = \bar{B} \Delta \sigma_v \quad \text{Equação 2.12}$$

onde, \bar{B} corresponde ao B-Bar que representa ao coeficiente global de poropressão para um determinado material e a σ_v (kN/m²) pode ser obtida pelo peso de camadas adicionais e/ou cargas sísmicas verticais.

A metodologia aplicada pelo *software* Slide da Rocscience para o cálculo da poropressão pelo B-Bar ocorre por dois estágios:

- Determinação da poropressão por métodos disponíveis pelo Slide como coeficiente r_u ou análise dos elementos finitos;
- O excesso da poropressão é estabelecido a partir da mudança da tensão vertical e do coeficiente B-Bar para um material, mediante a Equação 2.12.

Rocscience (2004) aponta que a pressão final utilizada para os cálculos de estabilidade disponibilizada no *software*, leva em consideração a soma entre a poropressão inicial mais o excesso de poropressão calculado.

Outra metodologia aplicada para estabelecer o excesso da pressão da água nos poros é pelo Slope/W utilizando várias abordagens como a função de pressão espacial e as pressões dos poros estabelecidas por elementos finitos ou pelo uso do B-Bar de Skempton (1954), no qual este último não requer a análise de elementos finitos (GEOSTUDIO, 2021). A poropressão de uma determinada porção é calculada segundo a Equação 2.13:

$$u = u_0 + \Delta u \quad \text{Equação 2.13}$$

onde, u_0 (kPa) é a pressão da água nos poros in situ e Δu (kPa) é a mudança na pressão da água dos poros devido a uma mudança de tensão do solo.

Skempton (1954) publicou em seu trabalho, uma equação que permite a mudança na pressão da água dos poros decorrente das mudanças da tensão total conforme a Equação 2.14:

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad \text{Equação 2.14}$$

onde os valores de A e B são coeficientes de poropressão e $\Delta\sigma_1$ e $\Delta\sigma_3$ (kN/m²) são mudanças nas tensões principais. A Equação 2.14 pode ser simplificada para as aplicações na porção B-Bar conforme a Equação 2.15:

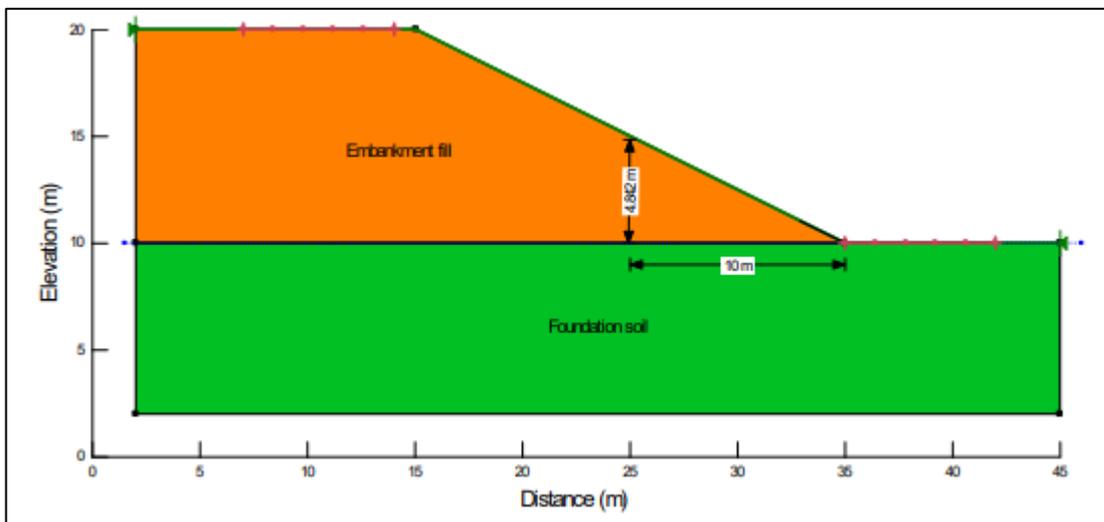
$$\frac{\Delta u}{\Delta\sigma_1} = B \quad \text{Equação 2.15}$$

Em muitos casos admite-se a tensão principal igual a tensão vertical total. A definição do parâmetro B pode ser observada na Equação 2.16. É importante ressaltar que os coeficientes de poropressão pelo método de Skempton são baseados nas mudanças de tensão total.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_v} \quad \text{Equação 2.16}$$

A Figura 2.25 abaixo apresenta a geometria e configuração para a análise do parâmetro B-Bar. Neste caso, sugere-se que o aterro é composto por um material granular que não desenvolve pressão excessiva de água nos poros durante sua construção e que o lençol freático inicial está localizado na superfície do solo. Dessa forma, o B-Bar para o solo da fundação admite o valor de 0,7.

Figura 2.25 - Configuração do problema pelo Geostudeo



Fonte: Geostudio (2021)

2.6.6 Comentários gerais sobre a inserção da poropressão em softwares

O excesso de poropressão refere-se ao aumento da pressão nos poros do solo por carregamento rápido. Este comportamento ocorre normalmente em materiais com baixa permeabilidade como no caso das argilas e rejeitos finos. Esta mudança abrupta na tensão vertical pode ser devido ao: (1) peso das camadas adicionais de material; (2) cargas externas; (3) cargas sísmicas e (4) a combinação de todos estes fatores (ROCSCIENCE, 2021).

Uma das metodologias empregadas para o entendimento da poropressão em função da sobrecarga é o parâmetro r_u . Segundo Rocscience (2021) o valor esperado para o coeficiente r_u varia de 0 a 1. Este parâmetro é amplamente utilizado por modelar a pressão dos poros como uma pressão vertical do solo para cada fatia. Neste caso, para o cálculo da tensão vertical o *software* considera o peso da água acumulada, caso o material esteja submerso. Ressalta-se um ponto evidente a respeito o coeficiente r_u sobre os diferentes valores do parâmetro para um tipo de solo. Neste caso, deverá ser definido um valor, diferente de r_u . Logo, os limites de materiais apropriados terão que ser adicionados ao modelo, a fim de definir as diferentes regiões do solo.

Outro critério utilizado para o entendimento da poropressão segundo carregamentos rápidos é o parâmetro B-Bar. De acordo com Rocscience (2021) o valor do B-Bar geralmente está entre 0 e 1, podendo em alguns casos ser maior que 1. Em materiais que não desenvolvem excesso de poropressão nos poros em resposta a uma mudança da tenção vertical o coeficiente B-Bar é igual a 0.

2.7 NÍVEIS DE REFERÊNCIA DO MONITORAMENTO

Os níveis de controle de referência dos instrumentos em barragens de rejeitos são utilizados para o entendimento dos dados de monitoramento e para a análise da gestão de segurança no barramento. No Brasil, o documento que institui e é usualmente utilizado por projetistas e pelos órgãos fiscalizadores é a carta de risco. Este documento visa estabelecer e informar as leituras dos instrumentos presentes na estrutura, para que posteriormente, possam ser determinados os níveis de segurança do barramento (MARTINS, 2019; VELTEN et al., 2016;).

Os valores dos níveis de operação (Tabela 2.1) foram baseados utilizando o modelo de análises determinísticas, onde o valor do nível de água do lençol freático aumenta à medida que

o valor do fator de segurança diminui. Estes valores foram fundamentados pela *Australian National Committee on Large Dams* (ANCOLD) em estruturas com condições normais e saturadas (SOUZA, 2018). No instante em que o instrumento atinge leituras acima dos níveis de controle, é de responsabilidade do empreendedor em monitorar os instrumentos mediante as ações propostas pelo manual de operação da estrutura.

Tabela 2.1 - Níveis de controles baseados no fator de segurança

Níveis de operação	Fator de segurança (FS)
Normal	$FS \geq 1,5$
Atenção	$1,30 \leq FS < 1,50$
Alerta	$1,10 \leq FS < 1,30$
Emergência	$FS < 1,10$

Fonte: Martins (2019)

Penna *et al.* (2017) afirmam que os dados estipulados pela carta de risco nem sempre retratam as condições reais da estrutura. Instrumentos que apresentam níveis de emergência, nem sempre apresentam condições críticas de risco ou segurança, da mesma maneira que instrumentos podem indicar valores de normalidade e estar associado a um modo de falha por erosão interna ou liquefação. Portanto, é importante entender cada instrumento instalado na barragem de rejeito de forma isolada a fim de avaliar a real condição da estrutura.

Outro método de avaliação dos níveis de controle das estruturas é por meio da estatística histórica dos instrumentos instalados no barramento. Sabe-se que a instrumentação em estruturas geotécnicas é indispensável em todas as etapas de operação. Deste modo, a instrumentação pode contribuir a compreender prováveis problemas nas estruturas, alertar sobre mudanças que colocam a barragem em risco e auxiliar nas tomadas de decisão geotécnicas. Embora os instrumentos em barragens sejam primordiais para determinação de ações importantes, eles por si só, não são capazes de aumentar o nível de segurança da estrutura. Logo, são necessários que eles sejam calibrados, posicionados em locais adequados, lidos em intervalos de tempo compatível e os dados analisados e tratados para garantir a estabilidade das barragens de rejeito (FUSARO, 2007; FERC, 2003;).

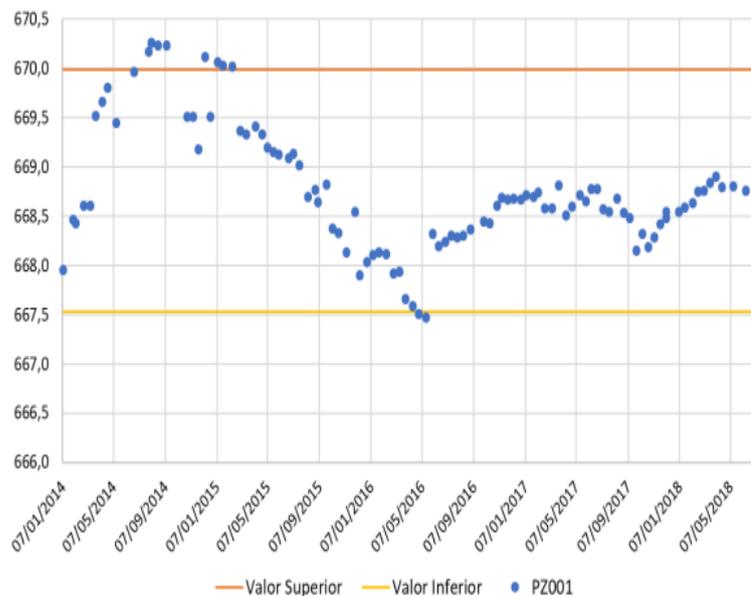
Segundo Ligocki (2003), a partir dos dados históricos dos instrumentos instalados na barragem de rejeito, é possível calibrar o modelo, simulando as condições de fluxo de água do barramento, além de determinar a linha freática que melhor contribui para a estrutura. Dessa

forma, o estabelecimento dos níveis de controle do barramento é baseado nos cálculos de fatores de segurança, variando os parâmetros piezométricos e freáticos.

A Itália foi o país precursor na tentativa de calcular leituras utilizando o método determinístico e estabelecer níveis de tolerância para o comportamento de estruturas a partir de medições de campo e valores previsto em modelos. Os níveis de tolerância da instrumentação eram definidos com base na estimativa do desvio padrão de valores previstos em modelos e aferidos em um período de dois ou três anos do comportamento normal da estrutura (FUSARO, 2007).

Neste contexto, para determinar os valores de controle da instrumentação de barragens de rejeito, em seu trabalho, Martins (2019) estabeleceu estes valores por análise estatística, definindo a média, máximo, mínimo e desvio padrão das leituras. Os dados foram correlacionados em um nível de confiança de 95% para a obtenção dos limites de aceitação superior e inferior. Conforme apresentado na Figura 2.26, os dados da cota piezométrica foram plotados em função temporal e representados os níveis inferiores e superiores para o instrumento.

Figura 2.26 - Limites piezométricos



Fonte: Martins, 2019

De acordo com Souza (2018), a análise dos dados de instrumentação abrange a avaliação dos valores medidos em campo com aqueles esperados experimentalmente, a determinação de tendências das medições, o desenvolvimento de modelos experimentais que buscam simular o

comportamento da estrutura. Para facilitar o processo de análise, os dados devem ter informações completas, geralmente baseados em modelos de elementos finitos bi e tridimensionais. Assim, todas as leituras históricas presentes no barramento são válidas para estudos estatísticos, pois são utilizados nas aferições e calibração do modelo.

3 METODOLOGIA

A fim de se obter os objetivos propostos, este trabalho de caráter quantitativo, baseou na coleta e análise de informações a partir de pesquisas bibliográficas acerca do tema em questão. Para o desenvolvimento da pesquisa, foram coletadas informações na literatura nacional e internacional, sendo consultados artigos científicos nas plataformas Google Scholar, Scopus, Scielo, Web of Science, reportagens de jornais e livros e manuais técnicos correlatos. Após a compreensão do referencial teórico, buscou-se analisar a instrumentação geotécnica de um estudo de caso real, cujas informações da empresa não serão abordadas.

3.1 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A barragem do estudo em questão denomina-se de Sul Inferior, situada no estado de Minas Gerais. O início de operação da estrutura foi na década de 80 e sua vida útil prolongou-se até o ano de 2008. A construção desta barragem foi em uma única etapa, cuja finalidade foi a contenção de água e sedimentos provenientes da barragem Sul Superior localizada a montante e materiais provenientes do entorno. A Figura 3.1 e Figura 3.2 apresenta a vista geral da estrutura e sua localização no Google Earth respectivamente.

Figura 3.1 - Vista geral da Barragem Sul Inferior



Fonte: Própria autora (2022)

Figura 3.2 - Localização da estrutura



Fonte: Google Earth (2022)

Para investigar os materiais que compõem a Barragem Sul Inferior foram realizados em décadas passadas, trabalhos de sondagem de caráter exploratório, no qual pode entender melhor a geologia de formação da barragem. Tratando-se da fundação da estrutura, verificou-se a presença de quartzitos e filitos em condições geomecânicas variáveis com predominância de solo residual e rocha alterada. Já em amostras retiradas do maciço, observou que ele é composto por materiais de diversas texturas, desde argila a pedregulhos grosso de itabirito. A Tabela 3.1

apresenta os materiais que constituem a estrutura da barragem Sul Inferior com seus respectivos parâmetros geotécnicos.

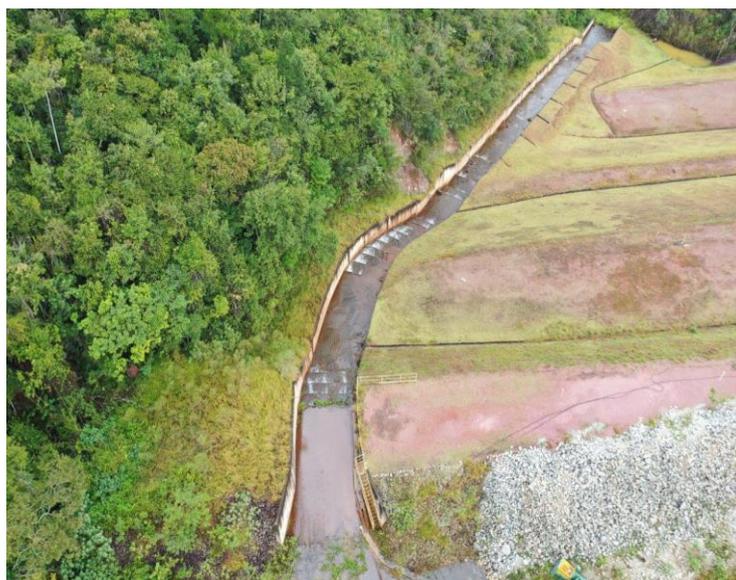
Tabela 3.1 - Parâmetros geotécnicos

Material	Peso específico γ (kN/m ³)	Coesão c' (kPa)	Ângulo de atrito ϕ' (°)	Permeabilidade (m/s)
Aterro inicial	20	15	27	1,00.10 ⁻⁸
Aterro de reforço	20	20	30	1,00.10 ⁻⁸
Drenagem interna	18	0	30	4,00.10 ⁻⁴
Enrocamento	20	0	38	1,00.10 ⁻³
Solo residual	20	15	25	1,00.10 ⁻⁷
Maçio rochoso	-	-	-	2,00.10 ⁻⁸

Fonte: Cedido pela empresa (2022)

Outro ponto importante a respeito da descrição da estrutura são os sistemas de drenagem interna e canal extravasor. O sistema de drenagem interna da Barragem Sul Inferior é constituído por tapete drenante e enrocamento. Já o canal extravasor é composto por três partes principais: canal de aproximação, canal retangular em degraus e bacia de dissipação (Figura 3.3). A Tabela 3.2 apresenta os dados gerais da Barragem Sul Inferior.

Figura 3.3 - Sistema Extravasor



Fonte: Própria autora (2022)

Tabela 3.2 - Dados gerais da estrutura

Nome da Estrutura:	Barragem Sul Inferior
Localização:	Minas Gerais
Finalidade	Contenção de sedimentos e água
Situação da operação	Em operação para condições de sedimentos e inoperante para contenção de rejeitos
Método de alteamento	Alteamento em única etapa
Volume do reservatório	Aproximadamente 590 mil m ³
Comprimento da crista	Aproximadamente 180 m

Fonte: Cedido pela empresa (2022)

3.2 PIEZÔMETROS DE MONITORAMENTO

A Barragem Sul Inferior é monitorada periodicamente por instrumentos de aferição de poropressão. Logo, a estrutura dispõe de 8 piezômetros do tipo Casagrande automatizados com sensores de corda vibrante. A automatização destes piezômetros ocorreu em março de 2019 devido às restrições de acesso à estrutura, em razão da Barragem Sul Superior encontrar-se em Nível 3 e estar situada a montante da Barragem Sul Inferior (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Barragem à montante da Barragem Sul Inferior



Fonte: Própria autora (2022)

Atualmente os dados automatizados são medidos por um instrumento denominado *Datalogger* que fornece leituras de maneira remota na frequência de 4 em 4 horas. A Figura 3.5 apresenta a localização dos piezômetros automatizados da Barragem Sul Inferior e a Tabela 3.3 expõe as principais informações dos piezômetros.

Figura 3.5 - Localização dos piezômetros no Google Earth.



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 3.3 - Informações dos piezômetros

Instrumento	Profundidade (m)	Cota de Fundo (m)	Cota Superfície (m)	Local de instalação
PZ009	15,18	845,65	860,83	Fundação
PZ007	19,91	850,16	870,07	Fundação
PZ008	19,93	849,88	869,81	Fundação
PZ024	20,34	863,97	884,31	Maciço
PZ022	21,13	863,35	884,48	Maciço
PZ036	21,29	859,29	880,58	Maciço
PZ005	31,93	847,69	879,62	Fundação
PZ023	39,70	844,64	884,34	Fundação

Fonte: Cedido pela empresa (2022)

3.3 NÍVEIS DE CONTROLE

Os níveis de controle dos piezômetros da Barragem Sul Inferior foram obtidos por meio da estatística histórica dos instrumentos instalados na estrutura. Em análise dos dados, apenas o piezômetro PZ036 foi o único instalado em 2018. Assim os dados para determinação dos tarps (valores de referência) foram do período de junho de 2018 a abril de 2022. Os demais instrumentos foram instalados em 2007. Desta forma, para a aferição dos tarps de controle, considerou as leituras de janeiro de 2007 a abril de 2022.

A partir dos dados coletados, calculou-se para cada instrumento presente na estrutura a média, a amplitude e o desvio padrão das leituras. Os níveis de controle foram estabelecidos de acordo com a regra empírica apresentado pela Data Science (2020). Neste método, a regra empírica pode ser conhecida como 68 – 95 – 99,7, no qual 68% dos dados cairão no primeiro desvio padrão (nível de atenção), 95% cairão no segundo desvio padrão e, conseqüentemente, no primeiro desvio padrão (nível de alerta) e 99,7% cairão no terceiro desvio padrão e de modo conseqüente, no segundo e primeiro desvio padrão. Os níveis de atenção, alerta e emergência foram calculados de acordo com as Equação 3.1 Equação 3.2 e Equação 3.3 respectivamente:

$$\textit{Atenção} = \bar{X} + \sigma \quad \text{Equação 3.1}$$

$$\textit{Alerta} = \bar{X} + (2\sigma) \quad \text{Equação 3.2}$$

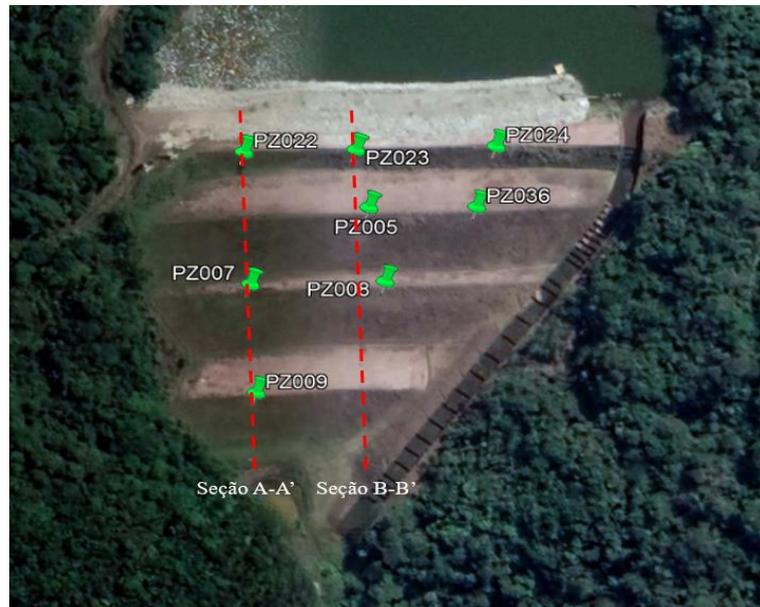
$$\textit{Emergência} = \bar{X} + (3\sigma) \quad \text{Equação 3.3}$$

onde, \bar{X} representa a média das cotas piezométricas e σ corresponde ao desvio padrão.

3.4 SEÇÕES DA BARRAGEM SUL INFERIOR

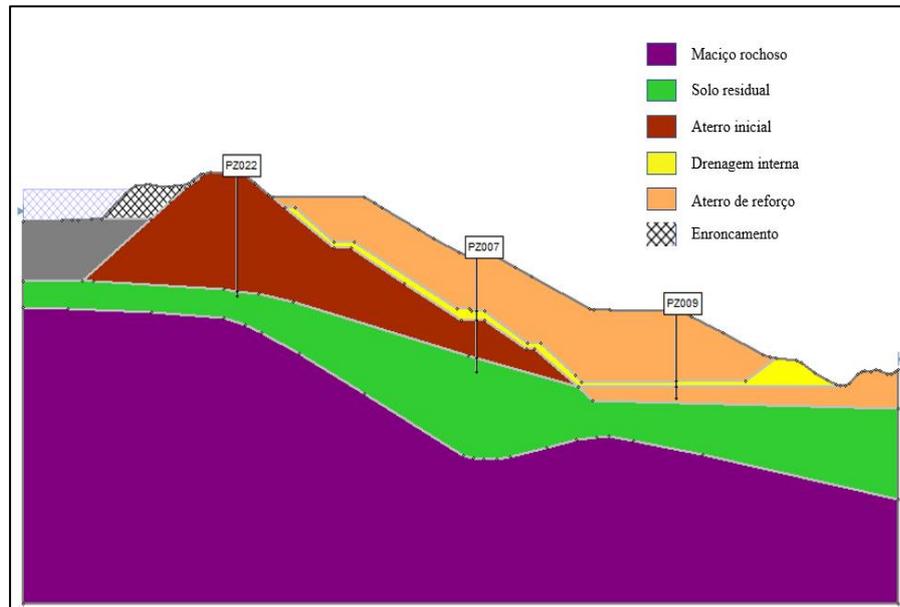
Com o propósito de investigar os valores da poropressão e analisar a percolação de água da estrutura, gerou-se duas seções representativas em duas dimensões, denominadas seção A-A' considerada a seção principal da barragem e a seção B-B' classificada como seção secundária. A Figura 3.6 ilustra as seções geradas na Barragem Sul Inferior com os piezômetros instalados na estrutura e a Figura 3.7 apresenta um esquema dos materiais que compõe a seção principal A-A', considerada com maior representatividade.

Figura 3.6 - Seções da Barragem Sul Inferior



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 3.7: Seção A-A'



Fonte: Própria autora (2022)

3.5 PLUVIOMETRIA

Os dados pluviométricos da Barragem Sul Inferior foram disponibilizados pela empresa no período de janeiro de 2007 até abril de 2022, o que permitiu a análise dos piezômetros mediante os ciclos de chuva ao longo dos anos. A pluviometria é aferida de forma manual por meio de uma proveta graduada. O monitoramento da pluviometria é realizado diariamente e registrado no sistema Geotec (sistema interno de monitoramento e gestão da empresa), no qual permite a exportação dos dados para a análise precisa das medições pluviométricas.

3.6 DADOS DOS GRÁFICO DOS INSTRUMENTOS

O histórico dos piezômetros instalados na Barragem Sul Inferior apresenta leituras manuais e automatizadas. As leituras manuais eram realizadas por operador em campo com o auxílio de um instrumento denominado medidor de nível de água. Estas leituras não apresentavam uma periodicidade fixa, onde eram coletados dados semanalmente e/ou mensalmente. Com a classificação da Barragem Sul Superior em Nível 3 em março de 2019, houve a necessidade de automatizar os piezômetros Casagrande, inserindo o sensor de corda vibrante no instrumento. No início do monitoramento das leituras automatizadas, as medições eram feitas de hora em hora. Com o passar dos anos, a empresa responsável pela barragem optou por modificar a periodicidade das leituras automatizadas para quatro em quatro horas.

A fim de expor graficamente as leituras diárias das cotas piezométricas com a pluviometria, tornou-se necessário a escolha do pior cenário, aquele em que poderia ocasionar algum mecanismo de ruptura da barragem Sul Inferior. Dessa forma, selecionou-se a maior valor entre as leituras manuais e automatizadas, por meio de fórmulas de Excel para representar as medições da cota piezométrica de cada instrumento instalado na barragem.

Posteriormente a avaliação dos dados, pode-se plotar para cada instrumento, um gráfico com a série de medição histórica da cota piezométrica, desde o período de junho de 2018 até abril de 2022 para o piezômetro PZ036 e de janeiro de 2007 até abril de 2022 para os demais instrumentos.

Com o intuito de analisar os valores da poropressão dos instrumentos cuja profundidade fosse é similar e da seção principal, foi adotado um peso específico para a água de 10 kN/m^3 . Posteriormente os cálculos foi possível esboçar os gráficos comparando as poropressões dos instrumentos com profundidades aproximadas. Esta comparação também foi adotada para o

parâmetro r_u , realizando cálculos deste componente a partir da Equação 2.10 do Tópico 0 do Referencial Teórico.

A análise de percolação foi realizada da seção A-A' pelo software Slide da Rocscience. Os parâmetros imputados no software foram cedidos pela empresa responsável pela barragem conforme observado na Tabela 3.1 - Parâmetros geotécnicos e a. Após análise de percolação pelo método numérico, determinou qual seria o valor da poropressão nos instrumentos com os dados reais e calculou o erro estimado para cada piezômetro da seção principal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão tratados os resultados obtidos neste trabalho: definição dos tarps de controle dos piezômetros, análise e determinação da poropressão e do parâmetro r_u na parte longitudinal do maciço e da fundação, na parte transversal da fundação e na seção principal, além da análise de percolação dos piezômetros da seção principal.

4.1 TARPS DE CONTROLE

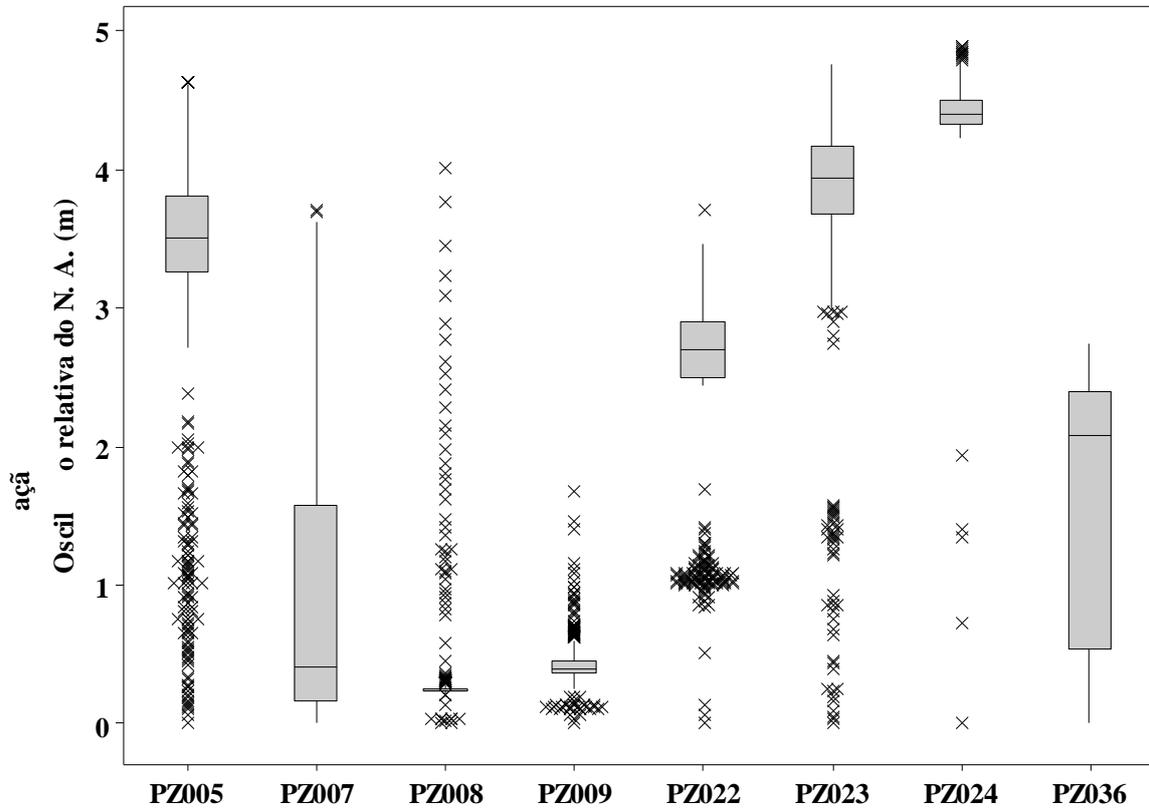
Similar ao trabalho de Martins (2019), os tarps de controle dos piezômetros da barragem Sul Inferior, formam definidos por análise estatística dos dados históricos dos instrumentos. Inicialmente foi exportado o banco de dados do *software* Geotec com todas as leituras manuais e automatizadas dos piezômetros instalados na barragem. A Tabela 4.1 apresenta algumas estatísticas descritivas do banco de dados coletados ao longo do período analisado. Pode-se verificar que embora as cotas de cada instrumento sejam diferentes, decorrente da instalação do fundo e conseqüente oscilação freática, a amplitude de oscilação do N. A. (diferença entre cota máxima e cota mínima de leitura) manteve-se na ordem de 1,67 a 4,88 metros ao longo da medição histórica. A partir do banco de dados, valores médios e caixas de dispersão foram determinadas, a fim de verificar frequências típicas de ocorrências de dados, conforme Figura 4.1. A oscilação relativa do N. A. foi determinada subtraindo a cota mínima registrada de cada leitura de cota do N. A., de forma a comparar relativamente o comportamento registrado.

Tabela 4.1 - Dados estatísticos dos piezômetros

Instrumento	Cota N. A. Mínimo (m)	Cota N. A. Máximo (m)	Média Cota N. A. (m)	Desvio Padrão	Amplitude do N. A. (m)
PZ005	853.58	858.21	856.87	1.07	4.63
PZ007	850.24	853.95	851.16	0.98	3.71
PZ008	849.90	853.90	850.24	0.45	4.01
PZ009	846.41	848.08	846.84	0.17	1.67
PZ022	866.00	869.69	868.53	0.67	3.70
PZ023	862.08	866.84	865.87	0.87	4.76
PZ024	864.28	869.16	868.69	0.35	4.88
PZ036	862.19	864.93	863.85	0.89	2.74

Fonte: Própria autora (2022)

Figura 4.1 – Dispersão da base de dados coletada



Fonte: Própria autora (2022)

Analisando a Figura 4.1 é possível identificar a ocorrência de leituras atípicas (*outliers*) em praticamente todos os piezômetros. Tal comportamento é esperado, uma vez que a série histórica apresenta muitas leituras e engloba diferentes situações do barramento, em termos de estiagens, pluviometria intensa e distribuição interna de poropressões. Um aspecto positivo é a ocorrência, em geral, de mais situações atípicas de oscilações baixas de leituras piezométricas do que grandes valores. Ainda, os *box-plots* (caixas de dispersão) se mantiveram relativamente estreitos, o que demonstra um comportamento padrão na maioria do tempo. No geral, os piezômetros apresentaram a maior incidência de valores atípicos e significativa amplitude de variação, característica associada à heterogeneidade da distribuição de poropressões no interior do maciço

A partir do banco de dados, foi realizado um teste de igualdade de variâncias (o nível de significância de 0,05) para analisar o comportamento amostral das leituras dos piezômetros. O teste retornou que os desvios padrões são estatisticamente diferentes, de forma que é possível inferir que o comportamento hidráulico nos diferentes pontos da barragem não é homogêneo.

A partir da metodologia estatística considerada para a definição dos tarps dos instrumentos (Tópico 3.3), foram determinados os níveis de atenção, alerta e emergência, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Tarps dos instrumentos da barragem Sul Inferior

Instrumento	Atenção	Alerta	Emergência
PZ005	857,75	858,34	858,93
PZ007	851,42	852,22	853,02
PZ008	850,31	850,49	850,67
PZ009	846,91	847,02	847,14
PZ022	869,05	869,37	869,68
PZ023	866,48	866,90	867,32
PZ024	868,86	869,03	869,21
PZ036	863,68	864,64	865,60

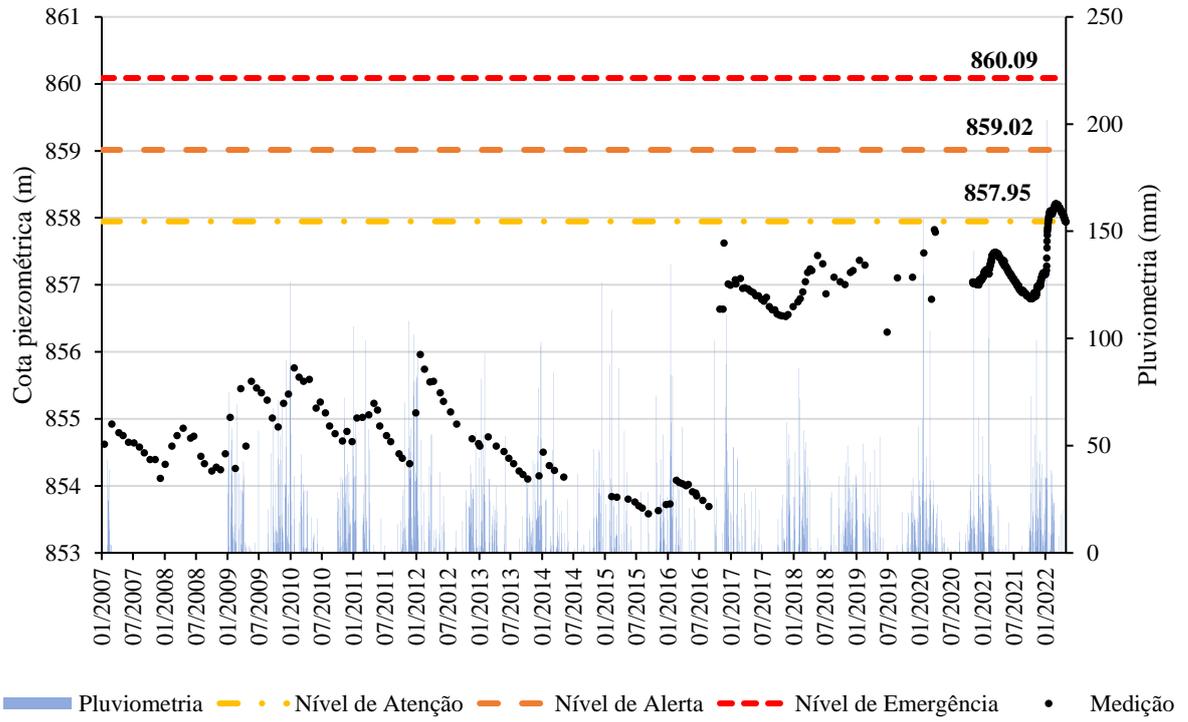
Fonte: Própria autora (2022)

Como os dados dos tarps foram baseados em análises estatísticas, percebe-se que quanto menor for o desvio padrão calculado pelo instrumento, menor será a variação do nível de controle estabelecido. Logo, conforme apresentado na Tabela 4.1, os menores valores de desvio padrão foram nos piezômetros: PZ008, PZ009 e PZ024. Dessa forma, pequenas variações na cota piezométrica do instrumento podem ocasionar no acionamento do nível do piezômetro, uma vez que não é comum grandes variações na série histórica. Conforme sugerido por Martins (2019), a fim de evitar o acionamento dos tarps dos instrumentos, é interessante considerar dados com um grau de confiança maior, ou mesmo, aplicar um fator multiplicador no desvio padrão, para aumentar a faixa das leituras.

4.2 DADOS HISTÓRICOS DOS PIEZÔMETROS

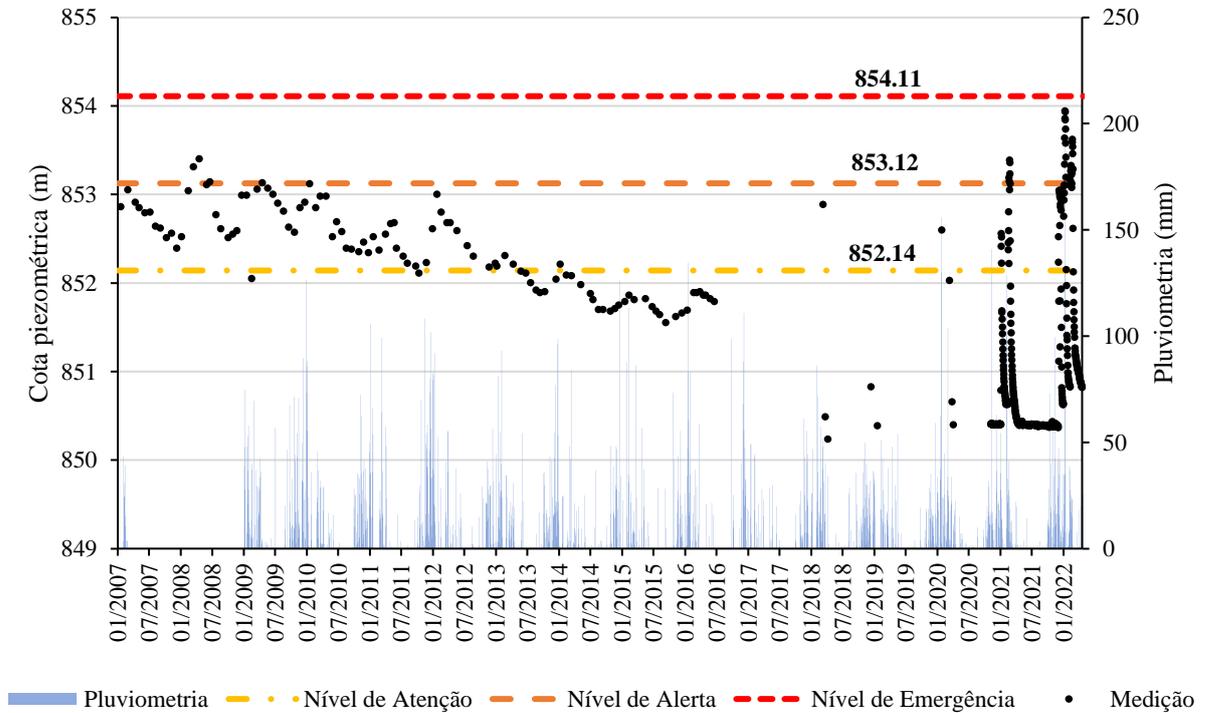
Com os dados manuais e automatizados obtidos pelo *software* Geotec foi possível esboçar no *software* Excel, os gráficos de cada piezômetro ao lado de sua série histórica, com os valores da pluviometria e dos tarps definidos para cada instrumento. As Figura 4.2 a Figura 4.9 apresentam os gráficos histórico dos piezômetros instalados na barragem Sul Inferior.

Figura 4.2 - Gráfico histórico piezômetro PZ005



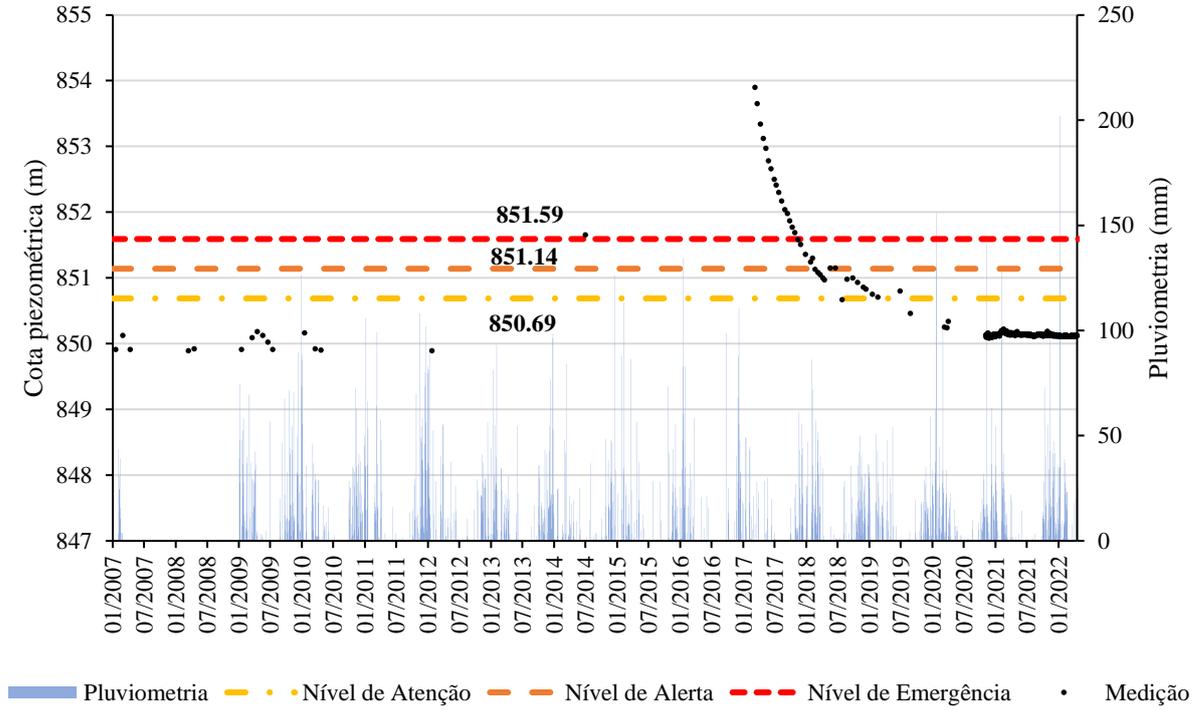
Fonte: Própria autora (2022)

Figura 4.3 - Gráfico histórico piezômetro PZ007



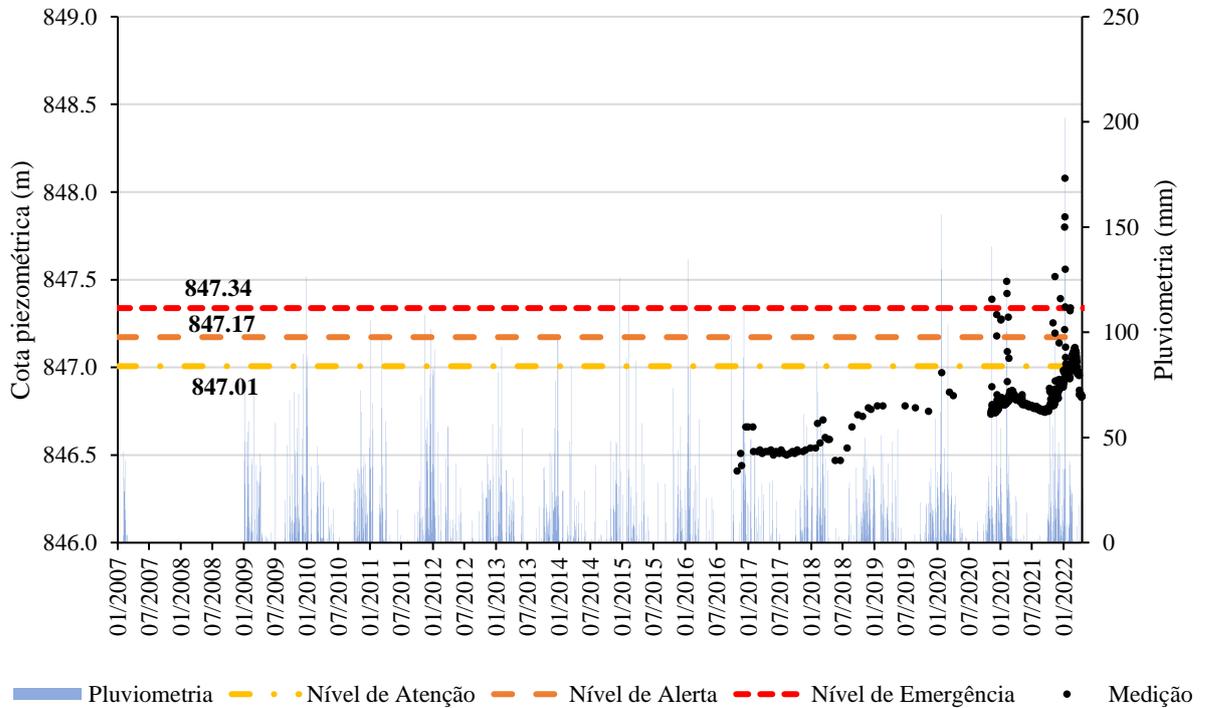
Fonte: Própria autora (2022)

Figura 4.4 - Gráfico histórico piezômetro PZ008



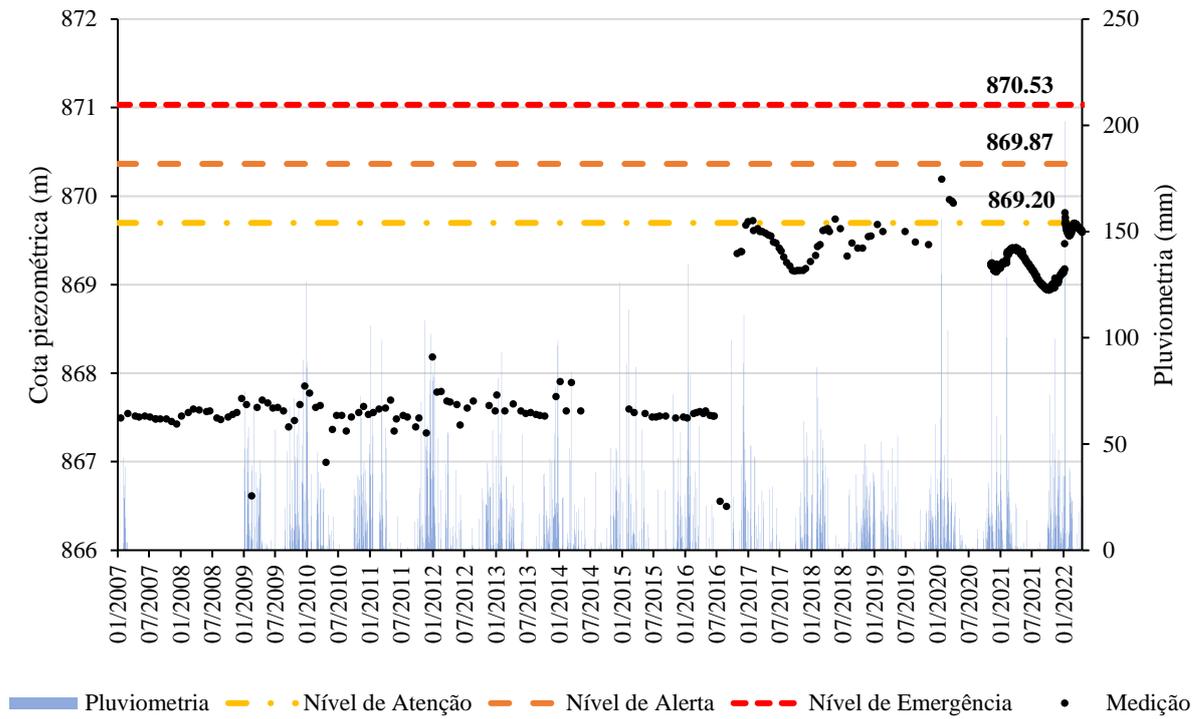
Fonte: Própria autora (2022)

Figura 4.5 - Gráfico histórico piezômetro PZ009



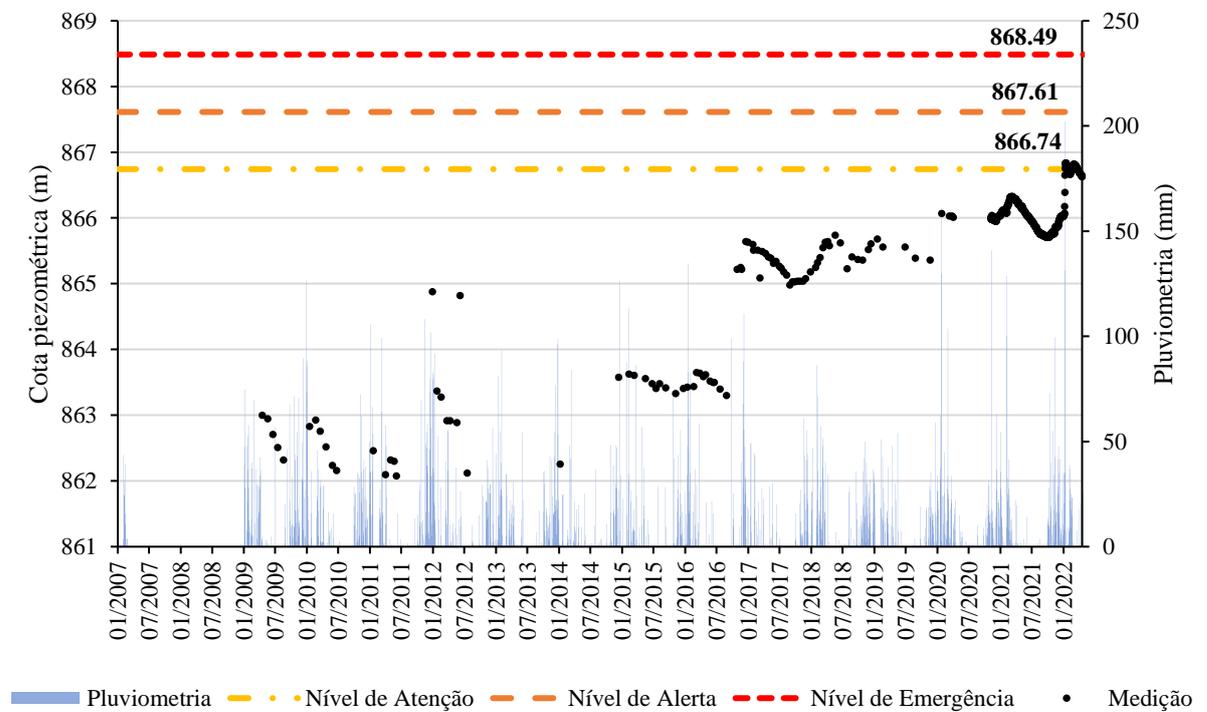
Fonte: Própria autora (2022)

Figura 4.6 - Gráfico histórico piezômetro PZ22



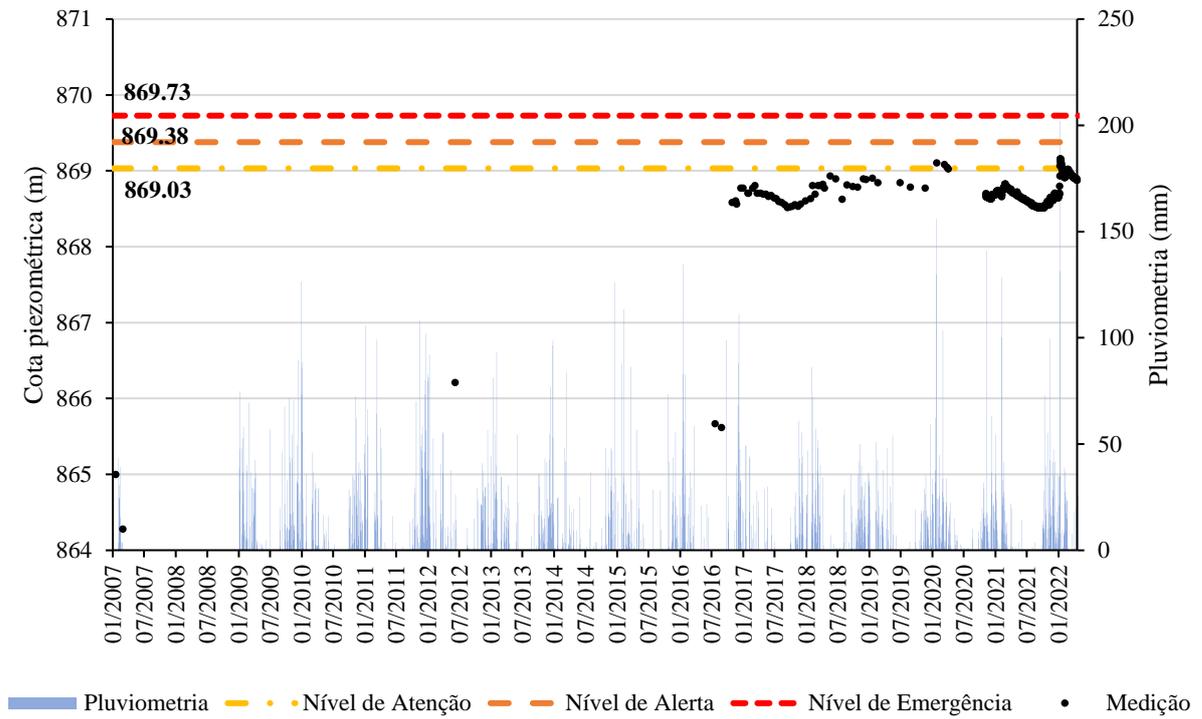
Fonte: Própria autora (2022)

Figura 4.7 - Gráfico histórico piezômetro PZ23



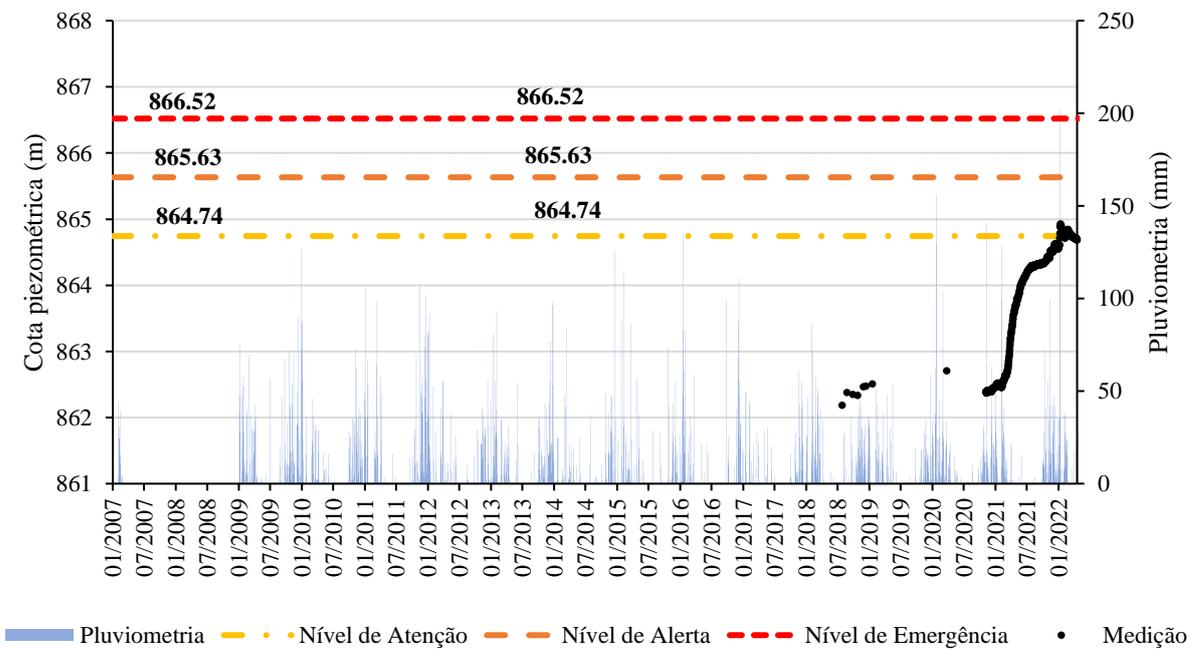
Fonte: Própria autora (2022)

Figura 4.8 - Gráfico histórico piezômetro PZ024



Fonte: Própria autora (2022)

Figura 4.9 - Gráfico histórico piezômetro PZ036



Fonte: Própria autora (2022)

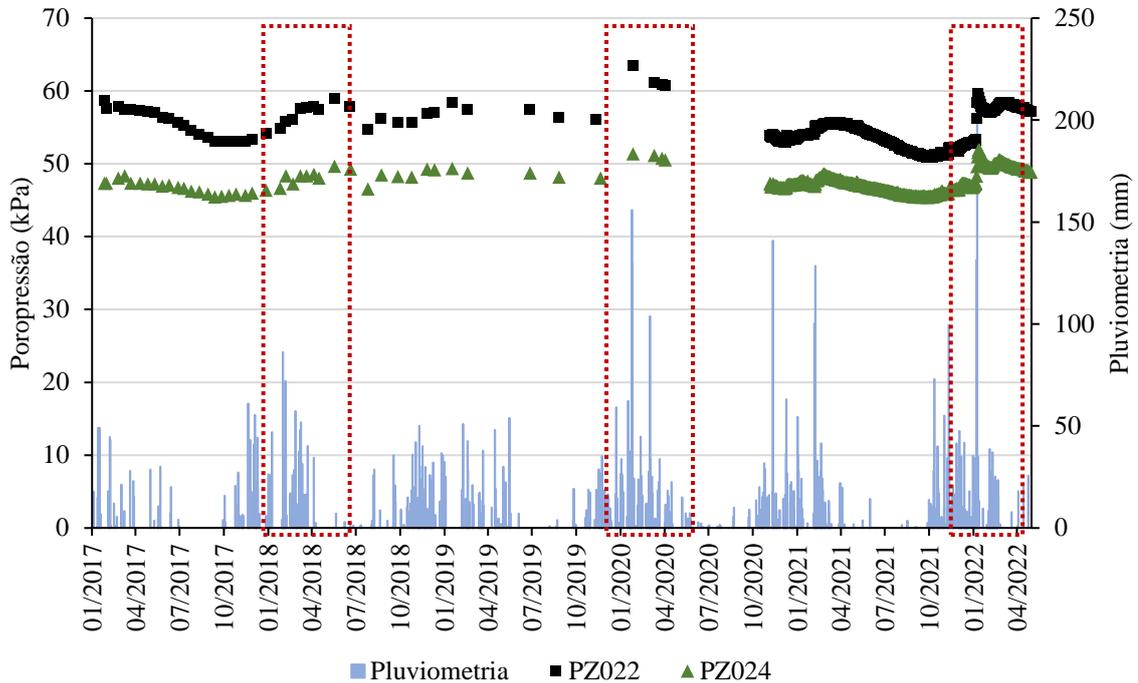
Nos gráficos acima, o eixo vertical apresenta a cota piezométrica em metros e a pluviometria em milímetros, enquanto o eixo horizontal apresenta a data da leitura em escala temporal. Em todos os gráficos, pode-se observar trechos discretos onde ocorrem ausência de informações pluviométricas e das medições das cotas piezométricas. Com exceção dos meses de estiagem, listam-se a seguir algumas possíveis hipóteses das lacunas informações: (1) inexistência da medição de pluviometria e de nível d'água pelo operador; (2) falta de registro dos dados geotécnicos; (3) impossibilidade de medições por condições climáticas adversas e (4) restrição de acesso à estrutura, em cumprimento a legislação vigente (ANM, 2017).

Percebe-se nos gráficos acima, que os tarps dos piezômetros PZ008, PZ009 e PZ024 possuem pequena variação devido aos menores valores encontrados no desvio padrão (Tabela 4.1). Observa-se também que todos os instrumentos da barragem Sul Inferir apresentaram leituras acima do nível de atenção em relação a série histórica e apenas os piezômetros PZ007, PZ008, PZ009 e PZ022 registraram em algum instante a cota piezométrica acima do nível de emergência.

4.3 VARIAÇÃO LONGITUDINAL DA POROPRESSÃO NO MACIÇO

A fim de verificar o comportamento piezométrico atuante próximo a crista do barramento, foram identificados os piezômetros PZ022 e PZ024 no período de janeiro de 2017 a abril de 2022. Este período possibilita um intervalo de análise com coleta de dados contínua e engloba diferentes aspectos climáticos. Tais piezômetros estão instalados em regiões semelhantes (crista do maciço) cuja captação da poropressão se dá em cotas de fundo similares, conforme Tabela 3.3. Para simplificação de cálculo, a poropressão atuante foi calculada considerando a lâmina de água acima da cota de fundo do piezômetro (condição dinâmica) e adotado um peso específico da água de 10 kN/m^3 . A Figura 4.10 apresenta a comparação da poropressão dos instrumentos PZ022 e PZ024.

Figura 4.10: Comparação da poropressão dos instrumentos da crista



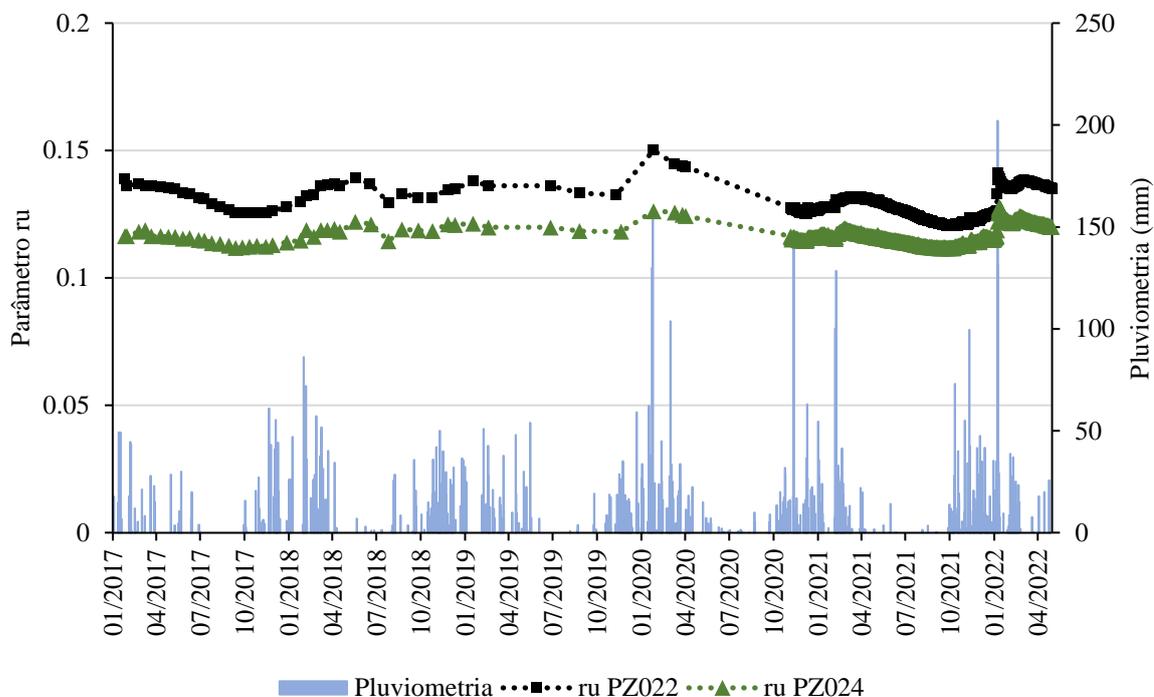
Fonte: Própria autora (2022)

Percebe-se no caso dos piezômetros PZ022 e PZ024 localizados na crista da estrutura, uma similaridade do comportamento das leituras destes instrumentos (Figura 4.10). Este resultado era esperado, uma vez que as profundidades de instalação destes instrumentos variaram pouco, cerca de 0,79 metros. A poropressão dos piezômetros PZ022 e PZ024 apresentaram valores elevados, devido a sua localização próxima ao reservatório. Assim, estes instrumentos possuem uma distância pequena para a dissipação da poropressão e consequentemente uma menor redução das cargas piezométricas e totais. Em relação ao sensor de corda vibrante instalado no instrumento, como apresentado por Silveira (2006), este tipo de sensor possui alta precisão e sensibilidade a pressão neutra, o que justifica o aumento da poropressão nos períodos chuvosos que correspondem aos meses de novembro a março.

Com o objetivo de analisar os valores da poropressão em função da tensão de sobrecarga dos solos, foi calculado o parâmetro r_u para os piezômetros PZ022 e PZ024 mediante a Equação 2.10 do Tópico 0 do Referencial Teórico. Para a tensão de sobrecarga, utilizou-se a espessura de 21,13 m e 20,34 m para os piezômetros PZ022 e PZ024 respectivamente, o que corresponde à diferença entre cota de superfície e de fundo de cada piezômetro. O peso específico para ambos os piezômetros foi de 20 kN/m³, o que se refere ao solo do aterro do barramento. A

Figura 4.11 ilustra a comparação do parâmetro r_u dos piezômetros instalados na crista da estrutura e a Tabela 4.3 apresenta a análise estatística destes instrumentos.

Figura 4.11 - Comparação do r_u dos instrumentos da crista



Fonte: Própria autora (2022)

Tabela 4.3 - Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros PZ022 e PZ024

Instrumento	r_u mínimo	r_u máximo	r_u médio	Desvio Padrão	Amplitude do r_u
PZ022	0,12	0,15	0,13	0,006	0,03
PZ024	0,11	0,13	0,12	0,004	0,02

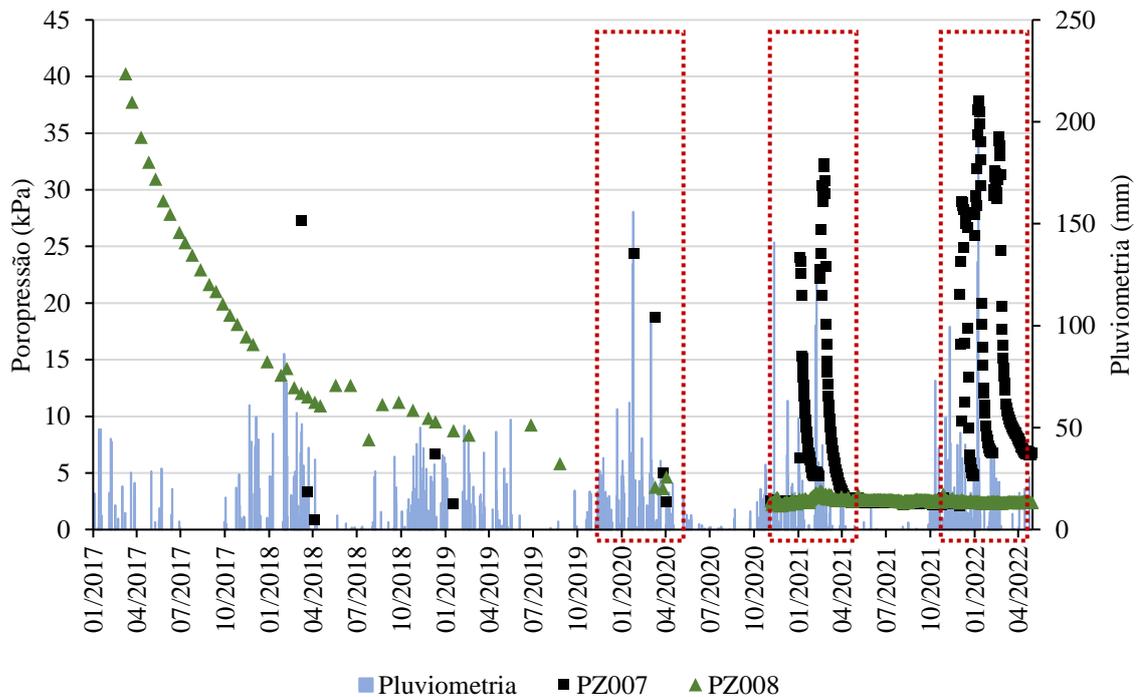
Fonte: Própria autora (2022)

Analisando os dados estatísticos do parâmetro r_u , verifica-se que a poropressão dos instrumentos localizados na crista da estrutura que captam as pressões neutras em seu interior estão se comportando de maneira satisfatória, pois o valor do r_u máximo é de 0,15 e 0,13 para os piezômetros PZ022 e PZ024 respectivamente, encontrando-se dentro do intervalo de valores sugerido pela Rocscience (2021). Logo, pode-se concluir que os valores do parâmetro r_u para estes instrumentos são considerados baixos e os dados apresentam comportamento similar com baixa oscilação, mesmo em períodos de intensa precipitação.

4.4 VARIAÇÃO LONGITUDINAL DA POROPRESSÃO NA FUNDAÇÃO

Com o propósito de analisar a distribuição da poropressão na parte longitudinal da fundação, foi necessário identificar a similaridade da profundidade dos piezômetros observando os valores da Tabela 3.3. Dessa forma, foram selecionados os instrumentos PZ007 e PZ008, onde ambos possuem suas células piezométricas locadas na fundação. Os dados dos instrumentos analisados foram do período de janeiro de 2017 a abril de 2022 e a poropressão foi calculada na condição dinâmica, empregando um valor de 10 kN/m^3 para o peso específico da água. A Figura 4.12 apresenta a comparação da poropressão dos instrumentos PZ007 e PZ008.

Figura 4.12 - Comparação longitudinal da poropressão dos instrumentos da fundação



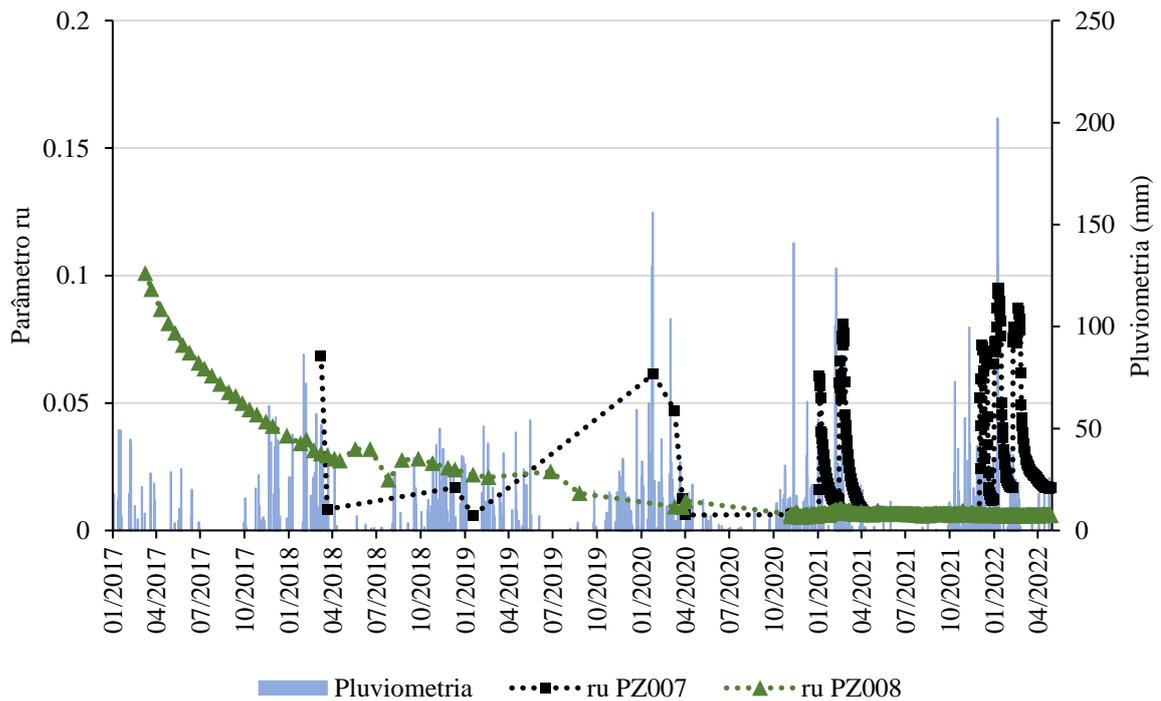
Fonte: Própria autora (2022)

É possível observar no gráfico da Figura 4.12 uma divergência nos valores de poropressão dos piezômetros PZ007 e PZ008. Esperava-se que os valores da pressão neutra destes instrumentos fossem similares, uma vez que ambos se encontram na fundação, estão locados na mesma berma da barragem (Figura 3.5) e apresentam uma diferença pequena da profundidade de instalação. No entanto, apenas o piezômetro PZ007 apresentou uma resposta imediata na variação da pluviometria, indicando que o sensor é bem sensível em resposta ao

período chuvoso, diferente do PZ008 que permaneceu com as leituras constantes mesmo nos períodos chuvosos. Algumas hipóteses para o comportamento distinto do piezômetro PZ008 podem ser explicadas devido: (1) a colmatagem do instrumento; (2) problema no sensor; e (3) localização da célula piezométrica acima do dreno da barragem.

A fim de investigar melhor os piezômetros PZ007 e PZ008, foi realizada análise dos valores da poropressão pelo parâmetro r_u , conforme a Equação 2.10 do Tópico 0 do Referencial Teórico. Para o cálculo da tensão de sobrecarga, utilizou a espessura de 19,91 m e 19,93 m para os piezômetros PZ007 e PZ008 respectivamente, e um peso específico de 20 kN/m³ para ambos os instrumentos e para todos os materiais, conforme já apresentado na Tabela 3.1. A Figura 4.13 ilustra a comparação do parâmetro r_u dos piezômetros instalados na fundação da estrutura e a Tabela 4.4 apresenta a análise estatística destes instrumentos.

Figura 4.13 - Comparação longitudinal do r_u dos instrumentos da fundação



Fonte: Própria autora (2022)

Tabela 4.4 - Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros PZ007 e PZ008

Instrumento	r_u mínimo	r_u máximo	r_u médio	Desvio Padrão	Amplitude do r_u
PZ007	0,005	0,095	0,019	0,022	0,090
PZ008	0,005	0,101	0,009	0,011	0,096

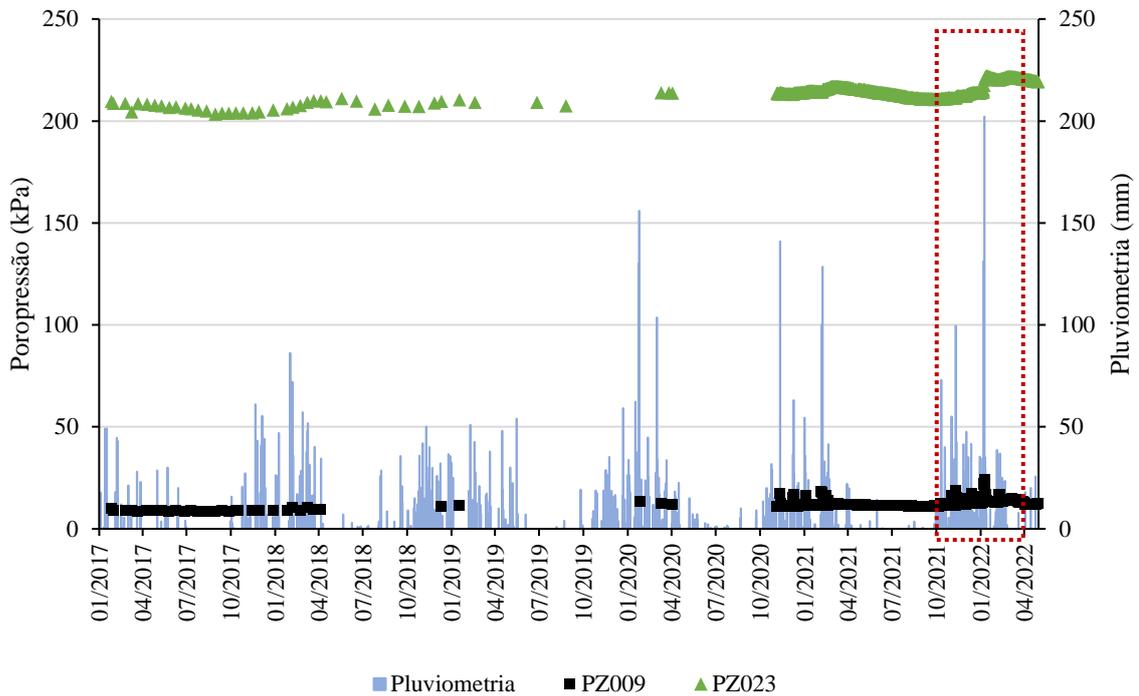
Fonte: Própria autora (2022)

Os dados apresentados na Tabela 4.4 indicam que os valores do parâmetro r_u estão dentro dos padrões estabelecidos pela literatura, onde segundo Rocscience (2021) estes valores variam de 0 a 1. Na Tabela 4.4 também é possível perceber uma pequena variação do r_u máximo dos piezômetros, isso porque no ano de 2017 o instrumento PZ008 apresentou maiores valores de r_u quando comparado com os valores de março de 2021 até abril de 2022. No entanto, apesar desta pequena variação é necessário compreender o comportamento do instrumento PZ008, verificando a instalação do sensor, analisando os dados de leitura e até mesmo realizando a limpeza do furo para entender esta divergência das leituras dos piezômetros longitudinais da fundação.

4.5 VARIAÇÃO TRANSVERSAL DA POROPRESSÃO NA FUNDAÇÃO

Para a análise da distribuição da poropressão na parte transversal da fundação, foram selecionados os piezômetros PZ009 e PZ0023, os quais possuem pequena variação da cota de fundo, conforme já apresentado na Tabela 3.3 . Os dados selecionados para a investigação destes instrumentos foram do período de janeiro de 2017 a abril de 2022. Para o cálculo da poropressão foi considerando o nível de água passando acima da cota de fundo do piezômetro e o peso específico da água de 10 kN/m³. A Figura 4.14 ilustra a comparação da poropressão dos piezômetros PZ009 e PZ023.

Figura 4.14 - Comparação transversal da poropressão dos instrumentos da fundação

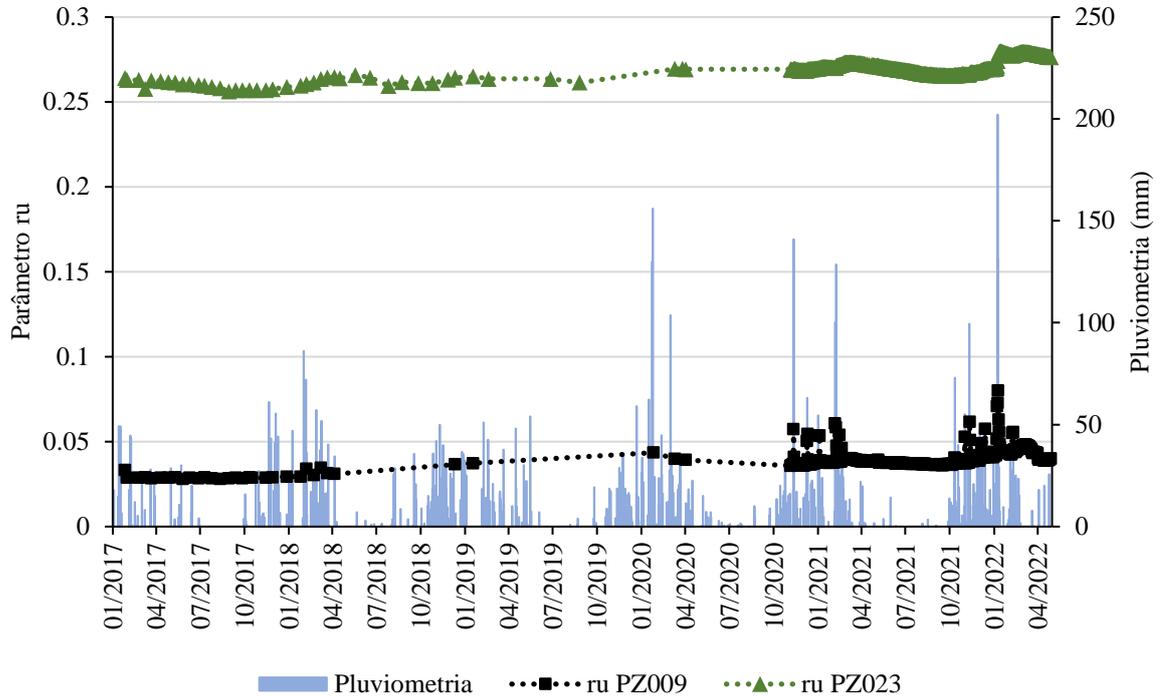


Fonte: Própria autora (2022)

Nota-se no gráfico da Figura 4.14 uma divergência dos valores da poropressão dos instrumentos PZ009 e PZ023. Esta divergência era esperada, pois apesar das cotas de fundo dos instrumentos serem similares, o piezômetro PZ023 foi locado na crista da estrutura e o PZ009 foi instalado no pé do barramento. Logo, pode-se concluir que o gráfico apresentado é coerente devido aos maiores valores da poropressão estarem previstos no instrumento PZ0023 que sofre influência do fluxo de água do reservatório e os menores valores da poropressão serem do instrumento PZ009, instalado em um material menos permeável, além de sofrer uma menor variação pelo fluxo do reservatório.

A análise do parâmetro r_u dos instrumentos PZ009 e PZ023 foram realizados segundo a Equação 2.10 do Tópico 0 do Referencial Teórico. No cálculo da tensão de sobrecarga, foi utilizada a espessura de 15,18 m e 39,70 m para os piezômetros PZ009 e PZ023, respectivamente e um peso específico de 20 kN/m^3 para ambos os instrumentos e para todos os materiais, conforme já apresentado na Tabela 3.1. A Figura 4.15 ilustra a comparação do parâmetro r_u dos piezômetros instalados na fundação da estrutura e a Tabela 4.5 apresenta a análise estatística destes instrumentos.

Figura 4.15 - Comparação transversal do r_u dos instrumentos da fundação



Fonte: Própria autora (2022)

Tabela 4.5 - Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros PZ009 e PZ023

Instrumento	r_u mínimo	r_u máximo	r_u médio	Desvio Padrão	Amplitude do r_u
PZ009	0,028	0,080	0,039	0,005	0,052
PZ023	0,256	0,280	0,270	0,005	0,023

Fonte: Própria autora (2022)

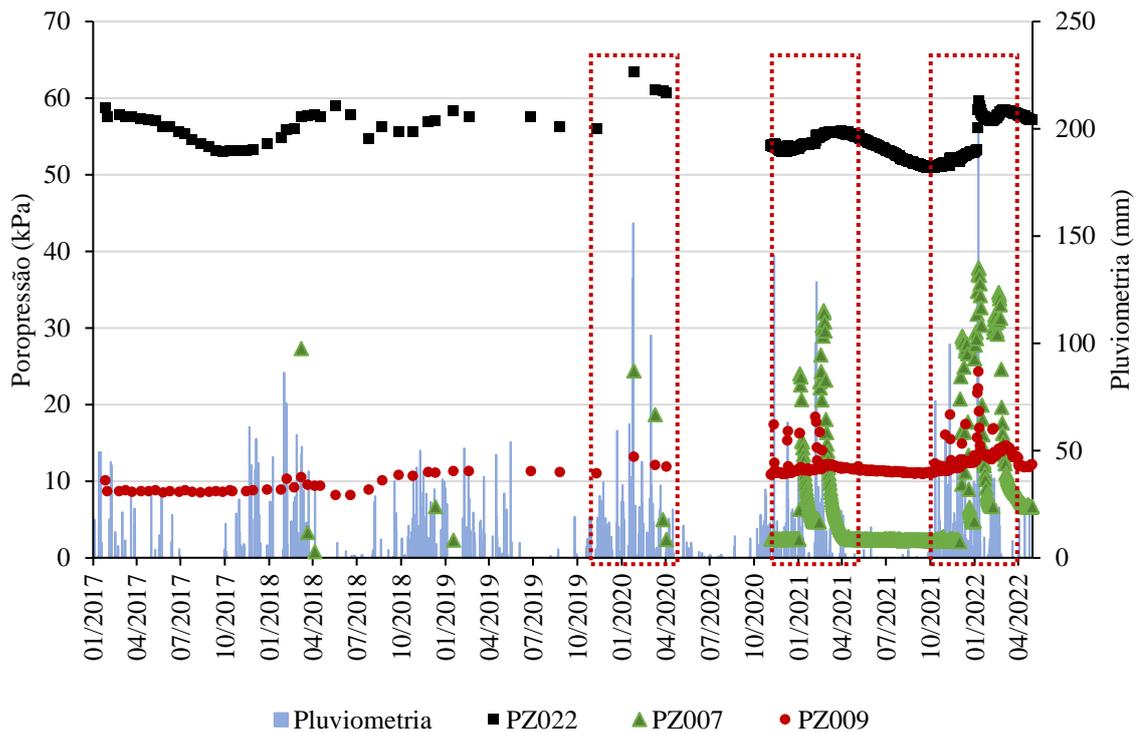
Em análise da Tabela 4.5, percebe-se uma pequena variação dos dados do parâmetro r_u para ambos os piezômetros e estes valores são considerados satisfatórios pois enquadram-se na variação apresentada por Rocscience (2021). Também é possível observar um certo padrão para o parâmetro, o que significa que os dados estão comportados e os valores do r_u mostrados foram conforme o esperado, sendo maior valor para o PZ023 e menor valor para o PZ009.

4.6 ANÁLISE DE POROPRESSÃO NA SEÇÃO A-A'

Com o intuito de analisar os valores da poropressão da seção principal, foram selecionados os dados dos piezômetros PZ022, PZ007 e PZ009 do período de janeiro de 2017

até abril de 2022. Este intervalo temporal, permitiu a análise e a observação do comportamento dos instrumentos no ciclo chuvoso e de estiagem. O cálculo da poropressão foi realizado na condição geoestática, empregando um valor de 10 kN/m^3 para o peso específico da água. A Figura 4.16 apresenta a comparação da poropressão dos instrumentos da seção principal.

Figura 4.16 - Comparação da poropressão dos instrumentos da seção A-A'



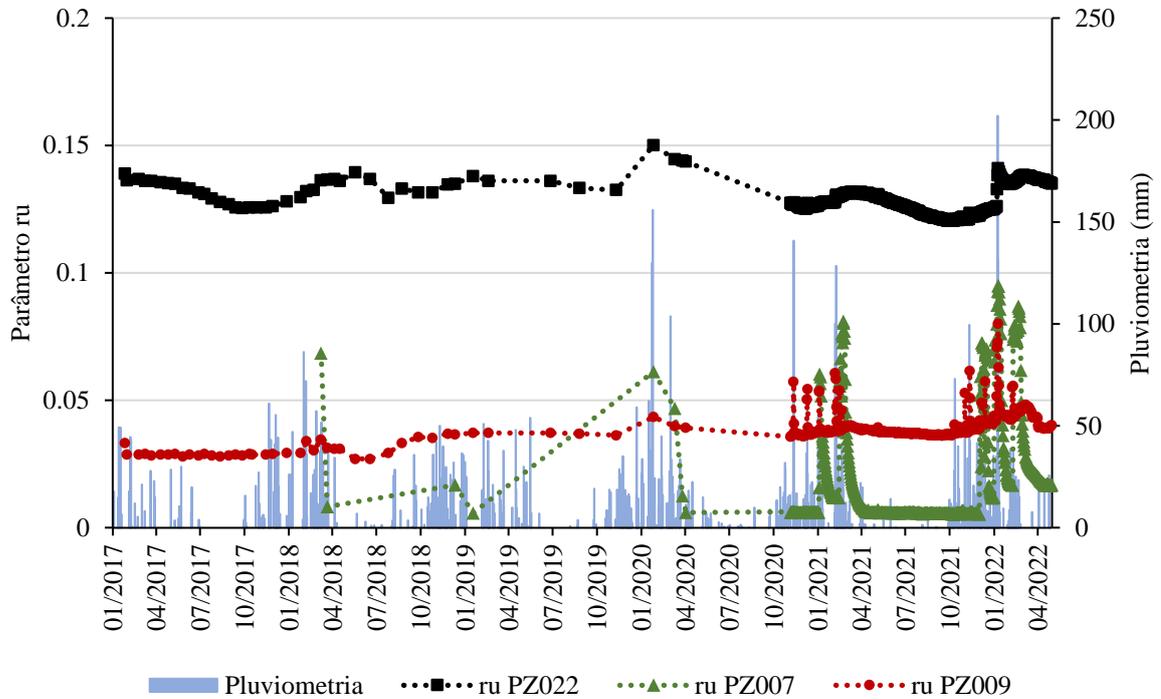
Fonte: Própria autora (2022)

Em análise ao gráfico da Figura 4.16, percebe-se que os valores da poropressão estão coerentes com os valores esperados. O piezômetro PZ022 foi instalado próximo a crista, o que esclarece os valores da poropressão serem maiores neste instrumento, devido a maior influência do fluxo do reservatório. Os piezômetros PZ007 e PZ009 possuem célula piezométrica instalada no solo residual e no aterro de reforço, respectivamente, onde mediante os valores da Tabela 3.1 é possível perceber que a permeabilidade do solo residual é maior do que a do aterro de reforço, o que justifica o aumento da poropressão em relação ao período chuvoso.

A fim de avaliar os dados do parâmetro r_u dos instrumentos da seção A-A' foram realizados cálculos segundo a Equação 2.10 do Tópico 0 do Referencial Teórico. No cálculo da tensão de sobrecarga, foram utilizadas as espessuras de 21,13m, 19,91m e 15,18 m para os piezômetros PZ022, PZ007 e PZ009, respectivamente, e peso específico de 20 kN/m^3 para ambos os instrumentos, já apresentado na Tabela 3.1. A Figura 4.17 ilustra a comparação do

parâmetro r_u dos piezômetros instalados na seção principal da estrutura e a Tabela 4.6 apresenta a análise estatística destes instrumentos.

Figura 4.17 - Comparação do r_u dos instrumentos da seção A-A'



Fonte: Própria autora (2022)

Tabela 4.6 - Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros da seção A-A'

Instrumento	r_u mínimo	r_u máximo	r_u médio	Desvio Padrão	Amplitude do r_u
PZ22	0,120	0,150	0,129	0,006	0,030
PZ07	0,005	0,095	0,039	0,022	0,090
PZ09	0,027	0,080	0,039	0,005	0,053

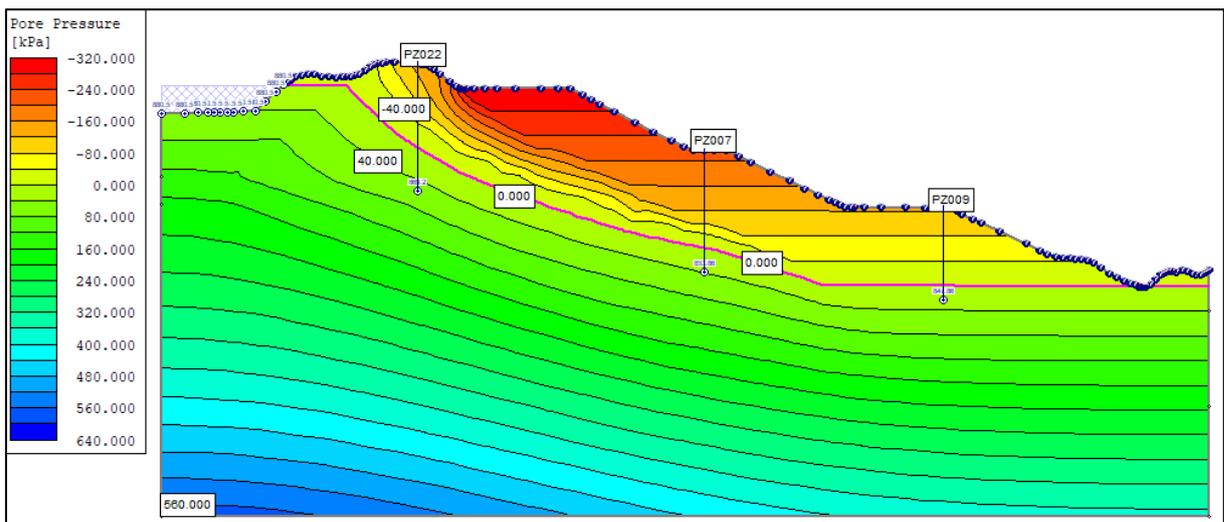
Fonte: Própria autora (2022)

Em análise à Tabela 4.6 percebe-se que os dados dos piezômetros da seção A-A' correspondem com o intervalo de valores conforme apresentado por Rocseince (2021) e os mesmos, estão coerentes com os valores esperados. A amplitude e o desvio padrão de todos os piezômetros da seção principal é baixa. Isso significa que os dados dos instrumentos PZ22, PZ09 e PZ07 são comportados e possuem um padrão com relação ao parâmetro r_u .

4.7 ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO NA SEÇÃO A-A'

Com os dados dos piezômetros presentes na seção A-A' foi possível realizar a análise de percolação da seção principal. Para isso, a cota do nível freático utilizada foi de 880,50 m conforme apresentado pela empresa, é considerado o nível de água máximo operacional da barragem Sul Inferior. Os valores de carga total imputados no *software* Slide em cada piezômetro foi de: 869,20 m, 853,86m e 847,86m para os piezômetros PZ022, PZ007 e PZ009, respectivamente. Estes valores foram selecionados através da série de medição histórica dos instrumentos da barragem, no dia 08 de janeiro de 2022, cuja pluviometria registrada foi de 202,06mm. Logo, avaliando o pior cenário em relação ao período chuvoso e com o *input* dos parâmetros geotécnicos já apresentados na Tabela 3.1, foi possível estabelecer linha freática calculada, após a análise de percolação pelo *software* Slide, conforme apresentado na Figura 4.18.

Figura 4.18 - Linha freática da seção A-A'



Fonte: Própria autora (2022)

Analisando o resultado encontrado da Figura 4.18 é possível observar as isolinhas de poropressão, além do nível freático seguindo do reservatório até o “encaixe” da linha freática no maciço, o que evidencia, numericamente, a adequada performance do sistema de drenagem interna do aterro de reforço, composto pelo tapete drenante e pelo dreno de pé no controle do fluxo percolado pelo maciço. Na linha freática, o valor da carga piezométrica é igual a zero e conforme aumenta a profundidade da estrutura, aumenta o valor da poropressão chegando ao valor de 560 kPa na camada do maciço rochoso. O valor da carga piezométrica acima e abaixo

Tabela 4.7 - Comparação da poropressão real e estimada

Instrumento	Poropressão real (kPa)	Poropressão estimada (kPa)	Erro estimado (%)
PZ022	58,500	59,546	1,788
PZ007	37,000	38,454	3,929
PZ009	22,100	23,837	7,859

Fonte: Própria autora (2022)

Com os dados obtidos na Tabela 4.7 é possível observar uma diferença entre as poropressões do modelo e as poropressões no real. Esta diferença é considerada pequena, uma vez que o erro estimado ficou abaixo de 10% para todos os instrumentos da seção principal.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos através da série histórica dos piezômetros instalados na barragem Sul Inferior, percebe-se que a amplitude dos intervalos de medições das cotas piezométricas manteve na ordem de 1,67 a 4,88m, apesar da presença de outliers. Em análise dos dados nos *box-plots*, percebe-se que todos mantiveram com pequena variação, o que se refere ao comportamento padrão dos dados em relação ao tempo. Já no comportamento amostral das leituras dos piezômetros, percebe-se que o comportamento hidráulico nos diferentes pontos da barragem não é homogêneo.

Em relação aos tarps de controle, a menor variação encontrada entre os níveis de atenção alerta e emergência ocorreram nos piezômetros PZ008, PZ009 e PZ024 devido aos menores valores encontrados acerca do desvio padrão destes instrumentos. Diante deste fato, qualquer variação mínima das cotas piezométricas destes instrumentos é capaz de colocá-los em níveis sejam eles de atenção, alerta ou emergência, mas não necessariamente significa que há algum dano na estrutura, sendo necessário o estudo e o entendimento do comportamento do instrumento, além de realizar uma correlação dos outros instrumentos que monitoram a estrutura.

No que se refere aos gráficos históricos, percebe-se que todos os piezômetros instalados na barragem apresentaram leituras acima do nível de atenção em algum momento da série histórica e que apenas os piezômetros PZ007, PZ008, PZ009 e PZ022 registraram leituras acima do nível de emergência. Nota-se nos gráficos também, trechos onde ocorreram a ausência de dados pluviométricos e falta de leituras nas medições das cotas piezométricas. No que se refere as leituras das cotas piezométricas, os dados se comportaram de forma contínua a partir de 2019 quando todos os instrumentos da barragem Sul Inferior passaram a ser automatizados.

Nas análises de poropressão dos instrumentos nas porções longitudinal do maciço, transversal da fundação e na seção principal, todos os dados se comportaram de maneira coerente, ou seja, ocorreu a depreciação das cargas piezométricas a partir do reservatório. Sobre os valores encontrados do parâmetro r_u nestas porções, ressalta-se que ambos foram aderentes ao intervalo mencionado na literatura.

Apenas no estudo da variação longitudinal da poropressão na fundação, houve divergência nos valores encontrados. Esperava-se que ambos os instrumentos comportassem de forma similar, no entanto, este comportamento não foi observado nos instrumentos PZ007 e PZ008. Portanto, torna-se necessário uma investigação mais apurada dos instrumentos

localizados na mesma berma da fundação. Em relação ao parâmetro r_u nestes instrumentos, ambos possuem valores coerentes com a literatura.

Por fim, a análise de percolação dos instrumentos da seção principal foi coerente com o esperado. Os maiores valores encontrados de poropressão foram na parte inferior da estrutura, chegando a 560 kPa. Em relação aos valores de poropressão apresentados pelo modelo com os esperados no real, nota-se os valores aderentes com um erro máximo estimado de 7,28%. Este erro já era previsto, uma vez que os dados do modelo numérico não necessariamente podem coincidir com os dados apresentados no modelo real.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar análises de comparação entre os dados piezométricos e os dados de deslocamento;
- Realizar análises de percolação para diferentes níveis do reservatório da barragem Sul Inferior;
- Realizar a análises de tarps dos instrumentos levando em consideração o cálculo do fator de segurança e controlá-los com os valores estatísticos encontrados;
- Realizar análises de estabilidade da estrutura.

7 REFERÊNCIAS

AMORIM, D. G.; **Balanço hídrico de lagoa de espessamento de rejeitos de bauxita no oeste do Pará**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018.

ANA – Agência Nacional de Águas (Brasil). **Guia de orientação e formulários para inspeções e segurança de barragens**. Manual do empreendedor sobre segurança de barragens, 2). Brasília, 2016.

ANM – Agência Nacional de Mineração (Brasil). Portaria DNPM nº70.389. Segurança de Barragens. 2017. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/documentos/portaria-dnpm-n-70389-de-17-de-maio-de-2017-seguranca-de-barragens/view> >. Acesso em: 05 de maio de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2010) ABNT NBR 15856: Geomembranas e produtos correlatos – Determinação das propriedades de tração. Rio de Janeiro.

BARBOSA, C. C.; **A utilização de materiais geossintéticos em barragens de terra e enrocamento**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação de Engenharia Civil), Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2016.

BARBOSA, L. G. M.; AMARAL, D. R. B. **Segurança de barragens: estudo de caso de rompimento de estruturas de rejeitos em Minas Gerais**. Revista multidisciplinar humanidade e tecnologias (FINOM), Faculdade do Nordeste de Minas, v. 34, n. 1, p. 358-395, 2022.

CARVALHO, G.B.; CORTELETTI, R. C.; **Proposta metodológica para previsão de impactos decorrentes de acidentes com barragens de rejeito**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 26, p. 525-534, 2021.

CASTRO, L. V. P. de; **Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mineral, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

CERQUEIRA, H.; **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração**. Dissertação (Mestrado Profissional) – Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017.

COELHO, A. S.; **Instrumentação Geotécnica em Barragens de Terra e Enrocamento**. LinkedIn. 17 de janeiro de 2017. Disponível em: < <https://pt.linkedin.com/pulse/instrumenta%C3%A7%C3%A3o-geot%C3%A9cnica-em-barragens-de-terra-e-santos-coelho> >. Acesso em: 12 de dezembro de 2021.

COSTA, A. M. da; **Estudo de tensão deformação para o 3º alteamento da barragem Itabiruçu**. Dissertação (Mestrado Profissional) – Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

CRUZ, P. T. de; **100 Barragens Brasileiras**. 2. ed. [S.l]: Oficina de textos, 2004.
DATA SCIENCE. **Regra Empírica**. 2020. Disponível em: < <https://datascience.eu/pt/matematica-e-estatistica/regra-empirica-o-que-e-isso/> >. Acesso em: 15 de abril de 2022.

DGSI. **Pneumatic Piezometer**. 2017. Disponível em: < <https://durhamgeo.com/product/pneumatic-piezometers/> >. Acesso em 27 de dezembro de 2021.

DRUMOND, L. B.; **Análise de vibrações e desenvolvimento de poropressão em rejeito de mineração**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. **Soil strength and slope stability**. Wiley, Hoboken. 2005.

FARACE, B. L.; SILVEIRA, F. M. R.; GUEDES, F. N. de J.; **Argila bentonítica atuando como impermeabilizante em base de aterros sanitários**. Revista Engenharia de Interesse Social. vol. 1, n. 1, p. 1-12. 2016.

FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION (FERC). **Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects**. Capítulo 9, Instrumentation and Monitoring, 2003.

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**. Dissertação (Mestrado) Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2003.

Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM); **Gestão de barragens**. Portal Meio Ambiente MG. Disponível em: < <http://www.feam.br/gestao-de-barragens> >. Acesso em: 05 de março de 2021.

FUSARO, T. C.; **Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: um estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau**. Dissertação (Mestrado Profissional) – Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2007.

G1. **Tragédia de Mariana, 5 anos: sem julgamento ou recuperação ambiental, 5 vidas contam os impactos no período**. 05 de novembro de 2020. Disponível em: < <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/11/05/tragedia-de-mariana-5-anos-sem-julgamento-ou-recuperacao-ambiental-5-vidas-contam-os-impactos-no-periodo.ghtml> >. Acesso em: 10 de novembro de 2021.

GALO, D. de B.; **Análise de riscos em barragens de rejeitos com o uso de técnicas sem probabilísticas de estabilidade de taludes – Um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2017.

GEORIO. **Manual Técnico de Encostas**. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro. 2a Edição, Rio de Janeiro, 2000.

GEOSTUDIO. **Stability Modeling with GeoStudio**. GEO-SLOPE International, Ltd. 2021.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V.; **Soil Mechanics**, [S.l]. Jonh Willey and Sins, Inc., Singapura, 1969.

LIGOCKI, L. P.; **Comportamento geotécnico da barragem de Curuá-Una, Pará**. Dissertação (Mestrado) Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

MACHADO, W. G. de F.; **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mineral, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

MARTINS, T. A.; **Valores de controle para instrumentação em barragens de rejeito**. Monografia (Especialista em Engenharia e Tecnologia de Barragens). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.

MELO, I. A. de; NETO, J. M. N.; **Plano de manutenção e segurança de barragens – RMS** **Serviços Desenvolvidos pelo Departamento de Engenharia de Manutenção – MME**. Encontro Técnico AESABESP. 29º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. 2018.

MOREIRA, M. S.; **Um modelo de elementos finitos para a análise acoplada de problemas de adensamento com simetria axial**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Fundação, Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2005.

ORTIGÃO, J. A. R.; **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3. ed.: Terratek, 2007.

OVANDO, L. dos S.; **Dimensionamento de sistema extravasor de emergência em barragens de rejeitos da mineração**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.

PARREIRAS, M.; **Barragem que forçou evacuação de moradores em MG começa a ser desmanchada**. Estado de Minas, Barão de Cocais, 05 de julho 2021. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2021/07/05/interna_gerais,1283438/barragem-que-forcou-evacuacao-de-moradores-em-mg-comeca-a-ser-desmanchada.shtml>. Acesso em: 12 de dezembro de 2021.

PENNA, D. et al.; **Carta de Risco Como Ferramenta Na Gestão de Segurança de Barragens**. Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos - SGBR, II. p. 1-15. Belo Horizonte, 2017.

PETROCELLI, P. de S.; **Avaliação da influência do sistema de drenagem inclinado durante o regime operacional transiente de uma barragem de terra**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019.

PINHEIRO, M. C.; **Diretrizes para elaboração de estudos hidrogeológicos e dimensionamento hidráulicos em obras de mineração**. [S.l]. 2011.

PINTO, C. de S.; **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed.: Oficina de textos, 2006.

REZENDE, V. A.; **Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.

ROCHA, H.; **Considerações sobre o Balanço Hídrico de Barragens de Rejeitos**. Instituto Minere. 29 de março de 2021. Disponível em: < <https://institutominere.com.br/blog/balanco-hidrico-barragens-de-rejeitos> >. Acesso em 15 de novembro de 2021.

ROCSCIENCE. **Slide 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes User's Guide**. Part 3. 2004.

ROCSCIENCE. **Slide2 User Guide**. 2021. Disponível em: < <https://www.rocscience.com/> >. Acesso em: 03 de março de 2022.

SANFONA, P. M. G. dos S. S.; **Aplicação de geomembranas de PVC em Barragens: Influência da Temperatura no Controle das Soldaduras**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa. 2018.

SANTOS, L. C.; **Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2019.

SESTREM, L. P.; **Concepção e implantação de um plano de instrumentação para a avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Construção Civil com Área de Concentração em Geotecnia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

SILVA, J. da; **Análise em segurança de barragens com base em sistema de inspeção e monitoramento de instrumentação**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

SILVA, M. F. S.; **Sistema de monitoramento online de barragens de mineração**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2019.

SILVEIRA, J. F. A.; **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. 1. ed.: Oficina de textos, 2006.

Skempton. A.W. **The pore-pressure coefficients A and B**, Géotechnique 4 (4). p 143-147. 1954.

SNISB. **Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens**. [S. l.]. Disponível em: < <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb> >. Acesso em: 10 março 2022.

SOARES, L.; **Barragem de Rejeitos**. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2010.

SOUZA, D. O. O. de; **Interpretação e aplicação dos níveis de controle do monitoramento geotécnico na avaliação de segurança de barragens de mineração**. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental, Universidade Federal do

Pará. Tucuruí, 2018.

SOUZA, T. C. de; **Metodologia de avaliação de liquefação em barragens de rejeito: uma abordagem probabilística**. Dissertação (Mestrado) – Geotecnia em Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.

TURELLA, D. S.; **Critérios de dimensionamento para bacia de dissipação por ressalto hidráulico Tipo I**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

VELTEN, R. Z. et al.; **Proposição de Metodologia para a Elaboração de Carta de Risco de Barragens de Terra e Terra-Enrocamento**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, 2016.

VICK, S. G.; **Planning design and analysis of tailing dams**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

VIEIRA, M. F.; LOPES, D. J. de S.; NETO, A. F. L.; BAYMA, R. S.; **Influência do lago da UHE Tucuruí sobre a barragem de concreto: Um estudo de caso sobre os MTJ'S**. Revista CIATEC – UPF, vol. 9 (1), p. 1 – 14, 2017.

VILAR, O. M.; BUENO, B. de S.; **Mecânica dos Solos Volume II**. Universidade de São Paulo. 2004.

ZUCULIN, S.; DIAS, G. G.; **Curso de Segurança de Barragens Módulo II: Inspeção e Auscultação de Barragens**. 2020.